



INGENIERÍA AMBIENTAL
INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y QUÍMICAS
FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis de la efectividad de los procesos de Deposición Total, Húmeda y Seca en los eventos de limpieza de la atmósfera en la ciudad de Valparaíso.

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

TESISTA : 
ROBERTO OLAVE ASTUDILLO

PROF. GUIA :
Dr. FRANCISCO CERECEDA-BALIC

VALPARAÍSO, DICIEMBRE DE 2005



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todo el equipo del Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Técnica Federico Santa María (a los que están y a los que estuvieron: Mónica, Ana María, Nicolás, Pelu y Víctor) y a mi profesor guía, Dr. Francisco Cereceda-Balic por el apoyo y los conocimientos que me entregaron durante el tiempo en que trabajamos juntos. Debo agradecer también al proyecto interno DGIP-UTFSM, a CONAMA (RM) por el financiamiento, y a SESMA por el uso de las estaciones de monitoreo.

Mención especial merecen mis padres que han esperado pacientemente que este largo proceso termine y mis amigos quienes me han dado la fuerza para lograrlo.

A todos, muchas gracias.

INDICE DE MATERIAS

1	INTRODUCCION	5
1.1	Principales tipos de contaminantes atmosféricos	6
1.2	Reacciones Importantes	9
1.3	Otros tipos de contaminantes del aire	10
1.4	Orígenes y distribución de los contaminantes atmosféricos	11
1.5	El concepto de aerosol atmosférico	15
1.6	Deposición total, seca y húmeda	16
1.7	Métodos de monitoreo	18
1.8	Sobre la toma de muestras	18
2	ESTADO DEL ARTE	20
2.1	Efectos del material particulado en la salud y el medio ambiente	20
2.2	Legislación relacionada a material particulado	21
2.3	Redes de monitoreo de la contaminación atmosférica	27
2.4	Aspectos que influyen en la contaminación atmosférica en Chile	38
2.5	Los casos de Valparaíso y Santiago	39
2.6	Métodos pasivos de recolección de contaminantes atmosféricos	51
3	OBJETIVOS	53
4	HIPOTESIS	53
5	DESARROLLO	54
5.1	Equipos, materiales y reactivos	54
5.2	Metodologías	55
5.3	Procedimientos experimentales y actividades	67
6	RESULTADOS	70
6.1	Resultados y análisis de experimentos realizados en el laboratorio	70
6.2	Comparación entre monitoreos mensuales y semanales	77
6.3	Resultados y análisis de la data histórica de Valparaíso	78
6.4	Comparación de los muestreos paralelos entre Santiago y Valparaíso	80
6.5	Evaluación de la efectividad de los procesos de Deposición como mecanismos de limpieza de la atmósfera	83
7	CONCLUSIONES	87
8	BIBLIOGRAFIA	90
9	ANEXOS	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Generación de contaminantes por causas naturales y antrópicas	11
Tabla 1.2	Contaminantes originados por fuentes antrópicas	12
Tabla 2.1	Casos de contaminación del aire y n° de muertes asociadas a ellos hasta 1966	20
Tabla 2.2	Normas de calidad y métodos de análisis de los contaminantes en Chile	23
Tabla 2.3	Estándares ambientales de calidad de aire para EE.UU.	25
Tabla 2.4	Comparación de las normas de calidad del aire para partículas en suspensión	26
Tabla 2.5	Índices ICA e ICAP en Chile	27
Tabla 2.6	Índice de la calidad del aire por MP en Chile	28
Tabla 2.7	Niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para MP	28
Tabla 2.8	Valores para distintos contaminantes en la UE	30
Tabla 2.9	Índice IMECA en México	32
Tabla 2.10	Comparación de metodologías de medición de contaminantes	33
Tabla 2.11	Índice AQI en EE.UU.	34
Tabla 2.12	Niveles críticos de contaminantes en EE.UU.	35
Tabla 2.13	Número de estaciones de monitoreo por área	38
Tabla 2.14	Resumen de emisiones de fuentes móviles en Valparaíso durante 1999	49
Tabla 2.15	Concentraciones anuales de MP2.5 y MP10 para Valparaíso (1998)	50
Tabla 2.16	Contribución porcentual de fuentes al MP en Valparaíso	51
Tabla 2.17	Comparación entre métodos de monitoreo pasivo y activo	51
Tabla 6.1	Diferencias pre y post extracción	71
Tabla 6.2	Resultados del experimento n° 2 de evaluación del tipo de extracción	72
Tabla 6.3	Resultados del experimento n° 2 de disolución de CO ₂	75
Tabla 6.4	Promedios de pH, conductividad y DT para el periodo 2002 - 2003	77
Tabla 6.5	Comparación de variables entre los años más y menos lluviosos	80
Tabla 6.6	Promedio de pH en Valparaíso para el periodo 2000 - 2004	80
Tabla 6.7	Concentración de DT para el año promedio del periodo de muestreo	83
Tabla 6.8	Niveles de calidad del aire	84
Tabla 6.9	Matriz de eficiencia de limpieza de la atmósfera	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Distribución de material particulado según el diámetro de partícula	17
Figura 2.1	Esquemas de brisas durante el día y la noche	40
Figura 2.2	Perfil de temperaturas sobre Santiago a diversas horas del día	40
Figura 2.3	Corte esquemático de la zona central a la altura de Santiago	41
Figura 2.4	Variación diaria de la concentración de contaminantes y altura de la capa de mezcla	42
Figura 2.5	Ingreso de una vaguada costera al valle de Santiago	43
Figura 2.6	Termino del paso de una vaguada costera por el valle de Santiago	43
Figura 2.7	Temperaturas promedios mensuales en Valparaíso (1970 – 2002)	45
Figura 2.8	Frecuencia relativa anual de dirección del viento en Valparaíso	47
Figura 2.9	Esquema de brisas costeras	48
Figura 2.10	Contribuciones porcentuales según fuentes de origen para la concentración anual de PM2.5 y PM10 en Valparaíso	50
Figura 5.1	Puntos de monitoreo de DT, DS y DH	56
Figura 5.2	Estaciones de la red MACAM-SESMA utilizada en las campañas en paralelo	58
Figura 5.3	Estación de monitoreo Campbell Scientific	59
Figura 5.4	Esquema de distribución de los aparatos de medición de la estación de monitoreo Campbell Scientific	60
Figura 5.5	Wet Only Collector	60
Figura 5.6	Despiece del CPDT	61
Figura 5.7	Esquema de un CPDT para especiación inorgánica	63
Figura 5.8	Esquema de un CPDT para especiación orgánica	63
Figura 5.9	Procedimiento de lavado para la preparación de de CPDT inorgánicos	64
Figura 5.10	Lavado del CPDT post muestreo y tratamiento de las muestras	66
Figura 6.1	Grafico de pH pre y post extracción	70
Figura 6.2	Grafico de conductividad pre y post extracción	71
Figura 6.3	Grafico del experimento n° 2 de evaluación del tipo de extracción	73
Figura 6.4	Grafico del promedio de ebullición v/s conductividad	74
Figura 6.5	Grafico del promedio de exposición v/s conductividad	74
Figura 6.6	Grafico de variación de pH	75
Figura 6.7	Grafico de pH v/s dilución	76
Figura 6.8	Grafico de conductividad v/s dilución	76
Figura 6.9	Promedio anual de deposiciones en estación Torre USM	78
Figura 6.10	Promedio anual de deposiciones en estación Av. España	78
Figura 6.11	Promedio anual de conductividad en estación Torre USM	79
Figura 6.12	Promedio anual de conductividad en estación Av. España	79
Figura 6.13	Año promedio de DT para el periodo de muestreo 2000- 2004	81
Figura 6.14	Año promedio de uS/cm para el periodo de muestreo 2000- 2004	82

1. INTRODUCCION

El aire es un recurso indispensable para la vida sobre el planeta. El oxígeno, presente en una proporción aproximada al 21% del volumen del aire, es utilizado en los procesos biológicos fundamentales y en innumerables procesos de combustión en industrias, vehículos y fuentes de calefacción.

El hombre utiliza la atmósfera como un receptáculo gratuito e inagotable de los desechos que emite. Mezclas de gases y partículas son devueltas a la atmósfera como subproductos de los procesos de combustión y otras tantas actividades propias de las transferencias de energías. Se espera, de esta forma, que la naturaleza se encargue de limpiar de alguna manera esos residuos. Si bien es cierto que existen mecanismos naturales de depuración y limpieza de la atmósfera, estos no pueden lograr completamente su propósito. Los ciclos naturales tienen velocidades propias y capacidades determinadas para actuar.

Se requiere tiempo para que la lluvia arrastre y para que el viento remueva los contaminantes atmosféricos emitidos desde una ciudad, para que la vegetación absorba algunos gases y para la sedimentación del material particulado.

El desarrollo industrial ha producido una modificación de los equilibrios naturales en diferentes regiones, principalmente en las áreas con intervención antrópica. En la gran mayoría de las áreas urbanas, el volumen de contaminantes atmosféricos emitidos y la velocidad a la cual se incorporan al aire, sobrepasan con creces las posibilidades de una depuración por parte de los ciclos biogeoquímicos. Cuando esto sucede estamos en presencia de lo que el hombre ha denominado "contaminación atmosférica".

La contaminación del aire, como problema actual es, como se mencionó anteriormente, fundamentalmente una consecuencia de las actividades antrópicas, del sostenido desarrollo tecnológico y la excesiva concentración demográfica en áreas reducidas. Durante miles de años debido al uso exclusivo de la madera como fuente de energía, unida a actividades económicas no agresivas para el medio, esta contaminación del aire se reducía a las escasas zonas urbanas que existían, sin embargo, con el inicio de la revolución industrial, comenzaron también el aumento masivo de la industrialización y la urbanización, lo que agravó el problema de manera considerable. Este desarrollo industrial introdujo de forma sostenida e indiscriminada el uso del carbón mineral como principal combustible, posteriormente a comienzos del siglo XIX se incorporo el petróleo a la producción energética, experimentando un incremento progresivo al compás de la evolución positiva de la economía y el aumento de la población. Las industrias y las zonas urbanas se multiplicaron, lo que trajo inmediatamente un enorme aumento en la demanda de energía como fuente motriz del desarrollo humano.

Surgieron voces que indicaron que el uso de aquellas fuentes de energía estaban originando "sustancias dañinas" que se incorporaban a la atmósfera, pero ello no causó preocupación ni fue considerado problema –salvo casos aislados- hasta hace algunas décadas en que se empieza a tomar conciencia de la gravedad de la situación. También se logró comprender que aunque existe una superioridad de las fuentes naturales sobre las antrópicas como generadoras de materias potencialmente contaminantes y que la naturaleza posee mecanismos propios de depuración, el problema actual radica, entre otras causas, de la adición a la atmósfera de grandes cantidades de sustancias extrañas a la composición normal de aire, con la alteración que ello supone respecto de cierto procesos y de las concentraciones que se originan en ciertas áreas productoras –que a la vez son, generalmente, las de mayor densidad demográfica (1). Todo ello introduce un elemento que, desequilibra el sistema natural de depuración de la atmósfera.

Es importante señalar en este punto que el vertedero natural de los contaminantes atmosféricos se encuentra principalmente en la Tropósfera, la cual es la capa atmosférica mas cercana al suelo, se extiende desde la superficie terrestre unos 12 Km en promedio, siendo su espesor máximo en el ecuador con 19 Km y su espesor mínimo en los polos con 9 Km solamente. La troposfera concentra

el 80% de la masa atmosférica y es donde se desarrollan todos los fenómenos meteorológicos, y por ende es; el lugar en el cual se centra el estudio del presente trabajo.

Existen muchas definiciones de lo que constituye la contaminación del aire, para algunos supone el aumento o en algunos casos, la disminución de ciertos componentes de la atmósfera, que no se habría producido sin la actividad humana. Otros postulan que, dado que la atmósfera de nuestro planeta ha sufrido profundos cambios a lo largo de su vida debido a erupciones volcánicas, incendios forestales y tormentas de arena, las cuales van provocando alteraciones locales y de escala global, cambiando la composición de la atmósfera; una definición de esta índole es de utilidad limitada (2).

Existen otras definiciones de contaminación atmosférica mas útiles, tales como “la presencia de sustancias en la atmósfera que resultan de la actividad del hombre o de procesos naturales y que producen efectos negativos en el hombre y en el medio ambiente” (2).

Una forma mas completa de la definición anterior corresponde a “la presencia en la atmósfera de sustancias o energías en tales cantidades y de tal duración que son capaces de causar daño al hombre, a las plantas o a la vida animal, de dañar los objetos o estructuras fabricadas por el hombre, de provocar cambios de temperatura y clima, dificultades para el cómodo disfrute de la vida, de los bienes o de otras actividades humanas” (2).

La anterior definición se usará a lo largo del presente trabajo para referirse a la contaminación atmosférica, no obstante esta definición da como resultado un escenario cambiante en el tiempo, pues la definición de contaminante depende directamente de los conocimientos científicos de la época y debido a esto la cantidad de sustancias consideradas contaminantes del aire ha ido aumentando a lo largo de los años.

1.1 Principales tipos de contaminantes atmosféricos

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos categorías: los primarios y los secundarios. Los **contaminantes primarios** son emitidos de forma directa a la atmósfera y entre los más importantes están el material particulado (en los distintos tamaños aerodinámicos que son estudiados, desde MP2.5 hasta las Depositiones Totales, Secas y Húmedas), compuestos halogenados (HCL, HF) y algunos gases como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de carbono (CO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) y bifenilos policlorados (PCB's). Las fuentes que los generan varían de una comunidad a otra, pero en líneas generales las mas importantes en cuanto al MP y a los SO_x corresponden a incineradoras, plantas generadoras de energía eléctrica e industrias, en tanto que los vehículos motorizados son responsables mayoritariamente de los CO_x, NO_x y COV's.

Bajo condiciones apropiadas los contaminantes primarios participan en reacciones químicas en la atmósfera, las que dan como resultado los denominados **contaminantes secundarios**. Algunas de las principales reacciones necesarias para su formación, requieren luz solar para que ocurran, por lo que se les denominan reacciones fotoquímicas. Contaminantes secundarios importantes son el ozono, los nitratos, los sulfatos, etc.

Debido a las innumerables fuentes que contribuyen a las emisiones, en los centros urbanos, los contaminantes presentan una sinergia importante, es decir; actúan con una inconveniente suma de sus efectos, donde la suma resulta mayor que los efectos individuales. Como consecuencia de esta mezcla, los efectos particulares de cada fuente emisora son muy difíciles de identificar.

Para designar en forma general la contaminación del aire se utiliza el termino “**smog**”, que corresponde a la contracción de los términos ingleses “smoke” y “fog”, es decir, humo y neblina.

En la actualidad se identifican varios tipos de smog, uno de ellos deriva su composición de elevadas concentraciones de oxido de azufre provenientes de la quema de combustibles que poseen azufre en alguna de sus formas químicas, a este smog se le llama “smog reductor o sulfuroso”. Otro tipo importante es aquel denominado “smog fotoquímico” y se caracteriza por la presencia de óxidos de

nitrógeno e hidrocarburos, que por acción de la luz solar generan elevadas concentraciones de ozono.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente es importante indicar que afortunadamente no todos los contaminantes que entran a la atmósfera reaccionan en ella y mucho más importante, una parte significativa de estos no permanecen en ella de forma indefinida debido a los procesos de auto depuración.

A pesar de que estos mecanismos de autolimpieza aun no se conocen de manera satisfactoria, se sabe, gracias a diversos estudios, que en ellos participan de manera importante las reacciones químicas, las precipitaciones, la sedimentación gravitacional y la absorción por parte de la biomasa vegetal.

A continuación se mencionan algunos de los contaminantes mas relevantes que se encuentran en la atmósfera:

1.1.1 Material Particulado (MP):

El aire puede contener en suspensión muchas clases de partículas de origen natural o producidas por la actividad humana. Este material particulado proviene de la subdivisión de materiales sólidos o de la suspensión de pequeñas gotas de líquidos y adopta distintas formas y tamaños. En lo referente al origen de las partículas que constituyen los principales contaminantes de áreas urbanas, se puede decir que en general, en las grandes metrópolis un 50 % de estas partículas provienen de industrias, tanto por procesos de producción como de manejo y transporte de sustancias sólidas, un 22 % proviene de la generación de la electricidad, un 13 % del funcionamiento de calderas industriales, un 10 % de la incineración de residuos sólidos y entre un 3 % y un 5 %, de los vehículos de motor. A esto deben incluirse las partículas producidas por los océanos, las cenizas volcánicas, la erosión eólica de rocas, los desechos de incendios forestales, el polen y las semillas de plantas. (3)

El material particulado se diferencia en función de su tamaño en:

Partículas gruesas : partículas de más de 10 μm (micrómetros) de diámetro que constituyen las partículas *sedimentables*.

Partículas finas : partículas de menos de 10 μm de diámetro aerodinámico.

Las partículas de más de 10 μm de diámetro son resultado de acciones físicas como la erosión y tienden a sedimentarse cerca de su fuente de emisión. Las partículas con un diámetro aerodinámico de 10 μm o menos, conocidas como *partículas inhalables en suspensión o PM10*, se mantienen en la atmósfera durante períodos más largos debido a sus bajas velocidades de sedimentación. El material particulado con un diámetro aerodinámico de 2,5 μm a 10 μm o menos recibe el nombre de *partículas finas (PM2,5)*. Las PM2,5 pueden formarse en la atmósfera como aerosoles debido a reacciones químicas entre gases tales como el SO_2 , NO_x y compuestos orgánicos volátiles. Los sulfatos, comúnmente generados por la conversión de emisiones de azufre, constituyen la fracción más grande, en masa, de las PM2,5. Estas también pueden formarse como resultados de la solidificación de sales de metales volátiles en forma de cristales tras el enfriamiento de los gases calientes del escape de los vehículos en el aire. Las PM2,5 pueden permanecer suspendidas en el aire y recorrer grandes distancias.(4)

Las partículas de más de 10 μm de diámetro, inhaladas por la nariz, se depositan en la sección extra-torácica de las vías respiratorias, en tanto que las fracciones de 2,5 μm a 10 μm se depositan cerca de las vías aéreas finas. Las MP2,5 preocupan más porque pueden evadir el sistema de defensa del aparato respiratorio humano y llegar al tejido pulmonar, donde pueden permanecer alojadas durante años. En el caso de las partículas solubles, pueden ser absorbidas en el torrente sanguíneo. La deposición del material particulado se incrementa cuando se respira por la boca. El incremento de la mortalidad y de las enfermedades respiratorias está vinculado a la contaminación

atmosférica de MP_{2,5} y sulfatos a niveles que se encuentran comúnmente en ciudades de Estados Unidos ($4\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de los sulfatos y $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de MP-_{2,5}). En estudios recientes efectuados en Estados Unidos se encontró que la exposición a largo plazo a $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ adicionales de partículas está vinculada a un incremento del 5 % al 10 % en la mortalidad general y un incremento más alto en la mortalidad por causas cardiorrespiratorias. Ostro (1989) encontró una asociación entre el incremento de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la media anual de concentraciones de MP_{2,5} y un incremento del 3,2 % de la incidencia de enfermedades respiratorias agudas en adultos de 18 a 65 años de edad. Los principales efectos de los sulfatos en aerosol incluyen bronquitis crónica y asma. De acuerdo a diversos estudios realizados en grandes metrópolis, la mortalidad aumento en un 1.15% debido a el incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de MP₁₀. Para otro estudio con las mismas concentraciones de MP₁₀, la gama correspondiente al número de decesos estaría comprendida entre 45 y 91 personas por millón. Por otra parte, Ostro (1994) estimó que una variación de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de MP₁₀ en el ambiente provocaría entre 8 y 24 incidentes de bronquitis crónica en una población de 1.000 niños menores de 17 años de edad y provocaría de 3 a 9 incidentes de bronquitis crónica en 10.000 personas de más de 25 años. (4)

En diferentes zonas de la región de Río de Janeiro, se observó una asociación estadísticamente significativa entre las concentraciones anuales medias de partículas en el aire y la mortalidad infantil debido a neumonía. Como resultado de las medidas de control de la contaminación industrial, se encontró que una reducción en el promedio aritmético anual de las concentraciones de MP₁₀ en el ambiente de $186\mu\text{g}/\text{m}^3$ a $151\mu\text{g}/\text{m}^3$ produjo una reducción en las consultas en salas de urgencias por problemas respiratorios del 31 % al 23 %, y las consultas de urgencias vinculadas a bronquitis y asma del 15 % al 11%. En otros estudios, se observaron asociaciones entre la presencia de MP y el cáncer de pulmón en animales (1992). Basándose en una revisión de la investigación previa, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) llegó a la conclusión de que las partículas liberadas por los motores diesel tenían posibles efectos carcinógenos en los seres humanos. En estudios de confirmación se señala que el hollín de las emisiones de los motores diesel era el principal responsable del cáncer en ratas y, a altas concentraciones de MP, los compuestos orgánicos absorbidos en el hollín desempeñarían una función menor en el desarrollo de tumores. Por eso además de controlar los compuestos orgánicos presentes en la superficie de las partículas de hollín se debería también controlar el hollín mismo. (4)

Se sabe que los árboles de las ciudades y aquellos que crecen vecinos a carreteras de intenso tránsito tienen los estomas de sus hojas obstruidas por el polvo, lo que dificulta los intercambios gaseosos. Además, algunas partículas producen deterioro en los materiales simplemente al depositarse sobre ellos y otros tipos de alteraciones son producidos por los humos negros compuestos por pequeñas partículas porosas de carbono. Estas partículas se adhieren a las superficies produciendo un ennegrecimiento en construcciones y ensucian las fibras textiles y los plásticos.

1.1.2 Otros contaminantes atmosféricos :

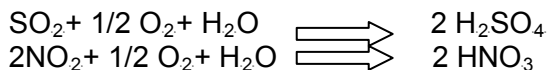
Existen diversos tipos de contaminantes presentes en la atmósfera, entre los mas importantes se encuentran los compuestos derivados del azufre (SO_2 , SO_3 , SH_2 , SO_4H_2 y Sulfatos), los compuestos orgánicos (Benceno, Tolueno, Xileno, HAP's y PCB's, entre otros), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de carbono (CO_x), los compuestos halogenados (HCL, HF y derivados como los CFC) y los metales pesados (Cd, Hg, Pb).

1.2 Reacciones importantes:

Algunas reacciones químicas que involucran compuestos presentes en la atmósfera generan eventos importantes:

1.2.1 Lluvia Ácida :

Se denomina así a la precipitación de disoluciones acuosas de ácidos fuertes. Aunque puede originarse directamente por la emisión de ácidos a la atmósfera, normalmente se produce a través de la formación de ácidos a partir de otros gases emitidos a la atmósfera, normalmente SO_2 y NO_2 :



De estos dos ácidos generalmente mas formados por las reacciones, es predominante el sulfúrico. Aunque las fuentes de emisión de estos contaminantes están localizadas principalmente en zonas de utilización de combustibles fósiles, la lluvia ácida aparece también en zonas lejanas a las fuentes de emisión, esto es debido a que las reacciones de oxidación de los gases que originan la lluvia ácida son lentas y durante el tiempo de reacción estos pueden ser transportados a cientos de kilómetros de su fuente de emisión.

Lo anterior es principalmente conflictivo cuando estos gases son transportados desde zonas industriales hasta zonas urbanas e incluso hasta zonas de cultivos agrícolas. Para el caso de Santiago, ciudad que presenta altas concentraciones de SO_2 y NO_2 (precursores de lluvia ácida), los resultados de los monitoreos atmosféricos realizados en este trabajo no muestran la acidez esperada, tanto en las deposiciones secas como en las húmedas, es decir, en aquel material que se deposita por efecto de la gravedad, como aquel que es lavado por acción de los hidrometeoros. Esto se debería principalmente a la presencia de elementos que están actuando como tampones en la atmósfera de la ciudad.

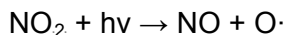
Los mayores efectos de la lluvia ácida son: toxicidad directa o indirecta sobre plantas y cultivos, pérdida de la calidad del suelo, efectos respiratorios sobre el hombre, acidificación de las aguas y corrosión de estructuras.

1.2.2 Smog Fotoquímico:

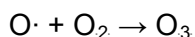
Se define como smog fotoquímico el conjunto de productos iniciales, radicales y productos estables finales que resultan de la irradiación de luz solar sobre la mezcla de hidrocarburos y de óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

Dado que en este fenómeno tienen lugar gran cantidad de reacciones químicas, a la hora de estudiar la evolución del fenómeno, se realizan estudios en cámaras de simulación donde se introducen los productos reaccionantes y se irradian con luz ultravioleta, siguiendo su evolución a lo largo del tiempo.

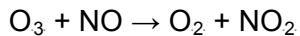
Durante el día, por acción de la luz solar ($h\nu$), el dióxido de nitrógeno se disocia en monóxido de nitrógeno y radicales oxígeno:



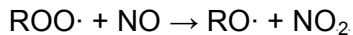
El $\text{O}\cdot$ se combina con oxígeno molecular generando ozono:



En ausencia de COVs este ozono oxida al monóxido de nitrógeno de la etapa anterior:

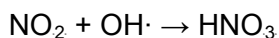


Pero en presencia de COVs, éstos se transforman en radicales peroxi que a su vez oxidan al NO:

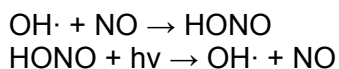


De esta forma el NO no está disponible para reaccionar con el ozono y éste se acumula en la atmósfera. Muchos de los radicales RO· generados terminan formando aldehídos. Éstos, cuando la concentración de NO es baja (conforme avanza el día), pueden reaccionar con NO₂ dando lugar a compuestos del tipo RCOONO₂ (cuando R es un metilo se denomina peróxido de acetonitrilo, PAN, un compuesto tóxico).

La formación del HNO₃ se produce al final del día por reacción del NO₂ con radicales oxhidrilo:



Durante la noche los radicales OH· pueden reaccionar con el NO dando ácido nitroso, que se disocia en presencia de luz, pero es estable durante la noche.



Durante la noche las reacciones de *smog* fotoquímico se ven muy reducidas al necesitar la luz para funcionar, aunque éstas pueden continuar a través de otros compuestos.

El smog fotoquímico es uno de los mayores problemas de contaminación atmosférica a nivel local o regional, caracterizado por la presencia de vapores irritantes que dificultan la visibilidad y asociado a emisiones urbanas y determinadas condiciones atmosféricas, generalmente aquellas poco favorables para la ventilación.

1.3 Otros tipos de contaminantes del aire

Además de los contaminantes antes mencionados, existen otros de naturaleza distinta que significan una pérdida de calidad del aire o un riesgo para la salud de las personas o para el funcionamiento de los ecosistemas, pero que no serán tratados en este trabajo. A saber: *radiaciones ionizantes* (conjunto de partículas que tienen la propiedad de alterar los átomos de algunas sustancias que atraviesan, convirtiéndolos en iones cargados eléctricamente), *el ruido* (ondas mecánicas que generan ciertos grados de presión según la intensidad con las que se emitan, pudiendo causar graves alteraciones auditivas y neurológicas luego de largos periodos de exposición) y los olores (estímulos que son percibidos por el sentido del olfato, pueden considerarse como una modalidad de contaminación si producen incomodidades físicas y molestias a la población). (1)

1.4 Orígenes y distribución de los contaminantes atmosféricos

1.4.1 Orígenes de los contaminantes

Como se ha dicho anteriormente, las emisiones de contaminantes a la atmósfera pueden tener dos orígenes: natural y antropogénico. Las primeras normalmente escapan al control humano y tienen procedencias muy diversas: el polen, el anhídrido carbónico generado por algunos fenómenos naturales, el polvo, los gases de erupciones volcánicas, la llegada de polvo desde los desiertos a través de corrientes de aire que lo trasladan hasta los centros urbanos, etc.

En la tabla 1.1 se puede observar que las fuentes naturales originan la proporción más elevada de contaminantes, en cifras absolutas, pero tienen la ventaja de aparecer normalmente en concentraciones bajas. (1)

Tabla 1.1 – Generación de contaminantes por causas naturales y antrópicas

Generación de contaminantes por causas naturales y antrópicas (% del total)				
Contaminantes	Fuentes Naturales	%	Fuentes Antrópicas	%
Compuestos de azufre	Descomposición de organismos, Volcanes Océanos	80	Obtención de energía Industria	20
Monóxido de carbono	Incendios forestales Océanos Bosques	90	Incendios forestales Tráfico Industrias Tratamiento residuos	10
Óxidos de nitrógeno	Procesos diversos	90	Obtención de energía Tráfico	10
Amoniaco	Descomposición Seres vivos	99	Industria	1
Hidrocarburos	Descomposición Seres vivos	96	Tráfico Industria petroquímica	4
Partículas	Sal de océanos Viento (polvo) Volcanes	94	Obtención de energía Tráfico	6

Puede observarse que las emisiones de origen antropogénico son ocasionadas por el tráfico, la industria y las concentraciones de población. En este sentido, aunque cuantitativamente son menores que las de origen natural, los efectos se multiplican por localizarse los efluentes en áreas reducidas, que a la vez son las que concentran mayor cantidad de población, y por la intensidad de las emisiones, que son generalmente, mucho mayores que las naturales.

Según la forma de emisión, las fuentes pueden clasificarse en dos grupos: puntuales y difusas. Las primeras consisten en un solo foco en un radio lo suficientemente amplio para no ser interferido por otros. Las características de aislamiento implican una facilidad mayor para la difusión, pero los efectos negativos para la población pueden verse potenciados por la intensidad de la salida, especialmente si las condiciones de dispersión no son buenas- por ejemplo, situadas en el fondo de un valle- o existe una elevada densidad demográfica en el entorno.

Las fuentes difusas corresponden a la coexistencia de múltiples focos en una misma área, lo que origina una extraordinaria complicación (para el monitoreo y la identificación) por la acción sinérgica y la gran diversidad de sustancias que suelen emitirse en estas situaciones.

En la tabla 1.2 se observan las fuentes antropogénicas más importantes en la generación de contaminantes. (1)

Tabla 1.2 – Contaminantes originados por fuentes antropogénicas

Contaminantes originados por fuentes antropogénicas							
Focos	MP	CO	Comp. azufre	Comp. nitrógeno	Comp. halogenados	Comp. orgánicos	Metales
Instalaciones de combustión	X	X	X	X		X	X
Eliminación de residuos sólidos	X	X				X	
Almacenamiento de productos petrolíferos						X	
Procesos químicos	X	X	X	X	X	X	
Industrias agroalimentarias	X					X	
Metalurgia	X	X	X	X	X	X	X
Extracción minera	X					X	
Refinerías	X	X	X		X		
Trafico	X	X	X	X	X	X	
Calefacciones	X	X	X	X	X	X	

Cada una de estas actividades desempeña un papel distinto, según sus características, en el conjunto del problema. La contaminación del aire frecuentemente es una suma de emisiones de diversas procedencias, que en determinadas áreas se acumulan hasta llegar a niveles significativos. Aunque todas las actividades humanas son potencialmente contaminantes, algunas ejercen una acción más intensa que otras, por la naturaleza de los productos que vierten a la atmósfera, por las concentraciones de estos contaminantes o por la reducida dimensión espacial en que tiene lugar. En los países industrializados, el volumen más considerable de contaminantes proviene de los vehículos con motores de combustión interna. En cuanto al resto de las fuentes, pueden experimentar variaciones de acuerdo con la especificidad de cada lugar, el tipo de industrias existentes, los tipos de combustibles utilizados, la antigüedad de las instalaciones, etc.(1)

El impacto ambiental que los productos resultantes de las combustiones pueden ocasionar hace necesario la aplicación de normativas que condicionarán el desarrollo e implementación de controles tecnológicos de un costo añadido significativo en todo el proceso de combustión. Durante la fase de combustión y post-combustión las principales emisiones que se liberan del proceso son: gases y vapores en elevada concentración, material particulado, compuestos orgánicos y elementos traza.

El material particulado de las emisiones está formado fundamentalmente por minerales quemados parcialmente y elementos traza. Una fracción de esas partículas será retenida parcialmente en los sistemas de control de emisiones antes de su salida desde la chimenea. Aunque los sistemas convencionales de filtración de partículas tienen alta eficacia y tratan partículas en un amplio rango de tamaños, sin embargo, no son capaces de eliminar de forma significativa las partículas más finas (submicrométricas).

La concentración de estas emisiones en la atmósfera va a depender de la eficacia de las tecnologías de control disponibles en cada proceso que, actuando como barreras tecnológicas, hacen posible la retención del material particulado mediante los más diversos sistemas: ciclones, filtro de mangas, precipitadores electrostáticos; en limpieza de tipo físico, etc. Y tratamientos de limpieza de gases, de tipo químico: sistemas de lavado, o uso de absorbentes y catalizadores.

Los combustibles líquidos utilizados en generación de energía producen, en su combustión, emisiones de material particulado, mayoritariamente hollín, en el rango micrométrico y partículas

submicrométricas con diámetros en torno a 0.14 micrómetros, que contienen hidrocarburos y metales pesados, entre otros: níquel (Ni) y vanadio (V).

Las emisiones de otros combustibles sólidos tales como los residuos sólidos urbanos, utilizados como recurso energético en procesos de incineración o co-combustión, generan junto a la materia particulada, elementos traza especialmente tóxicos como el mercurio (Hg) y compuestos orgánicos persistentes, con riesgo para la salud, como las dioxinas.

Aunque las emisiones de la combustión son identificadas vulgarmente como humos o gases en general, lo correcto es considerar estas emisiones como aerosoles de combustión en donde la fase sólida es una gran responsable de los efectos contaminantes de las emisiones, entre otras razones: por su naturaleza mineral, por su presencia en altas concentraciones numéricas y su distribución de tamaños con predominio del rango submicrométrico. Además, las partículas presentan una gran superficie, que les hace actuar como soporte de adsorción, favoreciendo así la asociación con elementos traza pesados y compuestos orgánicos contaminantes.

1.4.2 Distribución de los contaminantes

1.4.2.1 Factores Climáticos

La dinámica de la distribución de contaminantes en la atmósfera depende fundamentalmente de la circulación general y consecuentemente de la presencia de masas de aire de caracteres determinados, así como los centros de acción que dan origen a los distintos tipos de tiempos. Las características intrínsecas del aire en estas situaciones, tales como gradientes de presión o de temperatura, índice de humedad, viento y otras, se traducen en unas determinadas condiciones de estabilidad atmosférica y en consecuencia en las condiciones en que se realiza la difusión. (1)

a) Tipos de condiciones sinápticas

La variedad de los tipos de tiempo que pueden definirse es muy grande, puesto que existe una enorme diversidad por lo que respecta a las situaciones que los definen, hasta el punto de que cada una de ellas es única e irrepetible; en consecuencia, resulta imposible proceder a una clasificación en el sentido riguroso del término. Sin embargo, los tipos de tiempo que se producen pueden sintetizarse en algunos grupos, que presentan analogías o cuya presencia es más frecuente. En síntesis, los tipos de tiempo pueden pertenecer a dos grupos: anticiclónicos, ciclónicos o situaciones intermedias.

I. Situaciones anticiclónicas

Son las más negativas por lo que respecta a la difusión y tienen lugar cuando existe un anticiclón centrado, con altas presiones en los niveles superiores de la troposfera. En estas ocasiones tiene lugar una estratificación de la atmósfera que, asociada a la ausencia de vientos en superficie, dificulta o impide totalmente el movimiento vertical del aire. Los niveles de inmisión se incrementan significativamente y en lugares de emisiones intensas pueden llegar a ser críticos.

II. Situaciones ciclónicas

De forma inversa, cuando existe una baja centrada, es decir, cuando las bajas presiones se encuentran tanto en superficie como en altura, se produce una inestabilidad máxima, por lo que tienen lugar movimientos ascensionales de aire y, en

consecuencia, las condiciones de difusión son óptimas. En estas situaciones se producen frecuentemente lluvias, por lo que tiene lugar el efecto añadido de lavado de la atmósfera.

III. Situaciones intermedias

Las restantes configuraciones sinópticas van asociadas a vientos de distinta intensidad, con lo que la gama de situaciones es muy amplia y las condiciones de difusión, evidentemente, varían según las características definitorias de cada caso.

b) Vientos

Son un elemento climático decisivo en el proceso de dispersión de contaminantes. Por lo que respecta a los movimientos horizontales de masas de aire generados por la existencia de un gradiente de presión, las condiciones de difusión dependen de los parámetros que los definen:

- Dirección: indica el camino que recorrerán los contaminantes
- Velocidad: señala la capacidad de dispersión, existiendo una relación inversa entre este parámetro y la concentración.
- Turbulencia: variaciones de la dirección y la velocidad originada por el roce con la superficie de la tierra e influido por las irregularidades que presenta.

c) Estructura vertical de la atmósfera

La distribución de las temperaturas y los vientos en función de la altura interviene decisivamente en la capacidad dispersante de la atmósfera en un espacio determinado. Puede afirmarse que la difusión vertical de los elementos contaminantes depende en gran medida de la convección, que esta relacionada con la estratificación de la atmósfera.

La estratificación puede ser estable, en cuyo caso el aire se dispone en capas según gradiente térmico positivo, es decir, la temperatura aumenta con la altura en vez de disminuir. Normalmente, esta situación se asocia a un enfriamiento nocturno del aire que está en contacto con la superficie del suelo, con lo que la subsidencia que provoca la presencia de altas presiones superiores contribuye a incrementar el gradiente y tiene lugar el fenómeno de la inversión. En estas condiciones, existe ausencia de corrientes verticales y, como coincide con las situaciones anticiclónicas, en superficie hay calmas, por lo que se producen incrementos paulatinos de las concentraciones de contaminantes.

La estratificación inestable tiene lugar en situaciones ciclónicas; se producen fuertes corrientes verticales, con lo que las condiciones de difusión son óptimas.

1.4.2.2 Factores Geográficos

En la dispersión de contaminantes intervienen de forma decisiva los siguientes factores del medio físico: topografía del territorio, presencia de masas de vegetación y existencia de núcleos urbanos en el radio de acción de los focos emisores.

El relieve explica en gran medida el comportamiento de algunos elementos climáticos que intervienen directamente en la difusión de los contaminantes. En una topografía llana los movimientos de los contaminantes siguen trayectorias uniformes y los procesos de dilución se realizan según leyes relativamente fáciles de aplicar, los modelos más utilizados se basan en

esta hipótesis. Pero las irregularidades del terreno complican ampliamente el diagnóstico: una pequeña masa de aire sufre variaciones distintas en los parámetros que la definen si se encuentra en su trayectoria un valle fluvial, un espacio abierto hacia el mar, una ladera, etc.

En los litorales interviene en la difusión el régimen de brisas, que tiene una mayor frecuencia en los meses veraniegos. Durante el día, la brisa marina desplaza hacia el interior la masa de contaminantes que se originan en las inmediaciones de la costa. La situación se invierte durante la noche, con lo que si el aire presenta una carga contaminante elevada, se desplaza hacia el mar; pero no se aleja excesivamente de la costa, con lo que a la mañana siguiente al iniciarse la brisa marítima tiene lugar el regreso de esta masa, produciéndose episodios de contaminación de retorno.

La vegetación ejerce una acción positiva respecto de los niveles de inmisión, al reducir la velocidad del viento, favorece la deposición de partículas que quedan retenidas en su superficie hasta que son lavadas por las lluvias. Por otra parte, las plantas absorben anhídrido carbónico en la fotosíntesis, por lo que constituyen uno de los elementos de regulación de este gas en la masa atmosférica. Asimismo, tienen capacidad para absorber y metabolizar otros gases tóxicos, entre los que figuran el monóxido de carbono, el ozono y el dióxido de azufre.

La repercusión de los núcleos urbanos sobre la difusión de contaminantes es el resultado del calor que se genera en su interior y de la propia morfología, que altera el comportamiento de la circulación del aire, especialmente los vientos, que en estos espacios modifican extraordinariamente su dirección y velocidad. Además, la existencia de la isla de calor urbana origina la formación de pequeñas células convectivas que atraen aire de la periferia, con lo que se propicia la formación de las "cúpulas de inversión", claramente visibles en situaciones anticiclónicas.(1)

1.5 El concepto de "aerosol atmosférico"

Los aerosoles son partículas en estado líquido o sólido en suspensión sobre una fase gaseosa, cuya influencia resulta fundamental en el clima del planeta.

Por su origen, los aerosoles atmosféricos se clasifican en *naturales*, compuestos principalmente por cenizas volcánicas, esporas, polen, sal marina, polvo natural, etc, y *antropogénicos*, derivados de la actividad humana, tales como humo de chimeneas, partículas minerales surgidas de procesos industriales, etc. Las partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos también entran en este apartado.

Su razón de mezcla en el suelo es variable, desde unos pocos mg/m^3 de aire limpio a los $1000 \text{ mg}/\text{m}^3$ que pueden alcanzarse en una atmósfera muy contaminada. Su presencia se debe a causas diversas: combustiones por procesos industriales, calefacciones, etc, productos generados en la misma atmósfera por reacciones químicas entre sustancias como sulfatos, nitratos, productos gaseosos, movimientos de masas de aire que arrastran consigo partículas marinas o polvo desértico, etc.

Las partículas así generadas son eliminadas de la atmósfera mediante acción gravitatoria, coagulación, condensación y su posterior precipitación, etc. Todo ello implica un *tiempo de vida* de estas partículas en la atmósfera que puede variar de minutos a semanas en la tropósfera, y llegar a los años si tales partículas alcanzan la estratósfera (común tras las erupciones volcánicas, por ejemplo), ya que allí los procesos de eliminación tales como condensación o precipitación no se producen.

Se pueden distinguir, por su tamaño, tres modos en la distribución de tamaños atendiendo a la densidad de partículas (su número en un volumen determinado):

1. el denominado *modo de condensación* o *núcleos de Aitken*, cuyas dimensiones oscilan desde unos nm hasta 0.1 μm . Su contribución a la masa total es despreciable debido a su pequeño tamaño, siendo su eliminación de la atmósfera muy eficiente y debida a diversos mecanismos que describimos más adelante.
2. el *modo* o *rango de acumulación*, que ocupa entre 0.1 y 1 - 2 μm , partículas que forman una parte sustancial de la masa, y son eliminadas de la atmósfera menos eficazmente.
3. las partículas gruesas, que van desde 1 a 100 μm formadas por procesos mecánicos y cuyo origen es tanto natural (polvo arrastrado por el viento, emisiones volcánicas, etc.) como antropogénico. Estas son las partículas que más contribuyen a la masa total de aerosoles.

Todo lo anterior se reduce a dos modos: aerosoles finos y gruesos, si se contabilizan los dos primeros conjuntamente, o bien si se hace una clasificación atendiendo a la masa de las partículas.

Referente a su eliminación de la atmósfera, los núcleos de Aitken se condensan en partículas de mayor tamaño para posteriormente sufrir una coalescencia en cadenas de agregados, siendo finalmente eliminados por precipitación en el agua de lluvia. De hecho, funcionan como núcleos de condensación, constituyendo un mecanismo muy importante en la formación de nubosidad. Las partículas del modo de acumulación forman gotas que se eliminan de modo parecido aunque menos eficazmente. Las partículas gruesas se eliminan debido a su masa, al actuar la gravedad, esto es, por sedimentación o deposición. (9)

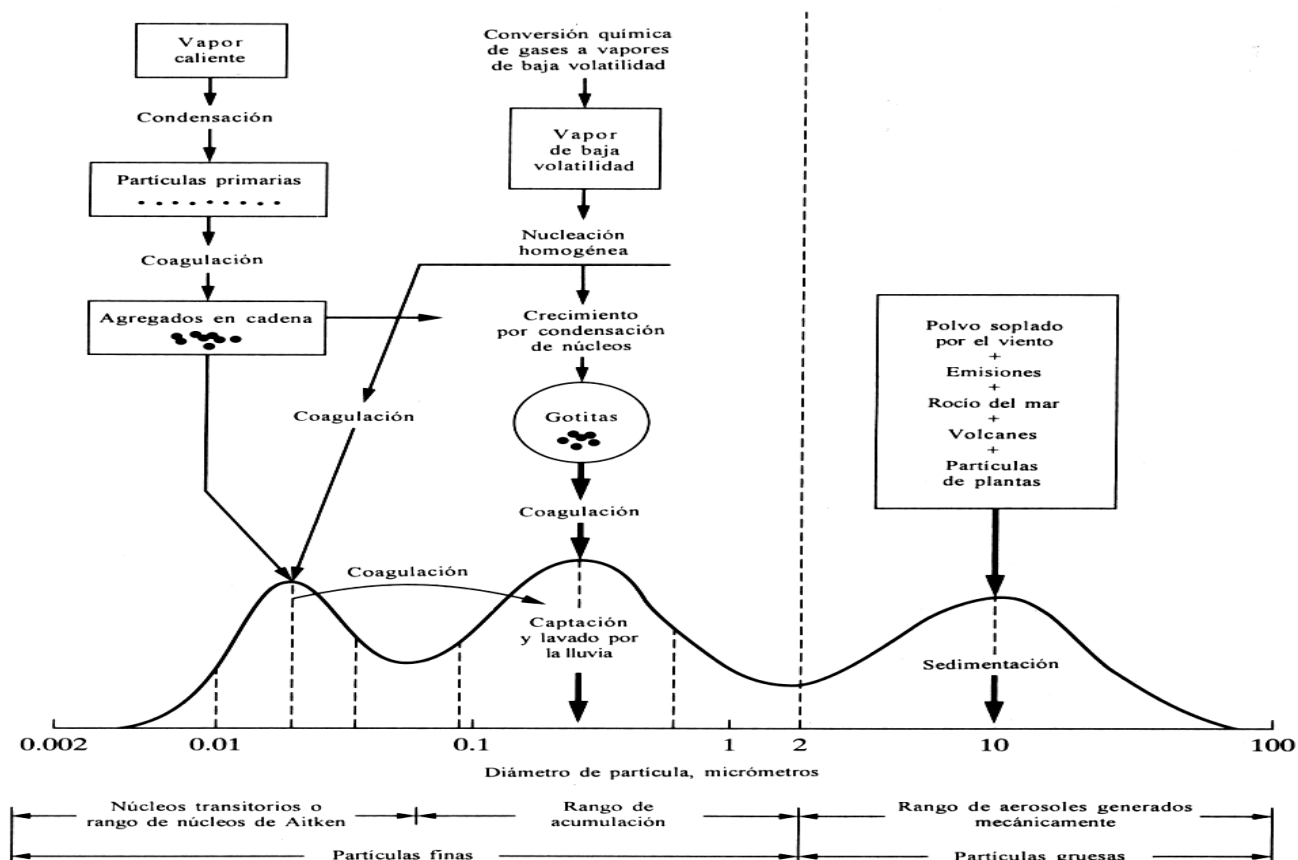
1.6 Deposición total, seca y húmeda

Como ya sabemos, los contaminantes son incorporados a la atmósfera de manera gaseosa, particulada o como aerosol, y pueden provenir tanto de emisiones naturales como antropogénicas. El tiempo de permanencia de estas sustancias en la atmósfera a nivel de trazas queda determinado principalmente por la efectividad de los procesos de eliminación y transporte que tienen lugar en ella.

Dos importantes fenómenos que contribuyen a la depuración de la atmósfera son la *deposición seca* y la *deposición húmeda*, también llamados *deposición total* a la suma de ambos. Aunque estos procesos contribuyen a la autolimpieza de la atmósfera, los contaminantes más persistentes se acumulan en otros compartimientos que actúan como receptores, tales como el suelo, los cuerpos de agua y la biomasa tanto vegetal como animal, donde debido a la sinergia de los contaminantes tienen grandes posibilidades de producir efectos altamente perjudiciales para los seres vivos. Por ejemplo, las deposiciones al producir un arrastre de partículas como los SO_x y NO_x , actúan directamente sobre el fenómeno de "lluvia ácida"... Por lo tanto, la importancia de realizar estudios sobre las deposiciones radica en que estas son un reflejo de las condiciones de contaminación de la atmósfera, por lo que un análisis de estas, es un análisis de la calidad del aire.

Es importante distinguir entre los contaminantes atmosféricos, aquellos que se encuentran en estado gaseoso de aquellos que forman parte de la deposición total, donde se incluyen el material particulado sedimentable y los hidrometeoros, es decir, la lluvia, el granizo, la nieve, la niebla y el rocío. Dentro de esta última, es importante distinguir una fase líquida (compuestos químicos en solución) y una fase sólida (compuestos químicos adsorbidos y absorbidos sobre el material particulado que posteriormente es arrastrado por las precipitaciones). En la figura 1.1 se observa un esquema de la distribución de las partículas, según su tamaño aerodinámico.

Fig. 1.1 Esquema de distribución de partículas según su tamaño aerodinámico.



Debido a que los contaminantes, no sólo pueden encontrarse en la fase particulada sino también en solución, formando parte de los hidrometeoros, se complica la toma de muestra y la variedad de procedimientos de laboratorio que se deben realizar para caracterizar una muestra ambiental de esta naturaleza.

a) Deposición seca: (DS)

Es el material particulado (MP) que está por sobre los 10 μm de diámetro aerodinámico (DA), recibe el nombre de MP sedimentable pues debido a su tamaño presenta un menor tiempo de permanencia en la atmósfera que el denominado MP en suspensión (< 10 μm).

Este tipo de deposición esta formada por partículas de origen primario, tanto naturales como antropogénicas, las cuales no penetran al sistema respiratorio como lo hacen aquellas de DA < 2,5 μm; pues son eliminadas mediante la sedimentación, donde la velocidad de eliminación depende principalmente del tamaño de partícula y de la intensidad de la deposición húmeda.

Lo anterior no es razón para considerarlas no contaminantes, ya que por sus características son un indicador evidente de contaminación atmosférica.

b) Deposición húmeda: (DH)

Es uno de los dos procesos (junto a la DS) que gobiernan la transferencia de sustancias químicas benéficas y tóxicas desde la atmósfera hacia la superficie.(10) Consiste en la formación de distintos tipos de hidrometeoros en la atmósfera mediante procesos complejos que dependen de una serie de condiciones físicas, químicas y meteorológicas. Dependiendo del estado físico (sólido, líquido, aerosol) y del tamaño de las gotas o cristales estos se pueden clasificar en: lluvia, nieve, granizo, rocío o niebla.

Si el diámetro de las gotas es menor que 0,5 mm, entonces hablamos de rocío y si es mayor que este valor estamos en presencia de lluvia, cuyas gotas presentan variedad de tamaños dependiendo de su proceso de formación, pudiendo de esta forma ser nieve o granizo.

Las deposiciones húmedas en general son un excelente medio para eliminar/incorporar y transportar/distribuir sustancias químicas en el medio ambiente. La lluvia y la nieve son uno de los principales mecanismos de autolimpieza de la atmósfera, la niebla y los aerosoles son, en cambio, mecanismos más complejos que pueden eliminar o incorporar sustancias químicas, así como transportarlas o distribuirlas lejos de la fuente de emisión.

c) Deposición total:

Es el fenómeno de decantación de las partículas que se encuentran en suspensión momentánea en la atmósfera. Corresponde a la suma de los eventos de Deposición Seca y Deposición Húmeda, es decir, la suma entre el material particulado con diámetro aerodinámico mayor a $10\mu\text{m}$ ($DA > 10\mu\text{m}$) y los hidrometeoros que correspondan según las condiciones meteorológicas (lluvia, granizo, nieve, etc.)

1.7 Métodos de monitoreo

Dos son las principales metodologías para el monitoreo de contaminantes atmosféricos: los métodos **Pasivos** y los **Activos**.

Los métodos pasivos corresponden a aquellos que permiten recolectar una muestra atmosférica líquida, sólida o gaseosa, sin la intervención de algún sistema mecánico, eléctrico o externo a las características propias de la muestra a recolectar. Por el contrario, los métodos activos (MA) son sistemas que permiten recolectar una muestra atmosférica gracias a la intervención de algún sistema mecánico, eléctrico o externo a las características propias de la muestra a recolectar.

Los métodos activos tienen tiempos de recolección más cortos (horas, minutos) tendientes a dar información en tiempo real, en cambio, los métodos pasivos tienen tiempos de recolección más largos (días, meses) tendientes a dar información sobre el efecto a largo plazo de los contaminantes en estudio. Ambos métodos tienen propósitos distintos, pero a la vez complementarios, pudiéndose usar en forma simultánea o separada, para adquirir información más detallada sobre el tipo de muestras y la calidad del aire.

1.8 Sobre la toma de muestras

Cuando se quiere determinar la calidad del aire se debe tomar necesariamente una muestra que cumpla con ciertos requisitos como que sea representativa del área que se desea muestrear, ser suficiente en cantidad y/o número y debe ser tomada una cantidad de veces suficiente como para que permita la realización de varios análisis fisicoquímicos. Otro requisito, y quizás el más importante es que se debe proteger la muestra durante el período de muestreo y almacenamiento

con el fin de que esta no sufra modificaciones ni se contamine con los materiales del sistema de recolección. Además, debe buscarse algún método objetivo, el cual permita la identificación y selección de muestras con el fin de optimizar tanto los recursos humanos como económicos y, evaluar tempranamente situaciones de riesgo.

Para el análisis de los contaminantes gaseosos más importantes (dióxido de azufre, monóxido y dióxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, etc.) se dispone actualmente de métodos analíticos de medición discreta y en continuo, la mayoría bien estandarizados y validados, incorporados a instrumentos portátiles capaces de medir *in situ* cada uno de estos contaminantes con la confiabilidad apropiada. Sin embargo, el análisis de las deposiciones totales es una cuestión de mayor dificultad, dada la complejidad físico química de esta matriz, lo cual obligó a poner en práctica esfuerzos destinados a realizar una recolección específica para cada tipo de muestras, dependiendo del diámetro aerodinámico del material particulado, del tipo de hidrometeoro (diseño del colector), de las condiciones de campo en que se tomarán las muestras, las condiciones meteorológicas, sólo por nombrar algunas, pero por sobre todo, dependiendo si el interés está centrado en realizar una especiación de compuestos químicos inorgánicos u orgánicos (material de construcción del colector), todo esto orientado a separar la fase sólida (MP) de la fase líquida (hidrometeoros), es decir, separar los compuestos solubles de los insolubles.

Se deben considerar además aspectos no menos importantes como el transporte al laboratorio, procesos de almacenamiento de muestras y contramuestras, concentración, pretratamientos y purificación de los extractos obtenidos, así como la determinación cualitativa y/o cuantitativa para cada tipo de contaminante.

Desde los años 70's un gran número de sistemas de muestreo han sido puestos en operación para asuntos regionales y multiregionales. Numerosos investigadores realizaron muestreos y análisis de las precipitaciones y sus constituyentes químicos en el contexto del problema de contaminación denominado: "lluvia ácida" y de procesos atmosféricos relacionados. Sin embargo, al examinar los resultados de aquellos esfuerzos, ha aumentado la preocupación acerca de la exactitud y precisión de la información reunida. Hay una amplia evidencia que demuestra que la inestabilidad de las muestras de precipitación esta sujeta a condiciones ambientales o de campo prolongadas.(10)

En la toma de muestra y análisis de los compuestos inorgánicos y orgánicos en muestras atmosféricas, existen procedimientos que presentan aún variados problemas, como las sobre- o subestimaciones de la concentración de los contaminantes en estudio, debido principalmente a: las pérdidas por adsorción sobre los distintos materiales de construcción de los colectores, pérdidas por evaporación o reacciones químicas sobre la muestra durante el período de recolección y errores en la identificación de los distintos compuestos químicos contaminantes, sólo por nombrar algunos.

En la actualidad los procedimientos de muestreo de precipitaciones permiten la recolección refrigerada o no de las deposiciones húmedas y secas de eventos individuales, fracciones dentro de otros eventos, análisis químicos continuos en campo e incluso muestreos de lluvias, nubes, nieblas y gotas individuales. De modo similar se han desarrollado procedimientos analíticos como la cromatografía iónica y la electroforesis capilar que permiten análisis rápidos y simultáneos de aniones y cationes desde muestras de MP hasta gotas individuales de deposición húmeda. En conjuntos estos avances nos permiten un mejor entendimiento de las reacciones de los elementos contaminantes que se encuentran en el ambiente. (10)

Podemos concluir que tomar una muestra atmosférica no es algo trivial, por lo tanto aparece como un problema muy importante de resolver, disponer de sistemas de recolección que nos aseguren una buena toma de muestras, específicamente para muestras como la deposición seca o húmeda, que además nos permitan estar seguros de la calidad de la muestra que estamos tomando y que estos sistemas sean lo más simples posibles, tratando de buscar un compromiso entre la validez de un colector, desde el punto de vista químico y su bajo costo tanto de fabricación como de operación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Efectos del MP en la salud y el medio ambiente

La contaminación del aire debido al MP y los esfuerzos por controlarlo no son un fenómeno reciente. Si bien no cabe duda de que existen ejemplos anteriores, una de las primeras ordenanzas de control de la contaminación data del siglo XIII, cuando el rey Eduardo I de Inglaterra trató de despejar los cielos llenos de “humo” de Londres, al prohibir el uso del “carbón marítimo” (llamado así porque se transportaba en barcos). Una de las primeras publicaciones de que se tiene conocimiento y que trata de la contaminación del aire, es un panfleto publicado en 1661 por orden real de Carlos II : “Fumifugium; o como disipar las inconveniencias del aire y el humo de Londres; junto con algunas soluciones propuestas con total humildad” escrito por John Evelyn, miembro fundador de la Royal Society.(11)

A partir del siglo XIX, especialmente a raíz de la Revolución Industrial, los problemas de contaminación se hacen más severos y se inicia la preocupación por el saneamiento ambiental, comienzan los primeros seguimientos y estudios al “polvo atmosférico”, con lo que también comienzan a conocerse los primeros efectos del MP como agente contaminante.

Numerosas situaciones catastróficas relacionadas con episodios de contaminación atmosférica han sucedido a lo largo de la historia. En general, éstas se derivaron de procesos industriales, especialmente relacionados a las fundiciones y refinerías de metales, a la generación de energía eléctrica y a las industrias químicas.

En diciembre de 1952, en Londres, cinco días de niebla y una inversión baja que rebajó el espesor de dilución en la atmósfera a menos de 150 metros produjeron la muerte de más de 4.000 personas. (ver tabla 2.1) Este episodio originó el Acta de Aire Limpio de 1956 para dicha ciudad y produjo grandes cambios en las políticas ambientales, además demostró que el brusco y considerable aumento de concentraciones de partículas totales en suspensión (PTS) y dióxido de azufre va rotundamente asociado al aumento de la mortalidad. (2)

Tabla 2.1 – Principales casos de contaminación del aire y número de muertes asociadas con ellos hasta 1966.

Fecha	Ciudad	Muertes
Febrero de 1880	Londres, Inglaterra	1000
diciembre de 1930	Valle Meuse, Bélgica	63
octubre de 1948	Donora, EU	20
noviembre 26 a diciembre 1 de 1948	Londres, Inglaterra	750
5 al 9 de diciembre de 1952	Londres, Inglaterra	4700
noviembre de 1953	Nueva York, EU	250
3 al 6 de enero de 1956	Londres, Inglaterra	1,000
2 al 5 de diciembre de 1957	Londres, Inglaterra	750
26 al 31 de enero de 1959	Londres, Inglaterra	225
5 al 10 de diciembre de 1962	Londres, Inglaterra	700
noviembre – diciembre de 1962	Nueva York, EU	46
7 al 22 de enero de 1963	Londres, Inglaterra	700
diciembre de 1962	Osaka, Japón	60
enero 9 a febrero 12 de 1963	Nueva York, EU	300
noviembre de 1996	Nueva York, EU	168

Es importante señalar que no solo las PTS y el anhídrido sulfuroso contribuyeron a causar el número adicional de muertes, como por ejemplo, el fluoruro de hidrógeno durante los episodios del Valle de Meuse y de Donora.

Los individuos más afectados en estos episodios fueron los de más edad, los jóvenes y las personas que padecían obstrucción pulmonar crónica y/o dolencias cardíacas. El aumento de muertes por bronquitis fue lo que más contribuyó al índice de mortandad y las muertes debidas a otras enfermedades relativas a deficiencias respiratorias también aumentaron. Creció el número de muertes por enfermedades del corazón, que podían ser debidas al esfuerzo suplementario del corazón para contrarrestar el deterioro de las funciones respiratorias o a efectos directos.(2)

Uno de los efectos más comunes de la contaminación del aire debida al MP es la reducción de la visibilidad resultante de la absorción y dispersión de la luz por los materiales líquidos y sólidos que son arrastrados por el aire. La visibilidad se altera por las partículas que se forman en la atmósfera por reacciones en la fase gaseosa. Aunque no son visibles, el dióxido de azufre, el vapor de agua y el ozono en grandes cantidades cambian las características de absorción y transmisión de la atmósfera. Se han realizado muchos esfuerzos en años recientes a fin de relacionar la concentración de los contaminantes llevados por el aire, y que han tomado la forma de plumas en la atmósfera. La reducción de la visibilidad no solo resulta desagradable para el individuo, sino que puede sufrir efectos psicológicos. Además, se presentan algunos peligros que afectan la seguridad. (11)

La vegetación puede verse afectada por las cantidades excesivas de partículas aéreas que son depositadas, ya sea por efecto de la gravedad (Deposición Seca) o por la acción de hidrometeoros (Deposición húmeda), estas recubren las hojas y obstruyen los estomas, de ahí la menor absorción de dióxido de carbono atmosférico y la menor cantidad de rayos de sol que alcanzan el interior de la hoja, lo que causa la detención del crecimiento de algunas plantas.

El anhídrido sulfuroso transportado por las partículas, también produce lesiones a las plantas, aparece decoloración de la clorofila, que produce clorosis o pérdida del color de las hojas en muchas plantas. El resultado es una reducción del crecimiento y de la cantidad de plantas. Una planta particularmente vulnerable al anhídrido sulfuroso es el liquen, por lo que se le emplea regularmente como bioindicador.

El material particulado que se ha depositado ensucia los tejidos, las superficies pintadas y los edificios haciendo que aumenten los gastos de mantención al acortarse la vida de los materiales y su buen estado. Las partículas pueden producir corrosión a causa de su corrosividad intrínseca o por el hecho de absorber sustancias corrosivas, especialmente en una atmósfera húmeda. La suciedad de los edificios en las ciudades grandes es una de las manifestaciones más obvias de la contaminación atmosférica. Mientras las PTS ensucian o ennegrecen las superficies de los materiales, el anhídrido sulfuroso puede producir daños importantes a los mismos. Algunos materiales de construcción como el carbonato de calcio de las piedras caliza se convierte fácilmente en sulfato de calcio soluble (yeso). El aumento de volumen que conlleva este cambio químico produce ahuecamientos y desintegración de la superficie, el material que queda suelto es arrastrado por los vientos y la lluvia.

2.2. Legislación relacionada a MP

En Chile se tiene como antecedente la resolución No. 1215/78 que llevó a adoptar las normas de la Agencia Norteamericana de Protección del Ambiente (EPA) en lo que respecta a la calidad del aire. Sin embargo, la preocupación por el tema había surgido desde 1961 al darse los primeros intentos por determinar los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago. Incluso, con posterioridad a 1967 se pone en práctica un sistema de monitoreo básico semiautomático precursor de la actual red MACAM.

El Decreto Supremo No. 185 de 1991, del Ministerio de Agricultura, Minería y Salud, procede a regular los establecimientos que por su funcionamiento emiten a la atmósfera a través de sus fuentes emisoras, cantidades mayores o iguales a 3 toneladas diarias de anhídrido sulfuroso, ya sean medidas en chimeneas o determinadas por balance de masa equivalente de azufre o 1 tonelada diaria de material particulado medido en chimenea o por método aprobado por los servicios. De igual forma, regula toda fuente emisora de anhídrido sulfuroso o material particulado localizada en una zona saturada o latente, y se definen normas especiales, primarias para SO₂ y material particulado; y secundarias para SO₂.

En 1994 se dicta la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente que establece la obligación de desarrollar planes de descontaminación en áreas donde los niveles de contaminantes excedan sistemáticamente las normas ambientales, y planes de prevención donde dichas normas se encuentren en peligro de ser superadas. Las normas de emisión se establecen mediante decreto supremo en el que se señala su ámbito territorial de aplicación. Corresponde a la Comisión Nacional de Medio Ambiente el proponer, facilitar y coordinar el dictado de estas normas de emisión.

En la Región Metropolitana se han observado altos niveles de contaminación atmosférica los cuales obedecen a una serie de factores: elevados niveles de emisión de contaminantes producto de la creciente actividad económica; un progresivo deterioro del transporte originado en la extensión y segregación funcional de la ciudad; condiciones geográficas y meteorológicas desfavorables para una adecuada dispersión de contaminantes. Al superar repetidas veces las normas de calidad de aire, la Región Metropolitana mediante el decreto D.S. No. 131/96, del 12 de junio de 1996 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, fue declarada “zona saturada” para cuatro contaminantes atmosféricos (material particulado respirable, partículas totales en suspensión, monóxido de carbono y ozono) y como “zona latente” para dióxido de nitrógeno.

La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) inició desde 1996, la elaboración de un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana.

2.2.1 Comparación de normativas relacionadas a Partículas en suspensión entre Chile y la Comunidad Mundial

Chile:

En 1992, mediante el Decreto Supremo No. 185 de los Ministerios de Minería, agricultura y Salud se estableció la norma primaria de calidad del aire para PM₁₀. No obstante lo anterior, ya desde 1988 el control de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana se efectuaba mediante mediciones de PM₁₀ de la red MACAM.

En la tabla 2.2 se observan las normas de calidad de aire vigentes en Chile.(12) Es importante señalar que a pesar de que se mantuvo vigente en la normativa las PTS como indicador de contaminación (hasta marzo de 2003), en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana sólo se hace referencia a metas de calidad y emisión en términos de PM₁₀.

Tabla 2.2 - Normas de calidad y métodos de análisis de los contaminantes en Chile

INDICADOR	UNIDAD	ESTANDAR	TIEMPO	METODO DE ANALISIS
Partículas totales en suspensión PTS	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	75	Concentración media geométrica anual	Método gravimétrico de muestreador de alto volumen o equivalente (1)
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	260	Concentración media aritmética en 24 hrs. (2)	
PM10 (3)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	150	Media aritmética diaria	Método gravimétrico de muestreador de alto volumen o equivalente (1), Método por transducción gravimétrica de oscilaciones inducidas. Microbalanza de oscilación de sensor en voladizo con cabezal PM10. Métodos basados en el principio de atenuación beta.
Anhídrido sulfuroso (SO₂)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	80	Concentración media aritmética anual	Método colorimétrico de la pararosanilina o equivalente (1)
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	365	Concentración media aritmética durante 24 hrs (2)	
Monóxido de Carbono (CO)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	10.000	Concentración media 8 horas (2)	Método de radiación infrarroja no dispersiva o equivalente (1)
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	40.000	Concentración media aritmética de 1 hora (2)	
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	100	Concentración media aritmética anual	Método de quimiluminiscencia o equivalente (1)

Notas:

(1) Se consideran los métodos de análisis equivalentes a aquellos ensayados por el Laboratorio de Contaminación Atmosférica, dependiente del Ministerio de Salud, que suministren respuestas igualmente válidas respecto de los métodos de referencia o equivalentes.

(2) Dicho valor no puede ser sobrepasado más de 1 vez al año

(3) Norma correspondiente al D.S. No. 185/91 del Ministerio de Minería

Comunidad Europea:

Los valores límites para las partículas totales en suspensión, obtenidos por el método gravimétrico y expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponde a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media geométrica de los valores medios diarios registrados durante el año) y $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media aritmética de los valores medios registrados durante 24 horas), de conformidad con la directiva 80/779/CEE del 15 de julio de 1980.

En 1997 las PTS fueron sustituidas como indicador y se reemplaza por el PM 10, cuyas normas se aplicarían en dos fases. En una primera fase –que termina en el año 2005- los valores límite corresponden a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 horas), mientras que en una segunda fase –que termina el 1 de enero de 2010- los valores están fijados en $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 horas).

Con respecto al PM 2,5, se determina que en aquellas zonas donde se superen los valores límite de PM 10 por motivos de altas concentraciones de fuentes naturales en el ambiente, se pueden aplicar los “niveles de actuación” de PM 2,5. Estos valores límite están establecidos como metas indicativas a ser cumplidas en lo posible al año 2005 y corresponde a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 horas).

Para la determinación del mecanismo de medición del smog y su conversión en unidades gravimétricas, el método normalizado por el grupo de trabajo de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico sobre los métodos de medición de la contaminación del aire y las técnicas de investigación se considera como método de referencia.(12)

OMS:

A partir de 1996, la OMS ha adoptado el criterio que dado que no existen valores umbrales para el PM10 o el PM2,5, es preciso regular la presencia de estos contaminantes mediante manejo de riesgos a su exposición.

La OMS sigue los lineamientos de la ISO y recomienda las mediciones gravimétricas con muestreadores de alto volumen para PTS como indicador de contaminación por PS. Sin embargo, estipula claramente que considera “engañoso” dictar lineamientos de calidad del aire para PS basados en PTS. Por esta razón, desde 1987 recomienda la medición de las partículas más finas (PM10), las que se estiman a partir de mediciones de PTS usando un factor específico para las partículas del lugar de muestreo. (12)

México:

Los criterios para evaluar la calidad del aire respecto a las partículas suspendidas en su fracción respirable (PM10) están fijados en 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramos sobre metro cúbico) en un promedio de 24 horas, equivalentes a 100 puntos IMECA 7 .

El método de referencia para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el ambiente, es el de muestreo de alto volumen. El método de referencia, permite medir la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente, por medio de un muestreador adecuadamente localizado, que succiona a través de un filtro una cantidad determinada de aire ambiente hacia el interior de una caseta o coraza de protección, durante un período de muestreo de 24 hrs. El rango de las concentraciones para aplicar este método es de 2 a 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (12)

Estados Unidos:

Los estándares respecto a las partículas suspendidas en su fracción respirable (PM10) están fijados en 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media aritmética anual. En lo que respecta a las partículas con diámetro 2,5, los estándares están fijados en 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media geométrica anual. En este último caso, el estándar es señalado como informativo únicamente, al estar bloqueada su implementación desde 1999 por una corte federal desde que fuera propuesta por la EPA en 1997 .

En la tabla 2.3 se observan estos estándares. (12)

Tabla 2.3 - Estándares Ambientales Nacionales de Calidad de Aire para Estados Unidos

Contaminante	Valor Estándar*		Tipo de Estándar**
Monóxido de Carbono (CO)			
Promedio 8 horas	9 ppm	(10 mg/m ³)	Primaria
Promedio 1 hora	35 ppm	(40 mg/m ³)	Primaria
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)			
Media aritmética anual	0.053 ppm	(100 µg/m ³)	Primaria & Secundaria
Ozono (O₃)			
Promedio 1 hora	0.12 ppm	(235 µg/m ³)	Primaria & Secundaria
Promedio 8 horas***	0.08ppm	(157 µg/m ³)	Primaria & Secundaria
Plomo (Pb)			
Promedio cuatrimestral	1.5 µg/m ³		Primaria & Secundaria
Dióxido de Azufre (SO₂)			
Media aritmética anual	0.03 ppm	(80 µg/m ³)	Primaria
Promedio 24 horas	0.14 ppm	(365 µg/m ³)	Primaria
Promedio 3 horas	0.50 ppm	(1300 µg/m ³)	Secundaria
Particulado (PM 10) <i>Partículas con diámetro de 10 micrometros o menos</i>			
Media aritmética anual	50 µg/m ³		Primaria & Secundaria
Promedio 24 horas	150 µg/m ³		Primaria & Secundaria
Particulado (PM 2.5) <i>Partículas con diámetro de 2.5 micrometro o menos</i>			
Media Aritmética anual***	15 µg/m ³		Primaria & Secundaria
Promedio 24 horas***	65 µg/m ³		Primaria & Secundaria

Notas:

(*) El valor en paréntesis es una concentración equivalente aproximadamente

(**) La ley de Aire Puro establece dos tipos de estándares ambientales nacionales de calidad de aire: primarios (están designados para establecer límites para la protección de la salud pública) y secundarios (establecen límites para proteger el bienestar público)

(***) Se incluye solo para información.

Numerosos estudios que hacían referencia a los efectos sobre la salud de las partículas suspendidas, llevaron a la EPA a establecer la necesidad de introducir cambios en los estándares de las partículas suspendidas para la protección de la salud pública y el ambiente. Los estudios sugerían efectos significativos tales como una mortalidad prematura, admisiones hospitalarias y dificultad respiratoria, cuando las concentraciones se encontraban por encima de los estándares establecidos. Por esta razón, se revisó la norma primaria del PM a fin de adicionar nuevos estándares para el PM2.5: el anual de 15 µg/m³ y el de 24 horas en 65 µg/m³. A pesar de lo anterior, no existía una red de monitoreo adecuada que permitiera a los diversos Estados determinar las concentraciones de partículas finas en todo el país, lo que imposibilitaba el cumplimiento de los planes de control. En la actualidad, la EPA debe completar la próxima revisión de los estándares de calidad del aire previo a imponer cualquier control directo sobre el cumplimiento de las PM2.5 y centrar sus esfuerzos en el establecimiento de la red de monitoreo. Esta red de monitoreo ayudaría a la EPA y a los Estados a determinar cuales áreas reconocen los nuevos estándares de calidad del aire, cuales son las mayores fuentes de PM2.5 en diversas regiones y, cuáles acciones son necesarias para mejorar la calidad del aire.

2.2.2 Comparación de normas internacionales de PTS con Chile:

Uno de los aspectos que se resaltan en el caso de las normas de calidad del aire para partículas en suspensión es que Estados Unidos, México, la OMS y la Unión Europea dejaron de usar las PTS como indicador de los efectos de las PS sobre la salud hace bastantes años y las han reemplazado por las PM 10 y PM 2,5. Chile también ha adoptado estas nuevas directrices ambientales al punto de que en el Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana sólo se hace referencia a metas de calidad y emisión en términos de PM10.

Chile y México cuentan con una sola norma diaria para el PM10 y además no tienen normado como indicador el PM 2,5, lo que los distingue de países como Estados Unidos y la Unión Europea. Por otra parte, si bien la norma de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 h) es prácticamente uniforme en todos los países, la Comunidad Europea ha disminuido sus valores límite a un tercio de los demás.

La tabla 2.4 muestra que sólo los Estados Unidos y la OMS consideran a las partículas más finas (PM 2,5) en la regulación de la calidad del aire. La Unión Europea, si bien establece valores límites, estos se aplican sólo en los casos de una gran concentración de PM10 de origen natural que supere las normas. En general, se nota una tendencia a regular las partículas más finas por el mayor impacto que tendrían sobre la salud y debido a su toxicidad, a pesar de que no se ha demostrado que exista un nivel umbral en el cual la salud esté protegida de los efectos de este contaminante.(12)

Tabla 2.4 - Comparación de las normas de calidad del aire para partículas en suspensión

Lugar	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Chile*	75 (media anual) 260 (media 24 h)	150 (media 24 h)	No está normado
Comunidad Europea**	Se reemplazó por el indicador PM10	30 (media anual) 50 (media 24 h)	20 (media anual) 40 (media 24 h)
OMS	Se reemplazó por los indicadores PM10 y PM2,5	Sin umbral, se recomienda manejo de riesgos a su exposición	Sin umbral, se recomienda manejo de riesgos a su exposición
México	Se reemplazó por el indicador PM10	150 (media 24 h)	No está normado
Estados Unidos	Se reemplazó por los indicadores PM10 y PM2,5	50 (media anual) 150 (media 24 h)	15 (media anual) 65 (media 24 h)

Notas:

(*)La norma primaria de PTS se dejó sin efecto en marzo de 2003, al ser publicada su derogación en el Diario Oficial.

(**)Se consideran aquellos valores que son efectivos a partir del año 2005

Como ya se ha mencionado, las normativas orientadas al control de la contaminación debido a MP son cada vez más estrictas, el tamaño de las partículas que se miden es cada vez más pequeño, por lo que índices como las PTS ya han desaparecido casi completamente como contaminantes por derecho propio, dando paso a granulometría mucho más pequeña (PM 10 y PM 2.5), las que hoy se sabe, son mucho más peligrosas para la salud, y en consecuencia captan toda la atención de los estados y de los investigadores. Países como Inglaterra ya poseen redes de monitoreo de PM 2,5 y PM 0,1. Es en este sentido que resulta difícil encontrar legislación sobre Deposición Total, ya que debido al tamaño de las partículas que la componen ($> 30 \mu\text{m}$) estas sedimentan relativamente rápido y no son consideradas contaminantes peligrosos, pues son retenidas en el sistema respiratorio superior y posteriormente eliminadas.

Sin embargo, es importante recalcar que la medición de estas partículas mayores resulta mas simple y económica, las deposiciones son un reflejo de las condiciones de contaminación de la atmósfera, por lo que un análisis de estas, es un análisis de la calidad del aire, transformándose así, un efectivo y claro indicador de contaminación.

2.3 Redes de monitoreo de Contaminación Atmosférica

Identificados los contaminantes y establecidos los parámetros necesarios para determinar el riesgo de estas sustancias para la salud, es importante establecer redes de monitoreo a escala local y métodos de análisis para determinar los niveles de concentración de los contaminantes en diferentes zonas, de tal forma que se pueda identificar el número de personas potencialmente expuestas al riesgo en un territorio amplio y los momentos en que los límites fijados son superados.

Chile:

El Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana (SESMA) tiene a su cargo una red de monitoreo que permite mantener una constante vigilancia de los niveles de contaminación del aire que ocurren en la Región durante todo el año. Rutinariamente, la medición automática y continua en Santiago comenzó en el año 1987.

Ese año fue instalada una Red Automática denominada MACAM1-RM, compuesta por 5 estaciones y dedicada principalmente a evaluar la calidad del aire del centro de Santiago (4 estaciones). Además, contó con una quinta estación de tipo movable, la cual fue emplazada en la Comuna de Las Condes.

Las concentraciones máximas permitidas y los métodos de análisis utilizados para la determinación de los contaminantes se presentan en la tabla 2.2.

En la Región Metropolitana se utilizan el índice de calidad de aire referido a gases –ICA y el índice de calidad de aire referido a partículas –ICAP-. (ver tabla 2.5) Estos índices hacen comparables, en términos de efectos en la salud, las concentraciones de distintos contaminantes para diferentes intervalos de tiempo, sin embargo, no consideran el efecto sinérgico de dos o más contaminantes.

El índice ICA, resulta de la aplicación de una metodología que se indica en la resolución No. 369/1988 del Ministerio de Salud, a las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y ozono (O₃), determinadas por la Red de Monitoreo MACAM dependiente del SESMA. El índice ICAP utiliza la metodología del índice anterior, pero con una concentración de material particulado de tamaño menor a 10 mm (PM 10) determinada por la Red MACAM.(12)

Tabla 2.5 - Índices ICA e ICAP en Chile

INDICE	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM 10 µg /m ³ (24 horas)
	ppm	µg /m ³	µg /m ³	µg /m ³	
0	0	0	0	0	0
100	9	365	470	160	150
200	19	929	1.290	470	195
300	30	1.493	2.110	780	240
400	40	2.056	2.930	1.090	285
500	50	2.620	3.750	1.400	330

Nota:

Las concentraciones de CO son para un periodo de 8 hrs; 24 hrs para SO₂ y partículas, y de 1 hr. para NO₂ y O₃.

El ICAP es el indicador que a través de los datos emanados del modelo de pronóstico Cassmassi sirve como antecedente para que la autoridad pueda determinar que estamos en presencia de un episodio crítico de contaminación. El ICAP es en realidad una simplificación que lleva a una escala

estándar el valor promedio de las concentraciones del PM10, de acuerdo a lo que establece la norma para este contaminante. De esta forma, se produce un episodio crítico cuando se alcanzan niveles de calidad del aire que superan el nivel 200 del ICAP o, lo que es equivalente, los 195 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración. De ahí en adelante y según vaya empeorando la calidad del aire, se califica el ICAP como malo, crítico, peligroso o que excede (12). Esto se explica mejor en la siguiente tabla:

Tabla 2.6 – Índice de la calidad de aire por MP en Chile

INDICE	CALIFICACION	MP10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 hrs.)	NIVEL	EPISODIO
100 -199	BUENO	150	0	-
200-299	MALO	195	1	Alerta
300-399	CRÍTICO	240	2	Pre emergencia
400-500	PELIGROSO	285	2	Pre emergencia
>501	EXCEDE	330	3	Emergencia

Se estable mediante el Decreto Supremo No. 32/1990 del Ministerio de Salud, posteriormente ratificado por el D.S. N° 59/98 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia, que cuando los estimadores del índice de calidad del aire para partículas –ICAP-, supera el nivel 300, se decreta Pre-Emergencia y la autoridad sanitaria puede ordenar la paralización por períodos de 24 horas prorrogables, a todas las fuentes ubicadas en los primeros lugares del listado de fuentes emisoras, que en conjunto aportan el 20% de la emisión diaria.

Cuando los estimadores ICAP alcanzan el valor 500 se decreta Emergencia y paralizan aquellas fuentes que en total aportan el 50% de la emisión diaria del material particulado.

Por otra parte, con el decreto supremo No. 59/98 se determinan los niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para Material Particulado Respirable MP10, de acuerdo a los cuales el valor calculado para la calidad del aire, en concentración de 24 horas, se encuentre en el respectivo rango señalado en la tabla siguiente:

Tabla 2.7

Nivel	Material Particulado Respirable MP10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ N en 24 horas
Nivel 1°	195-239
Nivel 2°	240-329
Nivel 3°	330 o superior

Si en alguna de las estaciones de monitoreo de calidad del aire; se detectan concentraciones de Material Particulado Respirable MP10, mayores que el valor mínimo del Nivel 1°, en al menos tres de los días monitoreados en el año calendario; se debe practicar, en aquellos meses en que se constate dicha superación y para la estación en que se midieron tales concentraciones, mediciones de monitoreo con frecuencia al menos diaria, o mediciones de monitoreo con métodos del tipo continuo.

Las fuentes puntuales o grupales que no acrediten mediante mediciones isocinéticas anuales, que sus concentraciones de material particulado, medidas según método CH-5 y corregidas por el factor de exceso de aire establecido, son inferiores a 32 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ y 28 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$, deben paralizar en episodios de preemergencia y emergencia, respectivamente.

Además, durante Pre-Emergencias, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones dispondrá de medidas de restricción vehicular, en el Gran Santiago que afectan a automóviles, transporte de carga, transporte de escombros, buses no licitados, buses licitados, servicio metro bus y vehículos con sello verde.

Es importante destacar que debido a que el modelo pronostica la calidad del aire del día siguiente, la declaración de un episodio por parte de la autoridad no implica que el aire haya empeorado, sino que podría llegar a empeorar. Es decir, los episodios se decretan en forma preventiva para evitar alcanzar los índices pronosticados, y así proteger la salud de la población (CONAMA)

Comunidad Europea:

La Comunidad Europea posee redes y estaciones aisladas de medición de la contaminación atmosférica las cuales están fiscalizadas por la Comisión Europea de normalización. Esta Comisión determina si procede la elaboración y actualización de los procedimientos relativos al envío de datos e información; la conexión con las actividades de la Agencia Europea de Medio Ambiente respecto de la contaminación atmosférica; la modificación de contaminantes, datos, unidades de medida y tiempos recomendados para el cálculo de medias y los datos calculados por año natural; la consideración, en el procedimiento de intercambio, de nuevas técnicas de medición; y, la ampliación del procedimiento a datos e información procedentes de países no comunitarios.

En lo referente a la exposición a los contaminantes, la Unión Europea lo que establece son umbrales de alerta cuando se alcanzan los valores límites establecidos. Por ejemplo, en el caso del SO₂ el umbral de alerta se propone cuando se alcanzan 350 µg/m³.

Los Estados miembros son los responsables de establecer la lista de zonas y poblaciones en que los niveles de uno o más contaminantes rebasen el valor límite incrementado por el margen de exceso tolerado. Las estaciones se clasifican por zona (urbana, suburbana y rural), tipo (tráfico, industrial, de apoyo) y caracterización de la zona de su emplazamiento (residencial, comercial, industrial, agrícola, natural o una combinación de los anteriores). En estos lugares se deben tomar las medidas para garantizar la elaboración o la aplicación de un plan o programa que permita regresar al valor límite dentro del plazo fijado.

Algunos de los métodos de referencia para el análisis de los distintos contaminantes se pueden observar en la tabla 2.8. Los Estados miembros pueden utilizar cualquier otro método si pueden demostrar que da resultados equivalentes al método propuesto. En el caso del PM₁₀, los Estados miembros pueden además utilizar cualquier otro método si llegan a demostrar que existe una relación coherente con el método de referencia. De esta forma, los resultados obtenidos con dicho método deben corregirse mediante un factor pertinente para producir resultados equivalentes a los que se habrían obtenido con el método de referencia.(12)

Tabla 2.8 – Valores para los contaminantes en la comunidad Europea

INDICADOR	VALOR LÍMITE HORARIO	ANUAL	MARGEN DE TOLERANCIA	Método de referencia*
Dióxido de azufre	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ valor que no puede superarse más de 24 veces al año		150 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, con una reducción lineal a partir del 1 de enero del 2001 y posteriormente cada 12 meses hasta alcanzar el 0% en el año 2005	Método de fluorescencia ultravioleta
Partículas PM10		Fase 1 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM	20% a partir de 1999, con una reducción lineal a partir del 1 de enero del 2001 y posteriormente cada 12 meses hasta alcanzar el 0% en el año 2005	Captación en un filtro de la fracción de PM10 de materia en suspensión del ambiente y en la determinación gravimétrica de la masa
		Fase 2 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM	50% a partir del 1 de enero de 2005, y a continuación cada 12 meses hasta alcanzar el 0% en el año 2010	
Plomo		0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100% a partir de 1999, con una reducción lineal a partir del 1 de enero del 2001 y posteriormente cada 12 meses hasta alcanzar el 0% en el año 2005 o el 1 de enero de 2010 según las inmediaciones de fuentes industriales específicas que se notificarán a la Comisión	Método de espectroscopia de absorción atómica.
Dióxido de Nitrógeno (NO2)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ que no puede superarse en más de 18 ocasiones al año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ que no puede superarse en más de 18 ocasiones al año	50% a partir de 1999 con una reducción lineal a partir del 1 de enero de 2001 y posteriormente cada 12 meses con un porcentaje anual idéntico hasta alcanzar el 0% el 1 de enero de 2010	Método de quimiluminiscencia

Notas:

(*) su aplicación es obligatoria a partir de enero de 2005 o 2010 según el contaminante.

En la directiva 1999/30/CE se establece que a partir del 19 de julio de 2001, los Estados miembros deben utilizar las estaciones de medición y los métodos de evaluación de la calidad del aire establecidos en ella para evaluar las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y plomo en el aire ambiente con objeto de obtener los datos destinados a demostrar que se cumplen los valores límite establecidos en las Directivas 80/779/CEE, 82/884/CEE y 85/203/CEE hasta el momento en que dejen de aplicarse los valores límite establecidos en esas Directivas, tal y como se señaló anteriormente.

A pesar de lo anterior, para el cálculo de los índices de calidad, los Estados miembros utilizan los nuevos valores límite, aunque éstos no estén aún en vigor hasta el 2005 o 2010 según el contaminante. Los contaminantes más afectados por la aplicación de los nuevos criterios en el cálculo del índice de calidad ambiental son el ozono y las partículas en suspensión.

La aplicación del umbral de alerta para el ozono origina que una concentración de 240 µg/m³, como valor medio de una hora, sea considerada como “muy mala”, cuando con anterioridad eran necesarios 360 µg/m³. Respecto a las partículas en suspensión, la Directiva 1999/30/CE establece un valor límite más restrictivo, pero aplicable a las partículas en suspensión antropogénicas, considerándose superación del límite cuando se demuestre que se excede por causas naturales.

El valor del índice es 0 cuando la concentración de contaminantes es nula, y cuando la concentración coincide con el valor límite fijado por las directivas europeas se le asigna un valor de 100, para cada uno de los contaminantes considerados. El valor del índice para cualquier otro valor de concentración se obtiene por interpolación lineal. (12)

México:

Tres dependencias federales tienen competencia sobre aspectos de contaminación de la atmósfera: la Secretaría de Desarrollo social (actualmente SEMARNAP), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). La SEMARNAP regula las fuentes fijas bajo la jurisdicción federal, expide las normas oficiales mexicanas (NOM) respectivas para aplicar el Reglamento Atmosférico, y se encarga de aplicar y supervisar las actividades relacionadas con el control de la contaminación de la atmósfera. Por su parte, la SCT cuenta con la autoridad administrativa sobre todos los centros de verificación de emisiones del transporte público federal. Adicionalmente, SECOFI se coordina con la SEMARNAP para establecer las normas oficiales mexicanas relativas a los niveles máximos de emisiones contaminantes de vehículos automotores nuevos y en circulación. Los estados y municipios cuentan también con sus propias dependencias locales para el control de la contaminación atmosférica.

La SEMARNAP es la encargada de vigilar que se lleven a cabo las acciones correctivas de sitios o zonas donde se declare la contaminación ambiental. Además, establece y mantiene un Sistema Nacional de Información de la calidad del Aire, el cual integra datos que resultan del monitoreo atmosférico y de los inventarios de las fuentes de contaminación de la jurisdicción federal, así como de los Estados y Municipios.

El establecimiento y operación de los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire se sujetan a las normas técnicas ecológicas que al efecto dicta la SEMARNAP, en coordinación con la Secretaría de Salud en lo referente a la salud humana. Los Estados, municipios y el Distrito Federal tienen la obligación de establecer y operar, con el apoyo técnico de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA), sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

De acuerdo con la Ley de Ecología, la SEMARNAP está a cargo de establecer normas de calidad del aire a nivel federal. Si bien los Estados pueden aplicar normas más estrictas localmente, las normas federales representan una base para las normas estatales. Existen además dos criterios básicos para establecer las normas de calidad del aire. En primer término, la calidad del aire debe

ser satisfactoria para los asentamientos humanos. En segundo, todas las emisiones contaminantes de fuentes naturales, artificiales, fijas o móviles debe reducirse o controlarse a fin de asegurar que la calidad del aire sea satisfactoria para el bienestar general de la población y el ambiente. Se define una emisión como la descarga directa o indirecta a la atmósfera de cualquier sustancia o energía. En la Ciudad de México se utilizan dos índices para determinar los estados de la calidad del aire: el índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y el Índice UV o de radiación Solar Ultravioleta. En la tabla 2.10 se observan los métodos de referencia para la medición de los distintos contaminantes. (12)

El IMECA es definido como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada (ver tabla 2.9). Consta de dos algoritmos de cálculo fundamentales; el primero, para la obtención de subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire; y el segundo, para la combinación de éstos en un índice global. El primero involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos de quiebra principales. Estos puntos fueron obtenidos a partir de los criterios mexicanos de calidad del aire, así como de niveles para los que ocurren daños significativos para la salud. Al primero se le asignó el valor de 100 y al segundo el de 500; entre estos dos puntos se definieron tres más, cuyo objetivo es clasificar el intervalo en diferentes términos descriptivos de la calidad del aire.(12)

Tabla 2.9 – Índice IMECA México

IMECA	CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0 -100	Satisfactoria	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades
101 - 200	No Satisfactoria	Aumento de molestias menores en personas sensibles
201 - 300	Mala	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios
301 - 500	Muy mala	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población

Tabla 2.10 – Comparación de metodologías de medición de contaminantes

Contaminante	País			
	Chile	Comunidad Europea	México	Estados Unidos
SO ₂	Método colorimétrico de la pararosanilina	Pararosanilina ISO 6767	Pararosanilina	Pararosanilina; fluorescencia ultravioleta
CO	Fotometría infrarroja no dispersiva	Espectrometría infrarroja no dispersiva	Fotometría infrarroja no dispersiva.	Fotometría infrarroja no dispersiva
PTS	Método gravimétrico de muestreador de alto volumen	Humos negros Método gravimétrico de muestreador de alto volumen	No está normado en la actualidad. Se utilizaba el muestreador de alto volumen	No está normado en la actualidad. Se utilizaba el método gravimétrico de muestreador de alto volumen.
PM10	Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal PM10. Método por Transducción gravimétrica de oscilaciones inducidas. Microbalanza de oscilación de censor en voladizo con cabezal PM10. Métodos basados en el principio de atenuación beta.	Captación en un filtro de la fracción de PM10 de materia en suspensión del ambiente y en la determinación gravimétrica de la masa	Muestreador de alto volumen	Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal PM10. Monitor de Atenuación Beta. Microbalanza de oscilaciones inducidas (TEOM)
PM 2,5	No está normado	Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal 2.5	No está normado	Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal 2.5

Estados Unidos:

La EPA está autorizada para establecer Normas Nacionales de Calidad del Aire (NAAQS, National Ambient Air Quality Standards) primarias y secundarias para contaminantes que "a juzgar por diversos criterios" ponen en peligro la salud o el bienestar públicos. La Ley de Aire Puro (CAA, Clean Air Act) creó también normas uniformes nacionales de desempeño para las nuevas fuentes estacionarias (construidas o modificadas después de 1970), normas nacionales sobre emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos y normas para emisión de los vehículos.

Tal y como se ha indicado, las normas nacionales de calidad del aire incluyen normas primarias y secundarias. Las primarias deben dar un "margen de seguridad adecuado" de protección de la salud pública. Las secundarias protegen el bienestar público de efectos adversos anticipados. Se aplican diferentes requerimientos de concesión de permisos dependiendo de si el área donde está ubicada la instalación cumple o no con las NAAQS.

La EPA está obligada a revisar periódicamente las citadas normas para los contaminantes incluidos en los criterios de peligrosidad; a fin de determinar si debe modificarlas al considerar que no protegen de manera suficiente la salud y el bienestar.

El monitoreo de la calidad del aire se divide en tres categorías: Estaciones Nacionales de Monitoreo Ambiental (NAMS), Estaciones Estatales y Locales de Monitoreo Ambiental (SLAMS) y Estaciones de Monitoreo para Propósitos Especiales (SPMS). Las estaciones NAMS son un subconjunto de las SLAMS. Estas estaciones en general deben incluir el monitoreo de todo contaminante y precursor establecido en los criterios correspondientes. La EPA utiliza un índice para reportar la calidad del aire diario, la cual se centra en los cinco mayores contaminantes del aire: ozono, partículas en suspensión, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. La EPA ha dividido la escala de este índice en seis categorías las cuales corresponden a diferentes niveles de preocupación para la salud (ver tabla 2.11).

De esta forma, un valor por debajo de 100 se considera satisfactorio. Además, EPA ha asignado un color específico a cada categoría del índice AQI (siglas en inglés) para hacer más fácil a las personas el entender rápidamente el significado de los niveles de contaminación en el aire. Por ejemplo, el color naranja significa que las condiciones son poco sanas para los grupos sensibles; y, el color rojo significa que las condiciones pueden ser no saludables para todos.(13)

Tabla 2.11 – Índice de calidad del aire (AQI, siglas en inglés) Estados Unidos.

Valores del índice de calidad del Aire (AQI)	Niveles de preocupación de la salud	Colores
0 – 50	Bueno	Verde
51 – 100	Moderado	Amarillo
101 – 150	No saludable para grupos sensibles	Naranja
151 - 200	No saludable para la población en general	Rojo
201 – 300	Muy poco saludable	Púrpura
301 - 500	Peligroso	Marrón

Por otra parte, en este país se definen tres niveles críticos de concentración de contaminantes: alerta, advertencia y emergencia. Existen además, niveles de daño significativo para contaminantes, entre los cuales se encuentra por ejemplo el SO₂ y que se ha fijado en 2.620 µg/m³ (1,0 ppm) en un periodo de 24 horas. Los métodos de medición de los distintos contaminantes se observan en la tabla 2.10

Asimismo, la Ley de Control de la Contaminación Atmosférica obliga a los Estados a elaborar un plan de emergencia para tomar medidas que impidan que las concentraciones de contaminantes en el aire en cualquier lugar dentro de las regiones de más afectadas, lleguen a “niveles que causen daño significativo”, es decir, pongan la salud de las personas en peligro inminente y substancial.

Los planes de emergencia estatales deben incluir “criterios de episodio” que justifiquen la declaración de estado de alerta, de pre-emergencia o de emergencia de contaminación del aire, de acuerdo la siguiente tabla (13) :

Tabla 2.12 – Niveles críticos de concentración de contaminantes en Estados Unidos

Contaminante	Alerta		Advertencia o Pre-emergencia		Emergencia	
	Estándar	Período	Estándar	Período	Estándar	Período
SO ₂	800 µg/m ³	24 h	1.600 µg/m ³	24 h	2.100 µg/m ³	24 h
CO	17.000 µg/m ³	8 h	34.000 µg/m ³	8 h	46.000 µg/m ³	8 h
PM10	350 µg/m ³	24 h	420 µg/m ³	24 h	500 µg/m ³	24 h
Ozono	400 µg/m ³	1 h	800 µg/m ³	1 h	1.000 µg/m ³	1 h

América Latina y el Caribe:

El interés por la contaminación del aire en América Latina y el Caribe se inició en la década de los cincuenta, cuando las universidades y los ministerios de salud efectuaron las primeras mediciones de la contaminación del aire. En 1965, el Consejo Directivo de la OPS recomendó a su Director establecer programas de investigación sobre contaminación del agua y aire, así como colaborar con los Gobiernos Miembros en el desarrollo de políticas adecuadas de control. Cuando la OPS inició su programa regional, prácticamente ningún país era consciente de la magnitud de sus problemas de contaminación del aire. A través del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), la OPS acordó establecer una red de estaciones de monitoreo de la contaminación del aire.

La Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES) inició sus operaciones en junio de 1967. REDPANAIRES comenzó con ocho estaciones y hacia fines de 1973 contaba con un total de 88 estaciones distribuidas en 26 ciudades de 14 países. En 1980, REDPANAIRES discontinuó sus actividades y pasó a formar parte del Programa Global de Monitoreo de la Calidad del Aire, establecido en 1976 por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), como parte del Sistema Mundial de Monitoreo del Medio Ambiente (GEMS por sus siglas en inglés). En 1990, el Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (ECO) de la OPS realizó una encuesta sobre el estado de los programas de calidad del aire y salud en América Latina y el Caribe. Los resultados de esta encuesta indicaron que sólo seis países habían establecido estándares de calidad del aire, diez habían desarrollado redes de monitoreo de la calidad del aire, nueve habían preparado inventarios de emisiones, cuatro habían establecido estrategias de control y cuatro habían llevado a cabo estudios epidemiológicos.

Durante la década de los noventa, la OMS organizó el Sistema de Información sobre la Gestión de la Calidad del Aire (AMIS por sus siglas en inglés) que tiene presencia en el nivel mundial. En 1997, el programa GEMS se incorporó al AMIS. Actualmente, el AMIS brinda la información global requerida para el manejo racional de la calidad del aire que incluye el monitoreo de la concentración de contaminantes del aire, desarrollo de instrumentos para elaborar inventarios de emisiones y modelos de calidad del aire, estimación de los efectos sobre la salud pública a través de estudios epidemiológicos y la propuesta de planes de acción detallados para mejorar la calidad del aire. La participación

en el AMIS vincula automáticamente a los países con una red de apoyo que cuenta con recursos y experiencia. (14)

2.3.1 Criterios de instalación para una red de monitoreo de MP

Para poder diseñar una Red de Estaciones de Monitoreo de Aire a nivel Local y Regional (State and Local Air Monitoring Stations, SLAMS) es necesario poseer ciertos criterios para determinar tanto su localización, como número, montaje, distribución, etc. Por otra parte las estaciones de una red de monitoreo, como la que hemos señalado, debe estar diseñada para cumplir algunos de los objetivos siguientes :

- determinar altas concentraciones de contaminación que se esperan ocurran en el sitio de muestreo donde está localizada y distribuida la red.
- determinar la concentración representativa de contaminantes de un área de alta densidad de población.
- determinar el impacto que puedan producir en el ambiente las fuentes de emisión de contaminantes analizadas cada una de ellas en particular o en conjunto.
- determinar la línea de base (niveles de concentración) de los contaminantes de interés.

Una vez definidos los objetivos generales de una red de monitoreo para la calidad del aire, debemos encontrar la relación que hay entre estos objetivos y la ubicación geográfica de las estaciones de muestreo y en este punto aparece el concepto de escala espacial representativa. Este concepto nos habla de la capacidad que debe tener una estación de monitoreo para representar la concentración de contaminantes de una determinada ubicación geográfica. Esto adquiere aún más relevancia cuando se trata además de la representatividad de una determinada población de individuos.

Otros elementos de juicio que se podrían obtener para poder tomar una mejor decisión respecto a la ubicación de los muestreadores, podrían ser por ejemplo el contar con mapas regionales donde se observen las diferentes carreteras y su frecuencia de uso, fotografías aéreas que muestren la topografía del lugar, los asentamientos urbanos, los sitios industriales y las carreteras de alto tráfico. Esta información podrá, entonces, ser usada para determinar los distintos objetivos del monitoreo, así como también estimar la concentración esperada de MP10 de estos lugares de muestreo. Algunos de los parámetros espaciales descritos en términos de dimensiones físicas que serían representativas de una determinada "porción" del aire a muestrear y como ya se mencionó, equivalente a la concentración de los contaminantes en estudio (específicamente MP10), que son utilizados por la EPA para estos fines serían los siguientes (13) :

1. **Microescala:** define la concentración de volúmenes de aire asociados a un área cuyas dimensiones abarcan sobre 100 m. Esta escala podría tipificar áreas tales como calles encajonadas del centro de la ciudad y corredores de mucho tráfico, donde la población podría estar expuesta a concentraciones máximas producidas por fuentes móviles. Debido a la alta concentración de MP10 que resulta de las fuentes móviles cuyo gradiente varía en forma drástica, se reducen generalmente las dimensiones del área a no más de 15 m de la calle en cuestión.

Emisiones de fuentes estacionarias, tales como fundiciones del tipo primario y secundario, plantas de energía y un gran número de otros procesos industriales podrían, bajo ciertas condiciones meteorológicas, transformarse en un alto nivel de concentraciones de línea de base a nivel de microescala. En este último caso, la microescala podría representar un área de impacto ambiental con una pluma de distribución que se extiende aproximadamente sobre los 100 m a la redonda. La recolección de los datos a nivel de situaciones de microescala entrega información para evaluar y desarrollar las medidas de control de los sitios críticos („hotspot“).

2. **Escala media:** esta categoría cubre las dimensiones de 100 a 500 m. Muchas de las medidas de exposición pública por corto tiempo para MP10 son monitoreadas en esta escala. Los habitantes que se mueven a través de las áreas de la ciudad, o que viven cerca de las carreteras principales, están expuestas a MPS que podría estar adecuadamente caracterizado por las medidas realizadas en esta escala espacial. Las medidas de este tipo podrían ser apropiadas para la evaluación a escala real de los posibles efectos del MPS sobre la salud de la población. Esta escala también incluye las concentraciones características de otras áreas con dimensiones de unos pocos cientos de metros, como son los estacionamientos y calles peatonales de los grandes centros comerciales, estadios, edificios de oficinas, calles sin pavimentar o estacionamientos poco aseados (polvorientos) asociados a estas fuentes, podrían ser una importante contribución a las fuentes móviles.

3. **Escala vecinal:** esta categoría define las concentraciones encontradas en áreas extensas de una ciudad, que poseen una relativa uniformidad, cuyas dimensiones van desde los 500 m a los 4 Km. Para el caso del MP10, esta uniformidad se extiende a la homogeneidad en el uso del suelo (Ej. terrenos agrícolas) y a las características de la superficie del suelo. En algunos casos una cuidadosa selección de esta escala vecinal, podría representar eventualmente a otro sector similar de la ciudad. Estaciones de este tipo proporcionan una buena información acerca de las tendencias y cumplimiento de las normas, ya que éstas a menudo representan las condiciones en áreas donde la población comúnmente vive y trabaja. Esta categoría incluye barrios comerciales e industriales, como también residenciales.
 Datos obtenidos en esta escala podrían proveer de información valiosa para el desarrollo, comprobación y revisión de los modelos que describen los patrones de concentración a gran escala, especialmente aquellos modelos relacionados con el campo de la reducción de las emisiones a esta misma escala. Esta categoría permite ser usada también para comparaciones vecinales con o entre otras ciudades.

4. **Escala urbana:** esta categoría define en su totalidad las condiciones de una ciudad, con dimensiones que van desde los 4 a los 50 Km. Esta escala requiere usualmente la definición de más de un sitio de muestreo. Los muestreos realizados a esta escala podrían estar diseñados para determinar las concentraciones de MP10 en un área metropolitana. Y podrían ser usados tanto para determinar las tendencias de la calidad de aire como para diseñar las estrategias del control de la contaminación a gran escala.

5. **Escala regional:** define usualmente un área rural con una razonable homogeneidad geográfica, y se extiende desde los 10 a los cientos de kilómetros. Por esta razón las medidas realizadas a esta escala deberían ser más aplicables a áreas pobladas dispersas con una línea base razonablemente uniforme. Los datos así obtenidos podrían proporcionar información acerca de procesos de emisión, transporte y pérdida de MP10 a gran escala.

En la tabla 2.13 se han resumido estos criterios además de indicarse aproximadamente el número de estaciones de monitoreo permanentes requeridas para áreas urbanas que son representativas de las tendencias en la calidad del aire y de las características geográficas tanto nacionales como regionales, expresadas como concentración de MP10. Por ejemplo el número de estaciones de monitoreo para un área urbana que posee más de 1.000.000 de habitantes debe ser del orden de entre 2 a 10 estaciones, dependiendo ello del nivel esperado de MP10 para la zona en estudio, siendo de 2 a 4 para las áreas menos contaminadas y de 6 a 10 para aquellas con mayor concentración de MPS.(15)

Tabla 2.13 – Numero de estaciones por área

Nombre de la escala	Dimensiones	Población estimada	Conc. alta	Conc. media	Conc. baja
Microescala	0-100 m	< 100.000	-	-	-
Media	100-500 m	100.000-250.000	1-2	0-1	0
Vecinal	500-4000 m	250.000-500.000	3-4	1-2	0-1
Urbana	4-50 km	500.000-1.000.000	4-8	2-4	1-2
Regional	50- km	>1.000.000	6-10	4-8	2-4

2.4 Aspectos que influyen en la contaminación atmosférica de Chile

Todos los contaminantes del aire emitido por fuentes puntuales y distribuidas son transportados, dispersos o concentrados por condiciones meteorológicas y geográficas. El ciclo de estancia aérea se inicia con la emisión de los contaminantes, seguido por su transporte y difusión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo y del agua, y otros objetos, cuando son arrastrados de la atmósfera por deposiciones húmedas, o cuando escapan al espacio. En algunos casos los contaminantes son resuspendidos debido al efecto del viento.

En aquellas regiones donde las condiciones topográficas y meteorológicas conducen a la acumulación y concentración de los contaminantes, como en el caso de las ciudades de Los Ángeles o Santiago, los contaminantes pueden, como ya se ha mencionado anteriormente, acelerar el deterioro de los edificios y afectar la salud pública, así como a la vegetación del área.

En las grandes áreas urbanas, los contaminantes emitidos se dispersan sobre toda el área geográfica. Cualquier sitio dado dentro del área urbana recibe contaminantes en cantidades variables procedentes de las diversas fuentes, dependiendo de los vientos existentes, la presencia de edificios altos, etc. (11)

Desde un punto de vista antrópico se visualizan factores que inciden en la contaminación atmosférica que existe sobre un determinado lugar, entre estos se encuentran: el tamaño, forma y estructura de la ciudad, las áreas verdes, el volumen de la población, sus movimientos diarios y estacionales, así como las actividades que desempeña. En cuanto a los factores naturales que influyen en la contaminación atmosférica de una ciudad, los más importantes son la altitud-latitud en las que se encuentra emplazada, los centros de altas-bajas presiones, la cercanía al mar y la presencia de brisas costeras, el relieve que la circunda y su influencia sobre la dispersión de los contaminantes, y el tipo y localización de la cubierta vegetal.

2.5 Los casos de Valparaíso y Santiago

2.5.1 La contaminación atmosférica en Santiago

La dispersión de los contaminantes se realiza usualmente en una capa comprendida entre la superficie y una altura determinada por factores termodinámicos. Por ejemplo, la presencia de una capa de inversión térmica elevada, produce una barrera a la dispersión vertical de contaminantes. Este tipo de fenómeno es frecuente en el área de Santiago. La ocurrencia de episodios de contaminación (principalmente por PM10 y PM2.5, NO_x, SO_x y O₃) esta asociada directamente a condiciones meteorológicas adversas, correspondientes a poca ventilación de la cuenca, con una capa de mezcla reducida y vientos débiles.

Simultáneamente con el desplazamiento y mezcla de contaminantes con el aire del entorno, se producen transformaciones químicas y físicas que afectan la composición y las concentraciones. Los factores meteorológicos mas importantes en estos fenómenos incluyen la temperatura del aire, la humedad atmosférica, la radiación solar y las precipitaciones.(17)

a) Condiciones medias

La ciudad de Santiago de Chile se encuentra en una cuenca cerrada por cadenas montañosas en las cuatro direcciones: Cordillera de los Andes al este, cordillera de la Costa al oeste, cerros de Chacabuco al norte y angostura de Paine al sur. Los cerros en estas cadenas superan los 1000 m de altura sobre el nivel del mar.

El confinamiento lateral que producen las cadenas montañosas alrededor de la cuenca de Santiago debilita los vientos en los primeros cientos de metros sobre la superficie de la cuenca (la superficie de la ciudad varia desde los 400 a 700 m sobre el nivel del mar). Como en promedio el viento en la cuenca es débil (generalmente menor a los 3 m/s durante los meses de invierno) la dispersión de contaminantes depende de la intensidad de los movimientos verticales, y en consecuencia de la estabilidad atmosférica.

Los vientos locales, a su vez, están determinados por la brisa valle-montaña, la que se define por la pendiente y exposición de las laderas, además de la forma y dimensiones longitudinales. La rugosidad del terreno, es decir los accidentes geográficos que presenta un área, define la velocidad del viento y su dirección.

Mientras más caótico se presenta el relieve mayores obstáculos origina y por lo tanto genera comportamientos diferenciados.

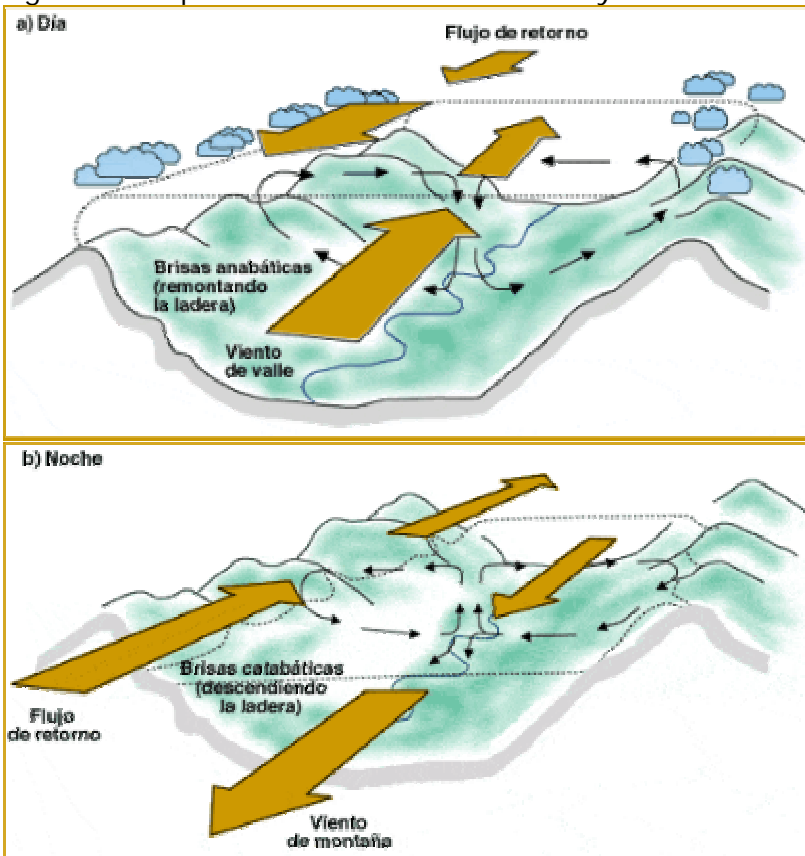
Los rayos solares inciden desigualmente en las laderas de las montañas y en los valles; asimismo, varían su ángulo de incidencia a lo largo del día según la trayectoria del sol. Esto genera un flujo de aire condicionado por los centros de alta y baja presión producidos por las diferencias térmicas diarias que se desarrollan entre el valle y las montañas.

En este caso, las laderas de solana se calientan más rápidamente que los fondos de valles de un cordón montañoso. El flujo de aire durante el día va desde el valle hacia las partes más altas, que hacen de centros de baja respecto a los fondos de valle. Esto es en dos sentidos: a lo largo del valle hacia los sectores superiores y desde el fondo del valle hacia las laderas.

En la noche se produce el enfriamiento rápido de las laderas respecto del valle y los vientos cambian. Las brisas ascendentes se llaman *anabáticas* y las descendentes *catabáticas*.

Estas ultimas producen calentamiento por compresión originando o intensificando los procesos de inversión térmica.(Fig. 2.1)

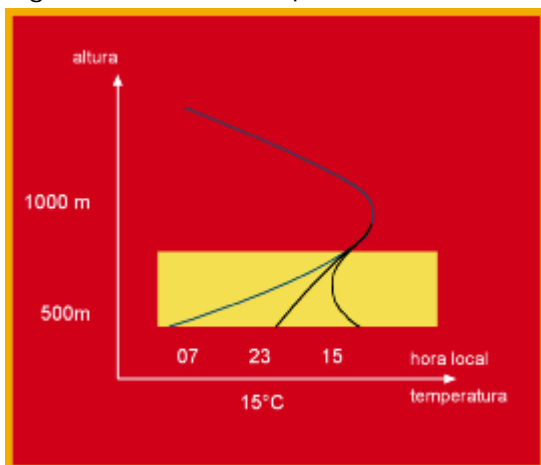
Fig. 2.1 – Esquema de brisas durante el día y la noche



(Fuente: (http://www.puc.cl/sw_educ/contam/index.html))

La Figura 2.2 muestra el perfil de temperatura sobre la ciudad de Santiago a distintas horas del día (este perfil comienza a los 500 m de altura, la altura media de la cuenca)

Fig. 2.2 - Perfil de temperatura sobre la ciudad de Santiago a distintas horas del día.

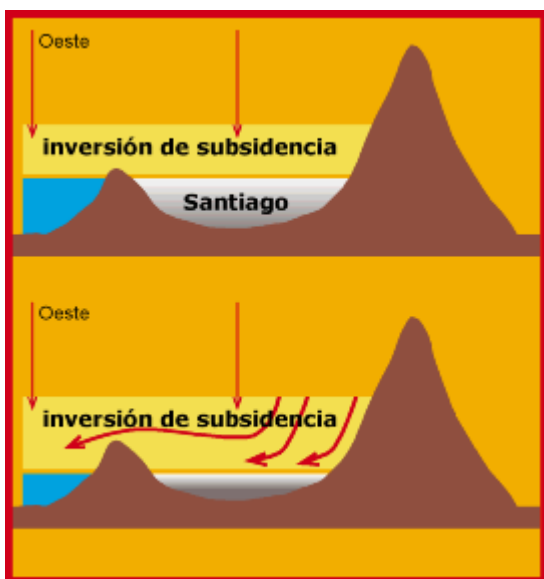


(Fuente: www.atmosfera.cl)

La parte baja de este perfil experimenta cambios a través del día a consecuencia del calentamiento / enfriamiento de la superficie de la cuenca. A las 11 PM, cuando el perfil sobre Santiago coincide casi completamente con el perfil costero. A medida que transcurre la noche, la superficie de la cuenca va perdiendo calor y el aire en contacto con ella se va enfriando. Así, temprano en la mañana (antes de la salida del sol, 7 AM), el aire más frío está en los niveles más bajos, y se observa una inversión térmica superficial que empalma más arriba con la inversión térmica de subsidencia. Una vez que sale el sol, la superficie de la cuenca comienza a calentarse, y el aire en contacto con ella aumenta su temperatura. Este calentamiento superficial va destruyendo la inversión térmica superficial, de manera que hacia las primeras horas de la tarde (3 PM) se desarrolla una capa superficial, denominada capa de mezcla, en que la temperatura decrece levemente con la altura, y que luego empalma con la inversión de subsidencia. Hacia el final de la tarde, la superficie comienza a enfriarse nuevamente y se tiende hacia el perfil nocturno.

La inversión superficial que se observa durante la mayor parte de la noche y madrugada produce una fuerte estabilidad, limitando severamente la dispersión de los contaminantes. Hacia el mediodía y primeras horas de la tarde, la dispersión es mayor debido al desarrollo de la capa de mezcla que es inestable. En invierno, cuando la radiación solar es débil, la altura de la capa de mezcla no supera los 400 m. Los gases y partículas contaminantes pueden dispersarse en la capa de mezcla, pero su transporte vertical está limitado por la presencia de la inversión de subsidencia. Además, como el tope de la capa de mezcla está aún por debajo de la altura de los cerros que cierran la cuenca de Santiago, no es posible que los contaminantes salgan de la cuenca lateralmente (Figura 2.3, panel superior).

Fig. 2.3 - Corte esquemático de la zona central a la latitud de Santiago. Panel superior: Condiciones medias invernales. Panel inferior: Condiciones durante episodios críticos de contaminación



(Fuente: www.atmosfera.cl)

Lamentablemente, los factores meteorológicos adversos a la contaminación (vientos débiles, inversión de subsidencia, inversión superficial), están presentes la mayor parte del tiempo en la zona central del país, de manera que las condiciones promedio en la cuenca de Santiago tienden a la acumulación de contaminantes. Es importante recordar que los factores meteorológicos solo modulan los niveles de contaminación, y son las emisiones las causantes reales del problema. Esto resulta claro cuando inspeccionamos como varía en el día la concentración de contaminantes en Santiago junto a la variación de la altura de la capa de mezcla (Fig. 2.4). Existen dos máximos en la concentración de contaminantes: uno temprano en la mañana y el otro (menos agudo pero más prolongado) al final de la tarde y comienzo de la noche. Ambos ocurren cuando existen máximos en la emisión de contaminantes y la altura de la capa de mezcla es muy baja. Durante el mediodía, hay una leve mejoría en la concentración de contaminantes debido en gran parte al desarrollo de la capa de mezcla.(17)

Fig. 2.4 - Variación diaria de la concentración de contaminantes y altura de la capa de mezcla. La barra inferior indica la tasa de emisión de contaminantes



(Fuente: www.atmosfera.cl)

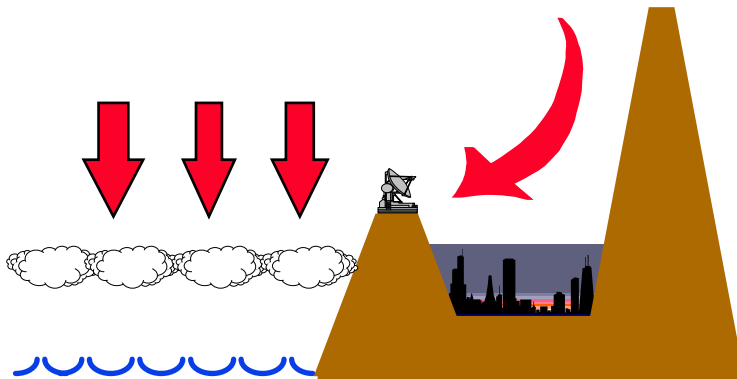
b) Episodios críticos

Por último veamos que sucede durante los episodios críticos de contaminación. Estos episodios se presentan varias veces (principalmente) durante los meses de invierno, con una duración de 2 a 3 días. Como los niveles de emisión de contaminantes son más bien uniformes en el tiempo (aproximadamente iguales todos los días), la causa de estos episodios es la intensificación de alguno de los factores meteorológicos adversos para la dispersión de contaminantes. Durante estos episodios, el viento del este desciende desde la cordillera de los Andes hacia el valle central y la costa. El aire al descender se calienta por compresión, intensificando la inversión térmica de subsidencia. En estas condiciones, la capa de mezcla que tiende a desarrollarse durante el día por efecto del calentamiento superficial, ve su crecimiento disminuido por la fuerte estabilidad que debe vencer. Si durante un típico día de invierno la altura máxima de la capa de mezcla es de unos 400 m, durante los días con viento del este la altura máxima no supera los 200 m sobre la superficie de la cuenca. (Fig. 2.3, panel inferior).

Esta reducción en la altura de la capa de mezcla produce una disminución del volumen de aire en el cual los contaminantes pueden ser dispersados, y en consecuencia el aumento en la concentración de contaminantes en el aire de la ciudad y zonas cercanas. El calentamiento asociado al viento del este también hace disminuir la presión atmosférica a lo largo de la costa, produciendo una baja o **vaguada costera** (Fig. 2.5 y Fig. 2.6).

El término de estos episodios ocurre cuando el viento cambia del este (viento cordillerano) a oeste (viento costero). El viento del oeste transporta aire más frío y húmedo desde la costa (algunas veces acompañado de niebla y nubes bajas), que debilita la inversión térmica y facilita la dispersión de contaminantes en la cuenca.

Fig. 2.5- Ingreso de una vaguada costera al valle de Santiago

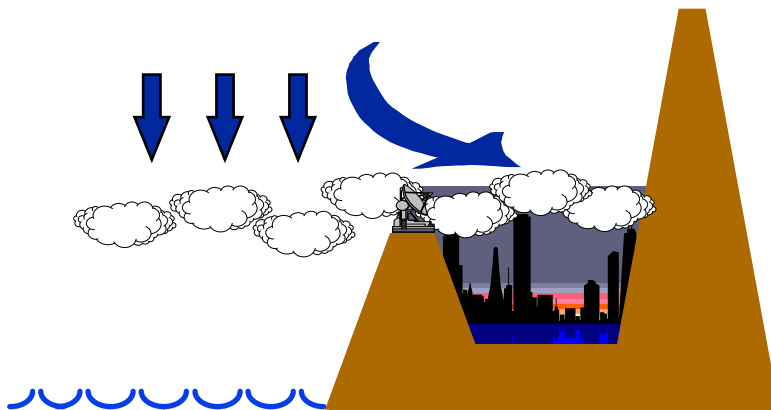


(Fuente: www.atmosfera.cl)

Nota:

El ingreso de la vaguada sobre el valle provoca: reforzamiento de la inversión térmica, disminuye la humedad del aire, genera viento del Este que provoca acumulación en el sector poniente del valle de Santiago.

Fig. 2.6 – Termina del paso de una vaguada costera por el valle de Santiago



(Fuente: www.atmosfera.cl)

Nota:

El término del paso de la vaguada sobre el valle provoca: ingreso de nubosidad costera hacia el valle, disminuye la temperatura, genera viento del oeste y disminuye los contaminantes al renovarse el aire.

2.5.2 La contaminación atmosférica en Valparaíso

La ciudad de Valparaíso (Capital Regional) se ubica entre los paralelos 32° y 34° Latitud Sur, en la Zona central de Chile, limitando al norte con la ciudad de Viña del Mar y al sur con la provincia de San Antonio. Valparaíso concentra casi el 50% de la población regional. Tiene una superficie territorial de aproximadamente 400 Km² con una población total de 270.242 habitantes (censo 2002). Valparaíso ocupa una superficie aproximada de 31,1 Km², de la cual 1,83 Km² corresponden al plan de la ciudad. Característica de la ciudad de Valparaíso es el emplazamiento de los habitantes sobre los cerros (terrazas marinas) con una escasa planificación, superando incluso las dificultades del relieve el cual se destaca por la presencia de quebradas profundas y laderas escarpadas donde se distinguen 32 cerros o espolones (94% del territorio urbano), que se alzan sobre el denominado plan de Valparaíso, lugar donde se desarrollan las actividades de servicio y comerciales más importantes de la ciudad y por ende, está allí el mayor flujo vehicular como es la Avenida España con 70.000 vehículos por día. (18) La actividad económica de la ciudad de Valparaíso, está fuertemente influenciada por la actividad portuaria.

- **Antecedentes climáticos**

Respecto a los patrones climáticos, la ciudad de Valparaíso se encuentra bajo el régimen climático regional el que en general se ajusta a la variedad climática denominada Templado Mediterráneo. Presenta un clima de tipo templado lluvioso con marcada variabilidad anual, donde se reconoce una estación seca prolongada que en promedio alcanza entre siete u ocho meses y una estación lluviosa de cuatro o cinco meses de duración.

Se presentan temperaturas medias anuales de 14,8 y 12,9 °C, con al menos cuatro meses con temperaturas medias superiores a 10°C lo que se ajusta a la clasificación de referencia.

El clima del litoral central de Chile obedece a un régimen de radiación denominado de latitudes medias y una alta influencia del Anticiclón del Pacífico Sur-Oriental, acompañada de la interacción océano atmosférica fría de la corriente de Humbolt que determina la existencia de una banda de bajas temperaturas en las vecindades de la costa, lo que contribuye al descenso de las temperaturas continentales debido al enfriamiento de las masas de aire que penetran al continente. En esta zona de características marítimas, es típica la presencia de nubosidad tipo estratocúmulo asociado al predominio anticiclónico sobre el borde costero.

La zona costera de Valparaíso presenta vientos de marcado ciclo diario con dirección norte y mínimos de intensidad cerca de las 8 a 9 AM hora local, los vientos máximos se han observado entre las 15 y 18 PM hora local con dirección predominante suroeste y una intensidad que fluctúa entre los 15 a 20 nudos (8 a 10 m/s) (19).

Las variaciones locales de temperatura del aire fluctúan entre los 14 y 15 C° como promedio, alcanzando máximas de entre 17 a 18 C° cerca de las 14 horas. hora local (12 UTC). La máxima radiación solar incidente se produce durante los meses de primavera y verano, alcanzando su máxima intensidad en diciembre con cerca de 557 cal/cm² y un mínimo de 304 cal/cm² en el mes de Septiembre.

Hacia mediados de Abril se presenta el primer período de “mal tiempo” con la aparición de precipitaciones intensas debido a la incursión de bandas frontales asociadas a perturbaciones ciclónicas provenientes del oeste.

Un segundo período de inestabilidad atmosférica aparece a mediados de Junio con precipitaciones irregulares y de bajo monto. Entre los meses de Julio y Agosto se presenta un tercer período de inestabilidad atmosférica caracterizado por temporales de viento y lluvia entre períodos de “buen tiempo” debido a las apariciones cíclicas de los sistemas ciclónicos.

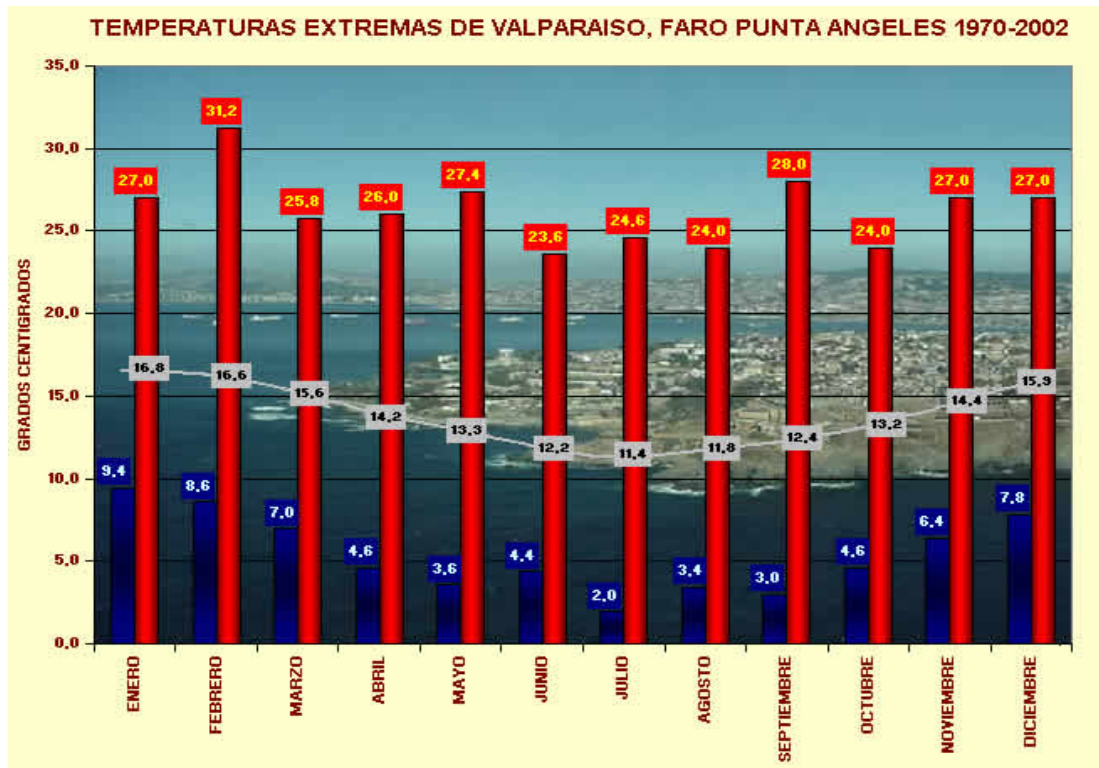
A partir del mes de Octubre el tiempo atmosférico se caracteriza por cielos despejados producto de la influencia del anticiclón que nuevamente se desplaza hacia el sur advectando aire húmedo y estable hacia el continente. Este tipo de circulación favorece la formación de nieblas, especialmente si el aire húmedo atrapado bajo la inversión de subsidencia se desplaza sobre la superficie fría. Estas nubosidades bajas se disipan al correr del día por efecto de vientos predominantes del sur y sur oeste (S y SW).(19)

- **Temperaturas**

Las temperaturas en la región se consideran moderadas manifestándose las más bajas entre los meses de mayo y agosto. Las temperaturas más altas corresponden a enero con una media de 16.8° C y las menores en el mes de julio con una media de 11,4° C (19).

La cercanía al mar y la mayor cantidad de vapor de agua disponible en la atmósfera, evitan extremos mayores y exagerados de temperatura. La humedad se considera un moderador térmico debido a la alta capacidad del agua de conservar energía como calor (capacidad calórica). Las extremas térmicas regionales son el producto de la presencia ocasional de masas de aire cálidas de origen tropical-océnico y del noroeste argentino, o de masa de aire polares de invasión sur-suroeste. En el primer caso la presencia de la onda calórica no dura más de 48 horas, sin embargo, las masa de aire frío polar pueden permanecer más de una semana, o incluso sufrir una detención mayor en la región por su alta densidad y lento desplazamiento.

Fig. 2.7 - Temperaturas Promedio Mensuales



- **Precipitaciones**

La V Región de Valparaíso presenta características pluviométricas irregulares, existiendo períodos de mucha abundancia e intensidad así como también períodos de escasez y moderación. Este comportamiento se ajusta típicamente a climas templados, el promedio para la región es de 400 mm anual, y específicamente para Valparaíso es 372,5 mm. (19) Las lluvias varían tanto en su ciclo anual como en su ciclo diario o mensual, identificándose períodos estacionales, con un verano sin precipitaciones o muy escasas, y un período otoño invernal, donde se concentra aproximadamente el 64% de las precipitaciones del año. Estas son características propias del clima templado mediterráneo. Las precipitaciones regionales presentan marcadas diferencias también entre los distintos puntos geográficos.

La geografía de la región y el factor relieve, provocan las alteraciones más exageradas. La característica de las precipitaciones en la región es la concentración en pocas horas (no más de 12, típicamente 6 horas promedio), siendo de tipo moderado a débil alcanzando como promedio 35 mm en 24 horas. En forma excepcional, bajo condiciones de temporal de viento, se puede presentar precipitaciones en forma violenta e irregular. Estos temporales, no más de 2 o 3 por año, se presentan generalmente a partir de la última semana de junio y no más allá del mes de septiembre.

Las precipitaciones regionales, son exclusivamente frontales, originadas sobre el océano y con desplazamiento hacia el continente. Chile central no presenta precipitaciones de tipo convectivo ni orográfico, ya que en la región no se dan las condiciones ni de calentamiento ni de humedad suficiente para que se produzcan precipitaciones de tipo convectivo, como sucede en los climas tropicales. En cuanto a las orográficas, los sistemas frontales vienen configurados ya, sobre el mar, y la orografía sólo produce un efecto de acentuación de las precipitaciones. Las precipitaciones de tipo frontal son provocadas por frentes cálidos y/o fríos. En el mismo caso, los frentes cálidos provocan precipitaciones suaves y en general sin presencia de vientos las que tienen una duración de 10 a 12 horas, en situación de frente frío, la precipitación es precedida por vientos de dirección norte permaneciendo sobre la región un promedio de 6 horas, estas lluvias son de moderadas a fuertes.

La concentración otoño-invernal de las precipitaciones muestra especialmente la mayor cantidad en los meses de junio y julio, siendo éste último el mes más lluvioso con un total del 26,7% del agua caída. Los meses de mayo y agosto le siguen en importancia, con un 16% cada uno. Los meses de enero, febrero, marzo y diciembre no logran alcanzar más allá del 1% de las precipitaciones anuales. (19)

En la zona central de Chile, el debilitamiento del anticiclón del Pacífico Sur, permite la acción de las perturbaciones frontales a partir de los meses otoñales. Después del mes de septiembre esta alta presión se opone al paso de los sistemas frontales, los que se desplazan hacia la zona sur y austral del territorio.

- **Masa de aire y vientos regionales**

La región en estudio está típicamente afectada por una masa de aire de temperaturas moderadas (10 a 22 °C) originadas sobre el océano la que es reemplazada por episodios de ingresos de masas de aire tropicales marítimas o tropicales continentales. En el primer caso la región aumenta su humedad y su temperatura costera hasta los 27°C (Valparaíso). En el segundo, aumenta la temperatura a valores similares, pero la humedad relativa no asciende, debido a la característica cálida y seca de éstas masas de aire provenientes del noreste de Argentina.

Estas masas aumentan la temperatura en las áreas interiores de la región por sobre los 34° C. Tratándose de masas bastante livianas, su paso por la V Región es rápido, no durando sus efectos más de 48 horas. Estas situaciones se pueden presentar en cualquier momento del año, pero con mayor frecuencia en los meses de verano.

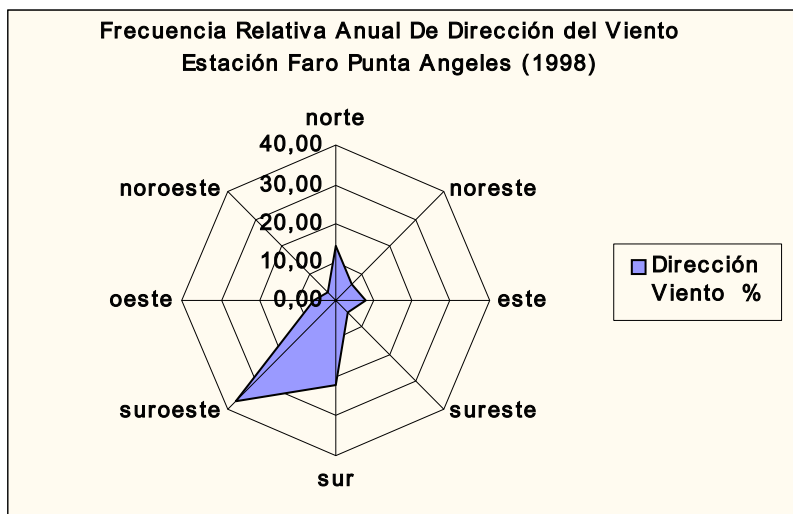
En los meses entre mayo a octubre, la región se ve afectada por masas de aire frías y húmedas de origen polar. Estas se desplazan sobre el océano, son de movimientos lentos y, por lo tanto, pueden permanecer en el área por varios días (máximo 10). El fenómeno es netamente invernal y las temperaturas del sector costero pueden llegar en algunos sectores a valores bajo 0° C. La región se caracteriza por el predominio de vientos anticiclónicos de dirección sur y suroeste, de características oceánicas. En invierno este predominio se ve reducido por la aparición de vientos de dirección norte y noroeste producto de la inclusión de sistemas frontales.

La intensidad de los vientos presenta un marcado ciclo diurno-nocturno. Predominan a las 8 AM los estados de calma atmosférica en el sector costero Valparaíso-Quintero, lo que responde a una dinámica propia del área, sin embargo, pasado este horario, los registros pierden su similitud alcanzando intensidades medias de 12 nudos (6 m/s) y 9 a 10 nudos (4,5 a 5 m/s) a las 20 PM. Durante el periodo invernal se observa un aumento en la frecuencia de vientos de dirección norte y noroeste que son típicos durante el paso de un sistema frontal, sin embargo, debido a su breve presencia, no alcanza a figurar en los valores medios predominantes, en especial en el sector costero.

En cuanto a la intensidad media de los vientos, ésta es considerablemente más alta en el borde costero que en el resto del territorio por motivos geofísicos.

Respecto a mediciones locales, están poco estudiados. Sin embargo, observaciones preliminares y observaciones efectuadas en algunos sectores de la región permiten reconocer este fenómeno. (19)

Fig. 2.8 - Frecuencia Relativa Anual de Dirección del Viento Estación Faro Punta Ángeles



Las brisas costeras

Existe una desigual conducta térmica de las aguas y de la tierra. Mientras las tierras absorben y pierden energía muy rápidamente, las aguas lo hacen a una velocidad menor. Esto se debe a que las aguas poseen un calor específico más alto y es necesario consumir mayor cantidad de energía para elevar su temperatura. Las tierras se enfrían más rápido ya que tienen un mayor poder de emisión.

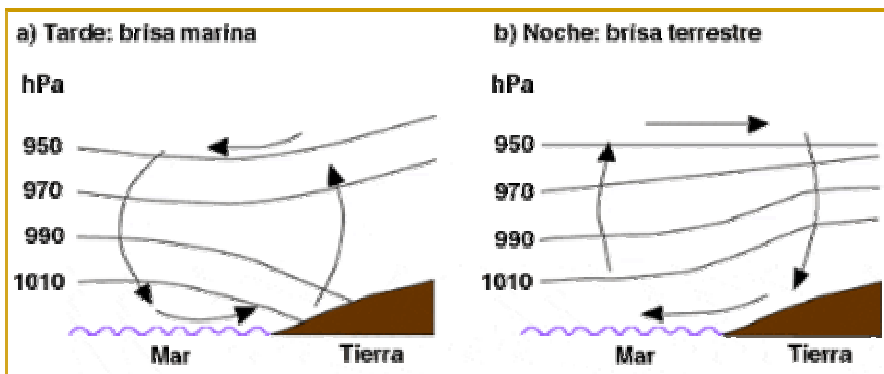
Todo lo anterior genera un flujo de aire condicionado por los centros de alta y baja presión producidos por las diferencias térmicas diarias que se desarrollan en el mar y la costa.

De esta manera, durante el día el continente se calienta más rápido que el mar generando un centro de baja que condiciona un viento hacia el interior. En la noche, se produce el fenómeno inverso ya que la tierra irradia el calor acumulado durante el día y el mar presenta temperaturas más elevadas, atrayendo hacia sí el centro de baja. Consecuentemente, el viento cambia y se dirige del continente al mar.

Otro factor importante es que la diferencia térmica entre el mar y la tierra es mayor durante el día; por lo tanto, los vientos diurnos son de mayor magnitud que los nocturnos. Sólo al amanecer los vientos tierra-mar adquieren mayor fuerza al aumentar las diferencias térmicas de ambos accidentes geográficos.

El fenómeno de las *brisas costeras* puede ser alterado por distintas causas, especialmente ante la presencia de frentes u otras perturbaciones. (Fig. 2.9)

Fig. 2.9 – Esquema de brisas costeras



(Fuente: (http://www.puc.cl/sw_educ/contam/index.html))

Cuando una ciudad se encuentra en un área limitada total o parcialmente por montañas (como es el caso de Santiago), la inversión térmica hace el efecto de una "tapa de olla" que no permite la salida de los contaminantes del área urbana; si el fenómeno se produce en ausencia de vientos, el problema se agudiza.

2.5.2.1 Antecedentes sobre emisiones y calidad del aire en la V Región

- Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión se han caracterizado en cuatro grandes grupos: hornos de panaderías, calderas de calefacción, calderas industriales y procesos industriales. Las estimaciones acerca de la distribución de estas fuentes determinan un número de 234 fuentes entre las ciudades de Viña del Mar y Valparaíso, de donde el 69,2% corresponden a industrias. Se estimó para Valparaíso una emisión de fuentes fijas de 18,82 Ton/año de PM10 provenientes principalmente de la refinería de petróleo de Concón y del complejo industrial Ventanas (fundición y refinería de cobre Ventanas y termoeléctrica)(20)

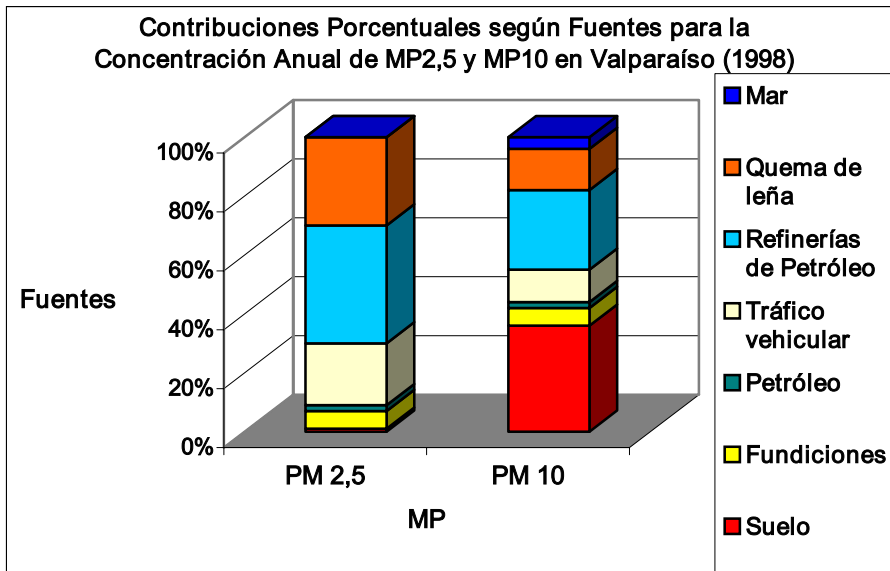
Respecto a las fuentes móviles, a continuación se presenta el resumen estimado para la ciudad de Valparaíso:

Tabla 2.14 - Resumen de Emisiones de Fuentes Móviles (Toneladas / año) en la Comuna de Valparaíso durante 1999

Tipo	Cantidad	Km/año	toneladas/año		
			PM10	SO ₂	NO ₂
Autos catalíticos	10.500	20.000	2,09	39,89	138,60
Autos no catalíticos	22.880	20.000	27,46	86,93	777,91
Taxis catalíticos	463	120.000	0,55	10,54	36,65
Taxis no catalíticos	2.125	120.000	15,29	48,43	433,48
Buses	2.100	140.000	529,19	332,19	1687,52
Camiones	3.978	80.000	407,31	540,99	3977,97
Total	42.046	500.000	981,89	1058,97	7052,13

En la Fig. 2.10 se observa que el 60% de las fuentes de emisión de Valparaíso utilizan combustibles que corresponden a los denominados combustibles "sucios", es decir, combustibles como leña, petróleo y sus derivados (bencina, parafina, etc.). Como ejemplo de esto está un catastro realizado al combustible utilizado en las panaderías de las provincias de Quillota y Valparaíso indicó la siguiente distribución : 4,5% eléctrico, 5,5% petróleo, 12,5% derivados del petróleo, 37% gas licuado y 40 % leña. (21)

Fig. 2.10 - Contribuciones Porcentuales Según Fuentes de Origen para la Concentración Anual de PM2,5 y PM10 en la Ciudad de Valparaíso



- **Concentraciones de PM2.5 y PM10 en la ciudad de Valparaíso**

Los orígenes del Material Particulado en la ciudad en general se asocian al impacto directo de los motores de los vehículos pesados tanto de la movilización colectiva como de camiones. Cabe destacar que existe una importante contribución de las fuentes de azufre, 27% para el PM10 y un 40% para el PM2.5.

En cuanto a la media aritmética anual de las concentraciones de PM2.5 y PM10 de la ciudad de Valparaíso, estas fueron un 55% y 138% respectivamente, más altas que la norma norteamericana de la Agencia para la Protección del Medioambiente. Esto se puede apreciar en la tabla 2.15. (21)

Tabla 2.15 - Concentraciones anuales de PM2.5 y PM10 para la ciudad de Valparaíso (1998).

MP($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración anual Valparaíso	Norma de referencia (EPA)	% de Superación
PM2.5	37,5±1,8	15	250
PM10	77,5±2,7	50	155

Tabla 2.16 - Contribución porcentual de fuentes al Material Particulado en la Ciudad de Valparaíso (1998)

Fuente	PM 2,5	PM 10
Suelo	1%	36%
Fundición	6%	6%
Petróleo	2%	2%
Tráfico vehicular	21%	11%
Fuentes de azufre (refinerías)	40%	27%

2.6 Métodos pasivos de recolección de contaminantes atmosféricos

Tanto el análisis de los contaminantes gaseosos más comunes, como la especiación de otros compuestos químicos en muestras atmosféricas demandan altos costos y mucho tiempo. Además, el éxito de los resultados depende de las capacidades del personal y de la calidad y tipo de infraestructura para procesar y analizar las muestras colectadas, lo que también implica producir gran cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos resultantes de los análisis de laboratorio. Por ello sería deseable tener algún método objetivo que permita identificar y seleccionar sólo aquellas muestras atmosféricas que permitan obtener información valiosa sobre la calidad del aire en un determinado momento. Esto permitiría, por una parte, ahorrar gran cantidad de trabajo, tiempo y recursos, y por otro, tener un método preliminar que permita evaluar una situación de riesgo en forma rápida, corroborando y completando posteriormente la información con un análisis más acabado de las muestras en cuestión.

Debido a lo anterior es que se han desarrollado métodos que hagan viable un monitoreo de la calidad atmosférica tanto en un sentido práctico como económico. Para ello se ha recurrido a formas menos costosas y fáciles de ejecutar como son los métodos de monitoreo pasivo.

Tabla 2.17 - Comparación entre Métodos de Monitoreo Pasivo y Activo

Métodos Pasivos	Métodos Activos
Manejo simple	Manejo más complejo
Menor costo de adquisición y operación	Costo de adquisición y operación elevado
No necesitan calibración periódica	Calibración periódica
No necesitan estación de monitoreo para operar	Necesitan estación de monitoreo para operar
No necesitan una fuente de energía	Necesitan una fuente de energía

Los métodos pasivos y activos tienen propósitos distintos y complementarios, pudiéndose usar en forma simultánea o separada, para adquirir información sobre la calidad del aire.

2.6.1 Aspectos Importantes de los Métodos Pasivos de recolección de DT, DS y DH.

El diseño de un sistema de recolección pasivo de deposiciones totales, secas y húmedas debe considerar diversos factores. Uno de ellos es disponer de una gran superficie de recolección o de adsorción/absorción que no limite la obtención de una buena cantidad de material de muestreo.

Además es de gran importancia que los materiales ocupados en la construcción del colector posean una inercia química frente a posibles reacciones con las especies químicas a colectar.

Los Métodos Pasivos también deben contar con una validación y homologación de sus características mediante materiales de referencia o con otros métodos de recolección, ya sean estos pasivos o activos los cuales están previamente validados y reconocidos.

Para poder obtener una muestra representativa, se debe poner especial cuidado en el diseño del colector ya que esto la afecta directamente, tanto para la fase líquida como para la sólida, es decir, que permita la acumulación tanto de sólidos como líquidos.

Asimismo hay que tomar las precauciones necesarias para evitar cambios químicos o físicos que pueden ocurrir durante el tiempo en que las muestras permanecen en los recipientes y conexiones del colector durante el periodo de muestreo.

Relacionado a lo anterior, también están los efectos debidos a la lixiviación o adsorción de sustancias químicas desde y/o hacia las superficies del colector de muestras durante el período de muestreo, los efectos debidos al tiempo de duración del intervalo de recolección (días, semanas o meses) y las alteraciones de la muestra debido a reacciones fotoquímicas o a interacciones con otros gases atmosféricos como NO₂, SO₂, O₃, peróxidos orgánicos, etc.

Un tipo de método pasivo de recolección de material particulado sedimentable son los *Colectores pasivos de deposición total* (CPDT). El diseño de estos colectores, que fueron los ocupados en este trabajo, esta basado en el colector tipo Forschungszentrum Jülich (Alemania), el cual fue modificado en el Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Técnica Federico Santa Maria. Dos fueron las modificaciones que sufrió el diseño original:

- 1) se cambio la frita de ceramica por una de teflon para evitar la absorcion de parte de los iones de la muestra, y
- 2) se agregó un filtro de poliamida para poder realizar la separacion entre las fases solida y liquida

Estos CPDT están construidos en materiales que son inertes para los contaminantes objetos del estudio. Entonces, para la elección de los materiales se debe definir si la recolección de las muestras será para especiación de compuestos orgánicos o inorgánicos, así como también la cantidad necesaria de muestra a obtener.

Por lo tanto, el diseño de CPDT debe considerar como mínimo las siguientes partes:

- Un embudo que permita captar el material particulado
- Un recipiente recolector para la fase líquida con capacidad suficiente para soportar eventos de deposición húmeda de cualquier intensidad
- Un sistema de filtración, para separar la fase líquida de la sólida
- Un soporte inerte para sujetar el sistema de recolección
- Una malla de protección para el embudo recolector que evite la entrada de pájaros e insectos, así como otras obstrucciones menores
- Materiales de fabricación resistentes a las condiciones de campo

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar la data histórica de la deposición total, seca y húmeda y la influencia de las variables meteorológicas y climatológicas en los resultados de estas mediciones para el período comprendido entre 1999 a la fecha. Evaluando a la luz de estos resultados la efectividad de los procesos de deposición antes señalados en la limpieza del aire de las ciudades de Valparaíso y Santiago.

3.2 Objetivos específicos

- 3.2.1 Monitorear la deposición total, húmeda y seca con el colector modificado y validado, siguiendo, de esta manera, con el estudio de la calidad del aire en la ciudad de Valparaíso.
- 3.2.2 Revalidar las metodologías de extracción del material particulado obtenido en las deposiciones total, seca y húmeda.
- 3.2.3 Comparar los resultados existentes de los monitoreos mensuales v/s semanales de deposición total, seca y húmeda.
- 3.2.4 Comparar y analizar los resultados obtenidos en las mediciones de calidad del aire respecto a las mediciones de deposición total, seca y húmeda, entre las ciudades de Valparaíso y Santiago para aquellos periodos coincidentes en la toma de muestras.
- 3.2.5 Evaluar a la luz de los resultados de las campañas de monitoreo realizadas en Valparaíso como en Santiago, la efectividad de los procesos de deposición total, seca y húmeda como mecanismos de limpieza de la atmósfera en estas ciudades.

4. HIPÓTESIS

¿Son los procesos de deposición total, húmeda y seca mecanismos eficientes de depuración de la atmósfera?.

5. DESARROLLO

5.1 Equipos, Materiales y Reactivos

5.1.1 Equipos

- Campanas extractoras (2), marca Quimis (Brasil)
- Congelador modelo 280, marca Whirpool (Chile)
- Refrigerador modelo 380, marca Cónsul (Chile)
- pHímetro y conductímetro modelo Multilab P4, marca WTW (Alemania)
- Estación meteorológica CR10X, marca Campbell (USA)
- Deshumidificador 160, marca ARSEC (Brasil)
- Balanza BP211D, marca Sartorius (Alemania)
- Acondicionador de aire Carrier 420, marca Carrier (Corea)
- Sistema Antiestático BF2-1000, marca Staticmaster (USA)
- Sistema Antiestático IB8, marca Sartorius (Suiza)
- Sistema Antiestático Mettler Toledo Serie 38474 (Alemania)
- Termohigrómetro, marca Control Company (China)
- Horno Microondas 23E-3, marca LG Sindelen (220v 8A 50Hz, consumo 1350 W, potencia de salida 850 W, frecuencia de microondas 2450 MHz (Chile)
- Ultrapurificador de agua, marca Kürner (Alemania)
- Rotavapor Laborota 4001, marca Heidolph (Alemania)
- Regulador de tensión eléctrica Mes 1000, marca Messener Emtronic (Alemania)
- Manta Calefactora Thermolyne Cimarec-3 (Inglaterra)
- Baño ultrasónico Ultrasonic LC 30 H, marca Elma (Alemania)

5.1.2 Materiales

- Filtro de membrana de poliamida (FMPA), 47 mm de ϕ y 0,45 μm ϕ de poro, Firma Sartorius AG. 37070 Goettingen (Alemania)
- Probetas (250 ml), marca LMS (Alemania)
- Botellas (1000 ml), marca Schott Duran (Alemania)
- Vasos precipitados (200/500 ml), marca Schott Duran (Alemania)
- Botellas (5000 ml), marca Schott Duran (Alemania)
- Pizetas (250 ml), marca Azlon (Inglaterra)
- Botellas de polietileno de alta densidad (1,5 lt), marca Hadad (Chile)
- Embudos de polietileno de alta densidad importados desde el Instituto de Físicoquímica Aplicada, Jülich (Alemania)
- Colectores Pasivos de Deposición Total (CPDT), Modelo basado en el del Instituto de Físicoquímica Aplicada, Jülich (Alemania)
- Bureta de precisión (+/- 2.5 ml) No 2094, Pyrex (USA)

5.1.3 Reactivos

- n-hexano grado HPLC, marca J.T.Baker (USA)
- Tolueno grado pesticidas, marca J.T.Baker (USA)
- Acetona grado pesticidas, marca J.T.Baker (USA)
- Agua tridestilada (grado HPLC) producida en el Laboratorio de Química Ambiental
- Reactivo calibración conductímetro, marca Foodcare, Hanna Instruments (1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25° C) (Italia)
- Reactivo pHímetro HI7004 (pH 4.01 buffer solution, ± 0.01 pH 25° C/77° F) y HI7007 (pH 7.01 buffer solution, ± 0.01 pH 25° C/77° F), marca Foodcare, Hanna Instruments (Italia).
- Jabon libre de fosfatos Extran MA 03, marca Merck (Alemania)
- HCL grado P.A, marca Merck (Alemania)
- Etanol grado P.A, marca Merck (Alemania)

5.2 Metodologías

Para poder lograr una adecuada y correcta determinación de la deposición total de las muestras, se debe dar un tratamiento especial tanto en la toma y en el procesamiento de las muestras como previamente en la preparación del material a usar:

- Etapa de preparación del material a ocupar
- Toma de muestra
- Etapa de procesamiento de la muestra obtenida
- Medición de los parámetros fisicoquímicos como conductividad y pH

5.2.1 Metodologías de toma de muestra

1. Los puntos de monitoreo de deposición total, seca y húmeda (Fig. 5.1) fueron ubicados en el Torreón de la Universidad Técnica Federico Santa María que está directamente sobre la Avenida España a una altura de 14 m.s.n.m. y como punto de referencia la estación ubicada en la Torre del reloj del edificio central de la Universidad que está a 70 m.s.n.m. Ambos lugares de muestreo (Fig. 5.1B y 5.1C) se procuraron libres de obstáculos y cumplieron con las condiciones de posicionamiento que aparecen señaladas en los protocolos para toma de muestras obtenidos de los manuales de la Air Pollution Control Office (Oficina de Control de la Contaminación del Aire) de la EPA, en los manuales de la American Society for Testing Materials (ASTM) y en aquéllas publicadas por las directrices de la Agencia Medioambiental Europea que son algunas de las que se tomaron en cuenta para la realización de este trabajo.
2. Los CPDT (recién ensamblados en el laboratorio) destinados a coleccionar la deposición total y seca (Fig. 5.6) se colocan en las estaciones los días miércoles a las 09:30 AM y se dejan monitoreando durante 1 semana, al cabo de este tiempo son retirados y reemplazados por otros colectores limpios, las muestras recién obtenidas se llevan al laboratorio y se procesan para determinar los parámetros en estudio.

3. Para el caso de la deposición húmeda, se utilizan sistemas de recolección activos llamados Wet Only Colector (WOC) (Fig. 5.5) ubicados permanentemente en las estaciones y son retirados después de cada evento de precipitación, sus muestras son llevadas a laboratorio y analizadas en forma sistemática. Estos procedimientos se han repetido cada semana del año, durante todos los años que se ha mantenido el monitoreo atmosférico (desde 1999).
4. Durante los años 2002 y 2003 se realizaron monitoreos mensuales en las estaciones Torre y Av. España, de manera paralela a los habituales monitoreos semanales, con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre las cantidades de MP que recolectaban los CPDT con los distintos tiempos de exposición. (muestreos semanales y mensuales)
5. Entre los años 2001 y 2003 se realizaron campañas de monitoreo paralelo entre Santiago y Valparaíso en los periodos de invierno (utilizando dos estaciones de la Red MACAM-SESMA, Fig. 5.2), para ambos casos la metodología de toma de muestra fue la misma utilizada en las mediciones semanales y tuvieron la finalidad de ver si existían diferencias en la recolección de deposición seca y húmeda entre Valparaíso y Santiago, y los posibles eventos que las afectaban.

Fig. 5.1 Puntos de monitoreo de deposición total, seca y húmeda

Fig. 5.1A - Corte transversal de la UTFSM señalando las estaciones de monitoreo disponibles y las estaciones utilizadas en las campañas de monitoreo (encerradas con un círculo)

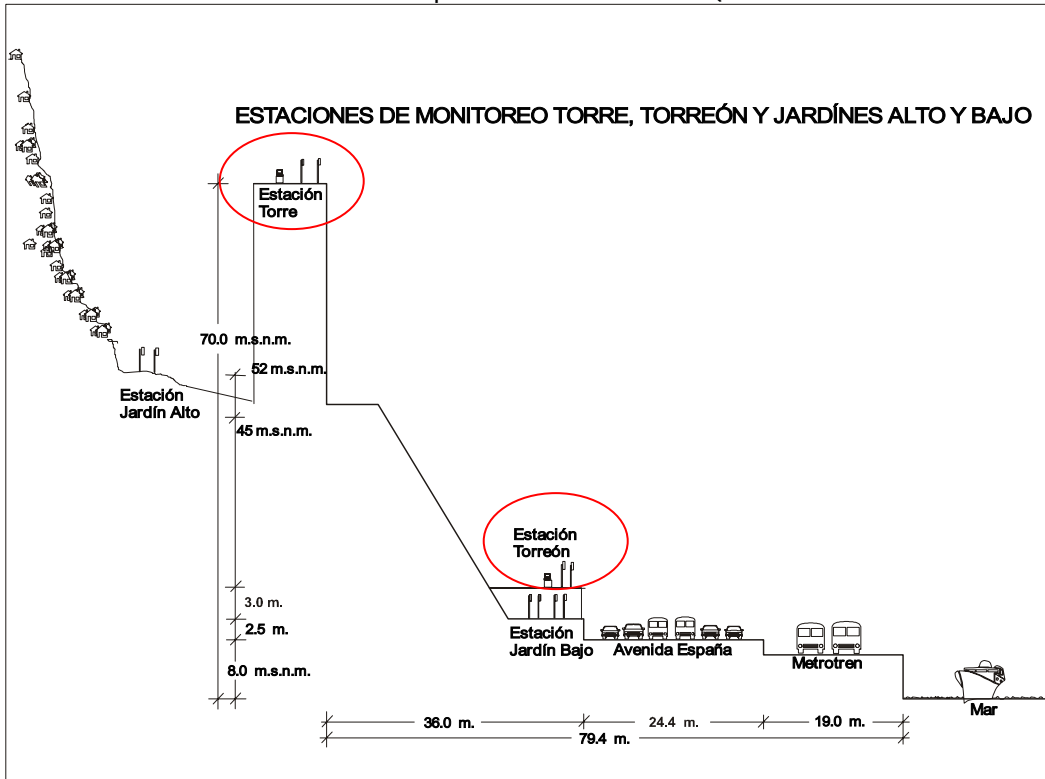


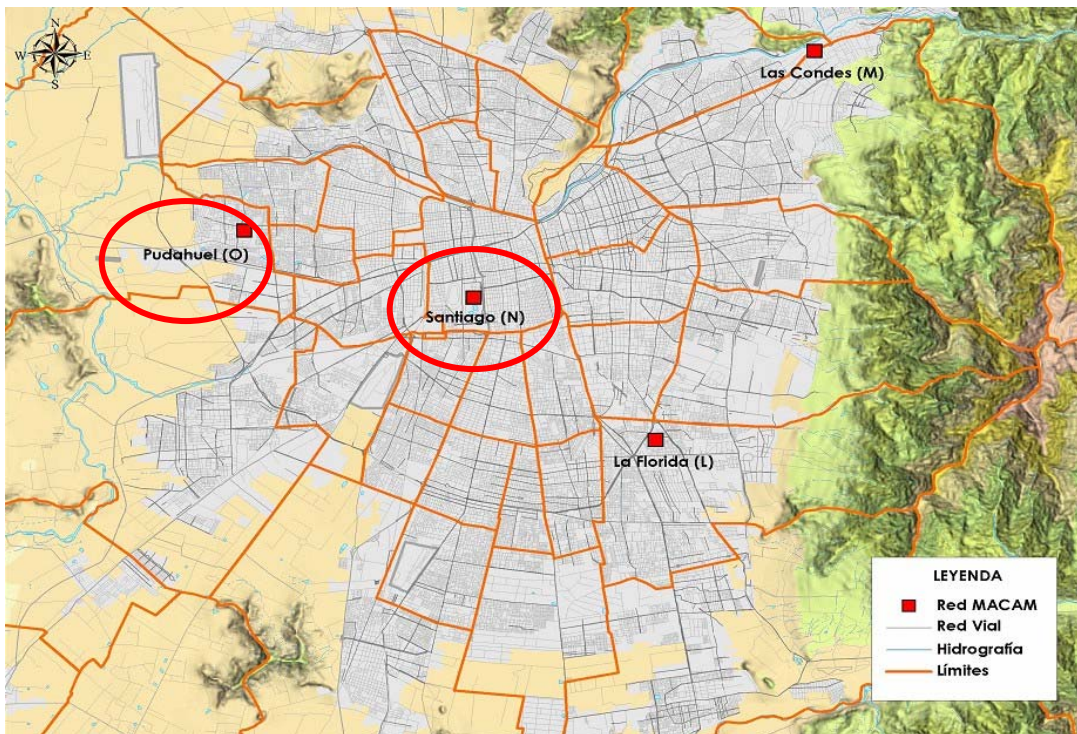
Fig. 5.1B - Estación Torreón de la UTFSM (izq.: vista aérea, der.: gabinete de protección de CPDT)



Fig. 5.1C - Estación Torre de la UTFSM (izq.: gabinete de protección de CPDT, der.: estación meteorológica)



Fig. 5.2 Estaciones Pudahuel y Parque O'Higgins de la Red MACAM-SESMA utilizadas en las campañas en paralelo Valparaíso – Santiago



Además de los equipos de recolección de material particulado con los que cuenta el Laboratorio de Química Ambiental en las estaciones de monitoreo, es importante señalar que en ellas existen también estaciones de monitoreo meteorológico (Fig. 5.3) y equipos de recolección de deposición húmeda, llamados Wet Only Collector (Fig. 5.5).

Las estaciones de monitoreo meteorológico fueron puestas en marcha a comienzos del año 2000 en un esfuerzo conjunto con el laboratorio de Evaluación Solar de la Universidad Técnico Federico Santa María.

En ambas estaciones se encuentran los siguientes equipos de medición meteorológica:

- Dataloger CR10X Campbell scientific, Inc. (Cuya finalidad es recolectar la data que entregan los instrumentos de la estación.)
- Pluviómetro Modelo 95 DE Hellmann, marca R. FUESS, Alemania.
- Pluviógrafo TE525 Tipping Bucket Rain Gauge, marca Campbell scientific, Inc., USA.
- Sensor de temperatura y humedad relativa CS500, marca VAISALA, Inc., Suecia.
- Sensor de presión barométrica CS105, marca Campbell scientific, Inc., USA.
- Anemómetro modelo 05103, R. M. Young company, USA.

Fig. 5.3 Izquierda: Estación de monitoreo meteorológico Campbell Scientific y Derecha: pluviógrafo estándar.



En la Fig. 5.4 se observa un esquema de la distribución de los aparatos de medición de la estación de monitoreo meteorológico Campbell Scientific, ubicadas en las estaciones Torre y Torreón de la UTFSM.

Cabe señalar que los colectores pasivos para la recolección de la deposición húmeda, denominados “Wet Only Collector” (WOC) poseen las mismas características estructurales y geométricas que los Colectores Pasivos de Deposición Total (CPDT) utilizados en este trabajo, a excepción del diámetro del embudo colector de polietileno, que en caso de los WOC es mayor (130 mm). Además como se observa en la Fig. 5.5, los WOC están montados dentro de una estructura cilíndrica protectora. Esta estructura posee un dispositivo electromecánico que permite la apertura de su tapa superior solo cuando se presenta un evento de precipitación, posterior al cual vuelve a su estado original (cerrado), permitiendo de este modo captar solamente la deposición húmeda sin contaminarla con la deposición seca.

Fig. 5.4 Esquema de la distribución de los aparatos de medición de la estación de monitoreo meteorológico Campbell Scientific

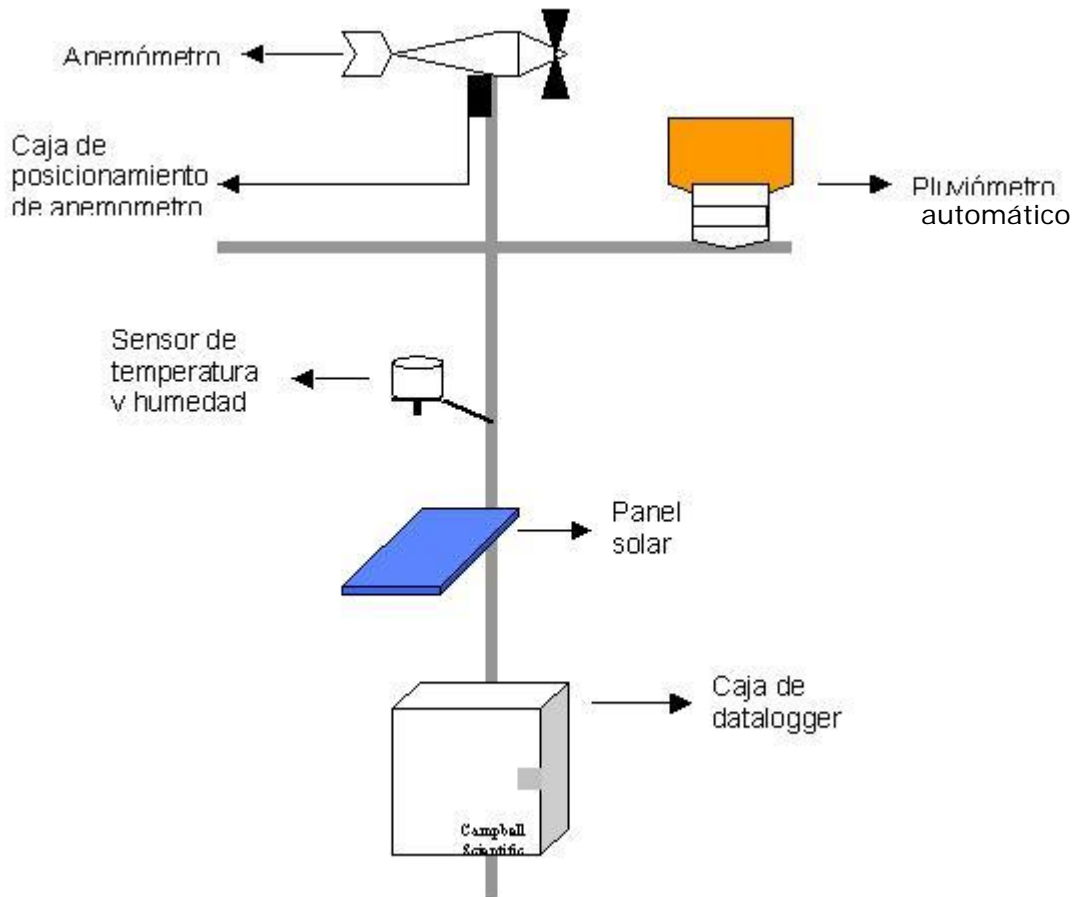
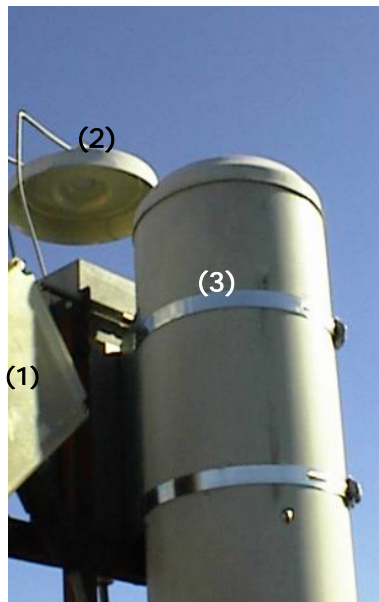
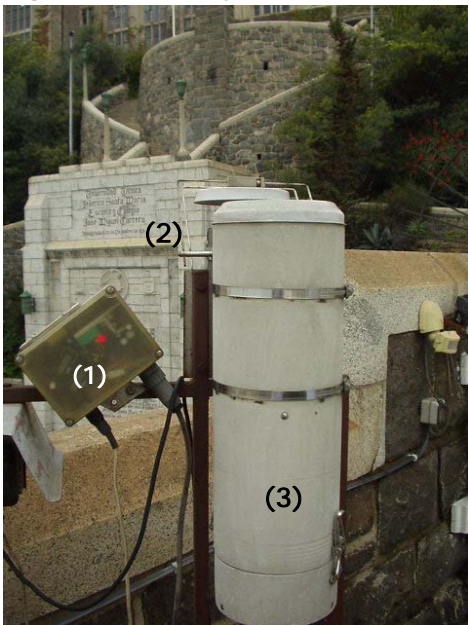


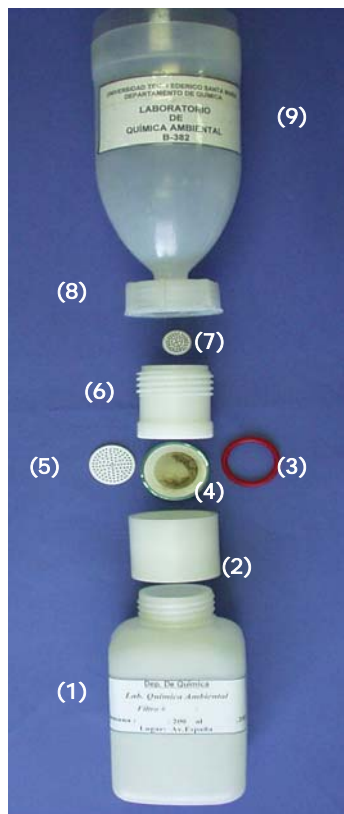
Fig. 5.5 Wet Only Collector (WOC)



En la figura observamos:

- (1) Sensor de gotas de lluvia
- (2) Tapa del WOC
- (3) Estructura protectora

Fig. 5.6 Despiece del Colector Pasivo de Deposición Total (CPDT)



En la figura podemos observar las siguientes partes:

- (1) botella receptora de polietileno
- (2) contenedor de polipropileno para filtro de teflón
- (3) o-ring
- (4) filtro de poliamida ($0.45 \mu\text{m}$ ϕ de poro)
- (5) portafiltro de teflón de 40 mm de diámetro (0.5mm ϕ de poro)
- (6) adaptador de polipropileno
- (7) filtro de teflón de 25 mm de diámetro (0.5mm ϕ de poro)
- (8) anillo de polietileno
- (9) embudo colector de polietileno de 115 mm de diámetro y 30 cm de altura

5.2.1.1 Descripción de los Colectores Pasivos de Deposición Total

Los colectores que se utilizaron fueron colectores pasivos de deposición total (CPDT), originalmente diseñado y construidos en el Forschungszentrum Jülich (Alemania) y modificados en el Laboratorio de Química Ambiental, equipados con filtros de poliamida de $0,45 \mu\text{m}$ de diámetro de poro, diseñados para especiación de compuestos químicos inorgánicos. Estos colectores fueron modificados con el fin de hacer especiación química de contaminantes. Para ello se eliminó la frita y el soporte del filtro (construidos en cerámica), por otros de teflón fabricados en los talleres de la UTFSM, debido a que este es un material inerte, que no presenta superficies activas tanto para compuestos orgánicos como para inorgánicos. Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se utilizó el CPDT destinado a especiación inorgánica, se presentan los esquemas de ambos para hacer notar las diferencias en los materiales de construcción.

Componentes de CPDT para especiación inorgánica (Fig. 5.7):

1. **Malla de polietileno** protectora contra insectos, aves, etc.
2. **Embudo colector** de polietileno de 115 mm de diámetro y 30 cm de altura
3. **Soporte de acero inoxidable** con forma de L que permite fijar el CPDT en el lugar de monitoreo
4. **Fritta de teflón macizo** de 25 mm de diámetro y 0,5 mm de diámetro de poro, la que tiene por objetivo evitar que insectos y restos de vegetales u otros objetos, lleguen a estar en contacto con el filtro
5. **Anillo de polietileno**, cuya función es soportar la fritta de teflón
6. **Adaptador de polipropileno**, cuya función es unir la parte inferior del sistema de recolección (recipiente y filtro) con la parte superior (embudo colector y soporte)
7. **Filtro de membrana de poliamida** de 47 mm de diámetro y 0,45 µm de diámetro de poro. Este filtro es de marca Sartorius y fabricado en Alemania
8. **Portafiltro de teflón macizo** de 40 mm de diámetro y 0,5 mm de diámetro de poro, el cual va sobre el soporte de polipropileno
9. **Soporte de polipropileno** para el filtro de teflón
10. **Botella receptora para la fase líquida** de polietileno de alta densidad, con un litro de capacidad

Componentes de CPDT para especiación orgánica (Fig. 5.8):

1. **Malla de polietileno** protectora contra insectos, aves, etc.
2. **Embudo colector de vidrio silanizado** de 115 mm de diámetro y 28 cm de altura
3. **Soporte de acero inoxidable** con forma de L que permite fijar el CPDT en el lugar de monitoreo
4. **Fritta de teflón** de 25 mm de diámetro y 0,5 mm de diámetro de poro, la que tiene por objetivo evitar que insectos y restos de vegetales u otros objetos, lleguen a estar en contacto con el filtro
5. **Adaptador de teflón** cuya función es unir la parte inferior del sistema de recolección (recipiente y filtro) con la parte superior (embudo colector y soporte)
6. **Anillo de polietileno** cuya función es soportar la fritta de teflón
7. **Filtro de membrana de poliamida** de 47 mm de diámetro y 0,45µm de diámetro de poro. Este filtro es de marca Sartorius y fabricado en Alemania
8. **Portafiltro de teflón macizo** de 40 mm de diámetro y 0,5 mm de diámetro de poro, el cual va sobre el soporte de polipropileno
9. **Soporte de teflón** para el filtro de teflón
10. **Botella de vidrio silanizado para la fase líquida**, con un litro de capacidad

Fig. 5.7 Esquema de un CPDT para especiación inorgánica

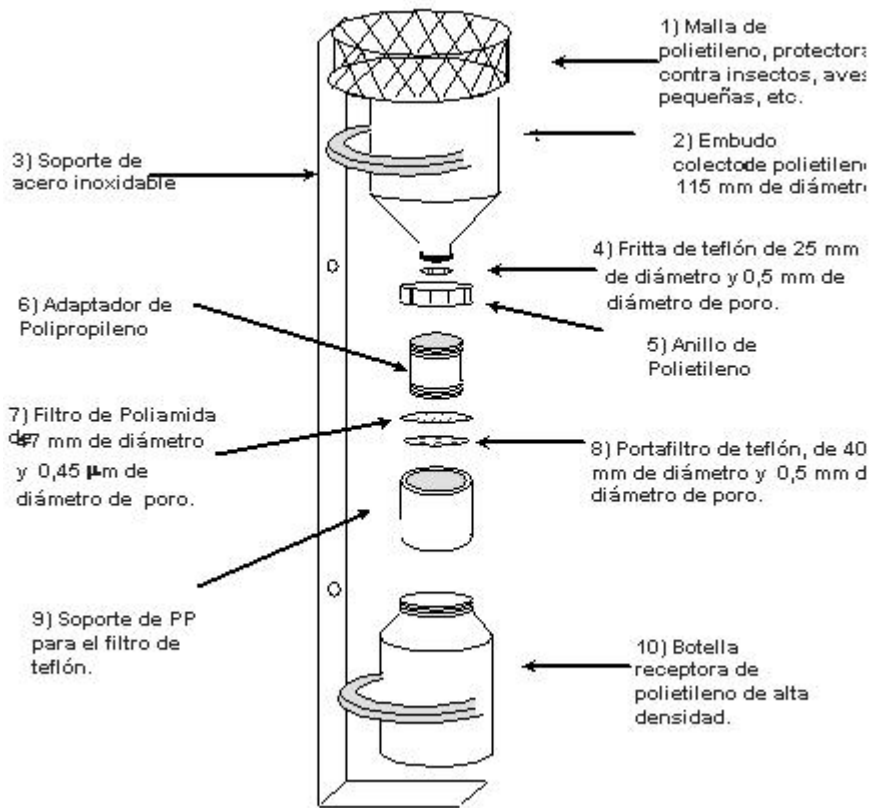
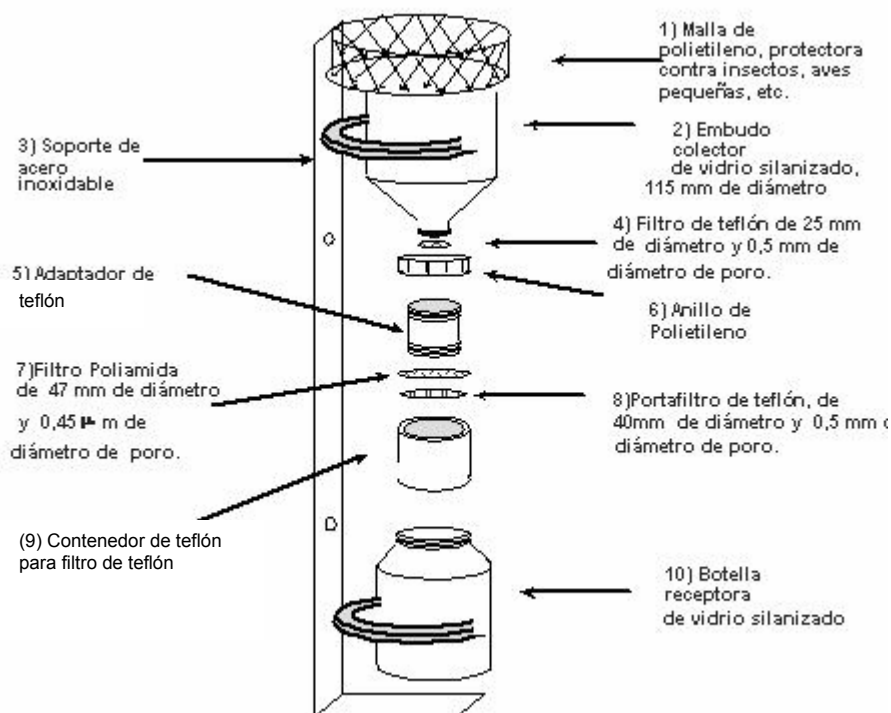


Fig. 5.8 Esquema de un CPDT para especiación orgánica



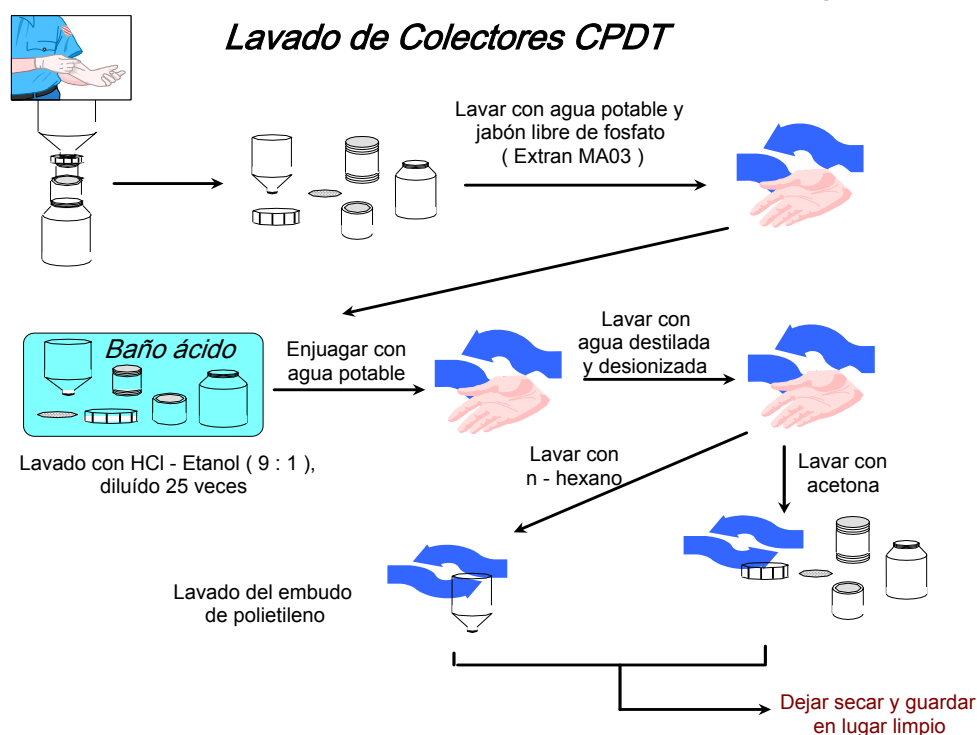
5.2.1.2 Preparación de los Filtros Usados en los CPDT

Los filtros de membrana de poliamida usados en los CPDT son ambientados durante 24 horas, antes y después de ser utilizados en los respectivos colectores. Para esto estuvieron colocados en un gabinete especialmente diseñado para este fin, el cual está en una sala de balanzas la que cuenta con un purificador de aire, además de humedad y temperatura constantes ($50 \pm 5\%$ y $25 \pm 3^\circ\text{C}$). Una vez terminado este procedimiento, se pesaron los filtros limpios y se colocaron en el respectivo colector. Después de recolectar las muestras y someter nuevamente estos filtros a su respectivo período de ambientación, éstos fueron cuidadosamente pesados en una balanza microanalítica de doble rango marca Sartorius con una precisión de $\pm 0,01$ mg (entre 0-80 g), la cual es calibrada periódicamente con las correspondientes pesas clase E2, con certificado de trazabilidad. Previamente se elimina la estática usando un desionizador de cargas electroestáticas para evitar cualquier error en la pesada.

5.2.1.3 Preparación de los CPDT

La preparación y lavado del material de laboratorio y de las partes y piezas de los colectores de deposición total (Fig. 5.9), para su puesta en las estaciones de monitoreo se comienza lavando todas las partes con agua potable y jabón libre de fosfato (Extran) Para la preparación del detergente se miden 140 ml. de detergente "Extran", con probeta graduada de vidrio. Este volumen se adiciona a 7 L de agua potable en un recipiente plástico, medidos con probeta graduada de plástico de 2 L. Luego se homogeniza la solución resultante (solución al 2 % v/v) con una escobilla de lavado. Es importante utilizar siempre guantes de goma. Luego de haber lavado con Extran, se enjuaga con agua potable y se lleva a un baño con ácido clorhídrico (HCl) y etanol con una proporción de 9:1, diluido 25 veces. Se enjuaga nuevamente con agua potable y luego con agua destilada y desionizada. El embudo colector se lava finalmente con n-hexano y el resto de las partes con acetona. Luego se dejan secar en la campana de extracción. Luego se identifica cada CPDT con número de filtro, período y estación de monitoreo. Para el caso de los WOC, el proceso es el mismo.

Fig. 5.9 Procedimiento de lavado para la preparación de CPDT inorgánicos



Los CPDT son colocados en las estaciones de monitoreo, de modo que la boca del colector queda a 2 m de altura y entre ellos existe una distancia de separación de 0,5 m de distancia en paralelo, puestos en un gabinete de protección. Paralelamente al monitoreo con CPDT, y como ya se había mencionado, se realiza periódicamente muestreo de deposición húmeda con un WOC, medición de parámetros meteorológicos como dirección y velocidad del viento, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y pluviometría.

5.2.2 Metodologías de análisis de muestras

5.2.2.1 Etapa de lavado del CPDT post-muestreo

Los colectores pasivos de deposición total (CPDT) son traídos al laboratorio desde las estaciones de monitoreo para procesar las muestras recolectadas.

El colector es lavado con 200 ml de agua tridestilada (AC-HPLC) obtenida por tridestilación de agua en equipo destilador de cuarzo adquirido en Alemania; previamente desionizada y purificada en equipo Milli-Q plus (marca Millipore). El lavado con agua HPLC es para la extracción del material particulado, el cual se realiza primero lavando con 100 ml de AC-HPLC el embudo del colector, con pequeñas porciones de agua con cierta presión abarcando toda la superficie del embudo colector y asegurándose de desprender todo el MP adherido a la paredes. Luego se separan el embudo colector y el anillo de polietileno y se continua el lavado con una porción de 50 ml de AC-HPLC, también teniendo precaución de no lanzar el chorro de agua directamente sobre el filtro de poliamida pero si contra la pared del conector de polipropileno para que al igual que el embudo colector, se desprenda todo el MP y quede sobre el filtro de poliamida.

Con los 50 ml de agua restantes se lava el interior de la botella colectora para asegurarse de que no quede nada en las paredes de la misma.

5.2.2.2 Tratamiento de las muestras

A la solución obtenida del lavado del CPDT inmediatamente se le mide pH y conductividad para posteriormente ser almacenada a -20°C . El filtro obtenido es puesto en un gabinete por 24 horas en sala de balanzas para ambientarlo en las mismas condiciones anteriores a ser pesado.

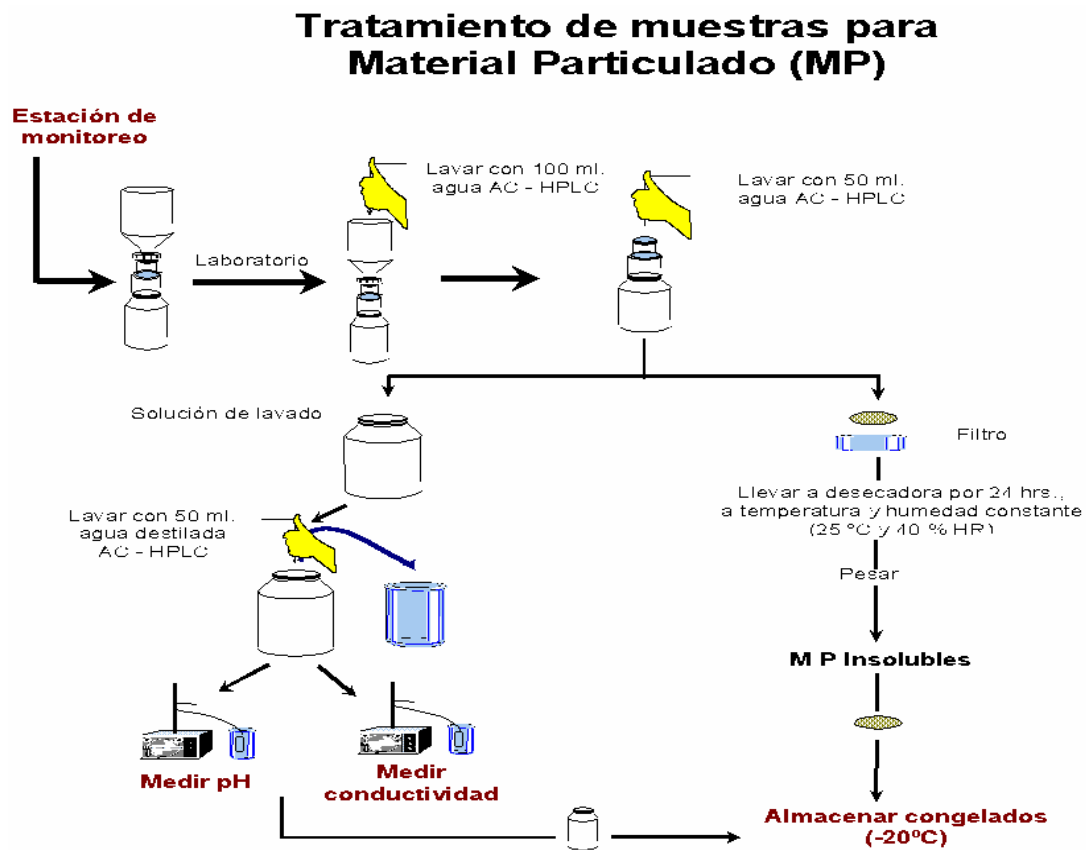
Antes de volver a tarar el filtro, la estática se elimina utilizando un desionizador de cargas electroestáticas. El MP recolectado se calcula por diferencia gravimétrica entre la pesada anterior y la pesada posterior al muestreo y se le denomina *MP insoluble*.

Una vez pesado el filtro, este se coloca en un vaso precipitado junto a los 200 ml de agua usada en el lavado y se extrae por algún método clásico, en nuestro caso se eligió la extracción por microondas. Luego de la extracción y cuando el agua alcanza temperatura ambiente se miden nuevamente el pH y la conductividad, estos serán los valores que serán graficados posteriormente.

Ahora, los 200 ml de agua de lavado con el filtro extraído en su interior son llevados a sequedad mediante ebullición. Cuando ya se ha secado el vaso, el filtro se elimina y el vaso se lleva a la sala de balanza a ambientación por 24 horas. Al día siguiente y por diferencia gravimétrica entre el vaso limpio pre-análisis y el vaso al final del proceso se obtendrá el *MP soluble*. El MP soluble y el insoluble se suman y se obtiene la cantidad real de MP capturado como deposición total o seca.

A pesar del esfuerzo por recuperar y sumar todo el MP recolectado, existen perdidas que son inevitables.

Fig. 5.10 Lavado del CPDT post-muestreo y tratamiento de las muestras



En el caso de la deposición húmeda, el proceso es más simple. Después de cada evento de deposición, el WOC se lleva al laboratorio, se mide la cantidad de agua caída en ml y se toma registro del pH y la conductividad. Posteriormente a esto el WOC se lleva nuevamente a la estación de monitoreo. Al término de la semana se mide el pH y la conductividad de la deposición húmeda acumulada semanalmente.

5.3 Procedimientos experimentales y actividades

5.3.1 Evaluación del tipo de extracción

Para verificar la efectividad de los métodos de extracción del MP utilizados y poder decidirnos por el más eficiente, se realizaron algunos experimentos destinados a medir la conductividad y el pH de las muestras obtenidas con los colectores. Se utilizaron las muestras obtenidas en la estación de monitoreo Torreón ubicada en la avenida España, puesto que es el lugar en que los colectores capturan una mayor cantidad de deposición total.(DT)

⇒ Experimento n° 1

El primer experimento consistió en colocar en la estación de monitoreo cuatro CPDT por un periodo de una semana, luego de este tiempo fueron retirados para el análisis de los filtros. A cada filtro (A, B, C y D) con DT, se le practicaron distintos métodos de extracción (ebullición, ultrasonido, microondas y combinaciones de los 2 primeros) con el fin de saber cual de estos era el mejor proceso de extracción del material particulado obtenido de la deposición total. Este experimento se repitió 2 veces, durante las siguientes dos semanas.

De esta forma :

Repeticiones	Muestra	Método de análisis
Semana 1	A1	Ebullición (Eb)
Semana 1	B1	Ebullición + Ultrasonido (Eb + Us)
Semana 1	C1	Ultrasonido + Ebullición (Us + Eb)
Semana 1	D1	Microondas (Mw)
Semana 2	A2	Ebullición (Eb)
Semana 2	B2	Ebullición + Ultrasonido (Eb + Us)
Semana 2	C2	Ultrasonido + Ebullición (Us + Eb)
Semana 2	D2	Microondas (Mw)
Semana 3	A3	Ebullición (Eb)
Semana 3	B3	Ebullición + Ultrasonido (Eb + Us)
Semana 3	C3	Ultrasonido + Ebullición (Us + Eb)
Semana 3	D3	Microondas (Mw)

En el caso de la extracción mediante ebullición (*Muestra A*), el filtro con DT fue depositado junto con el agua de lavado del colector (200ml) en un vaso precipitado de 250ml, el cual fue colocado en una manta calefactora, hasta alcanzar el punto de ebullición. Una vez que se alcanzaba esta temperatura, se dejaba el vaso por 3 minutos en ebullición, tiempo luego del cual se retiraba para enfriar y posteriormente medir pH y conductividad.

Para el caso de las *Muestras B* y *C* se usaron dos técnicas de extracción combinadas. En el caso de la *Muestra C* se colocaba el filtro con DT junto con el agua de lavado del colector (200ml) en un vaso precipitado de 250ml, el cual era sometido a un baño de ultrasonido durante 10 minutos, luego de esto; se colocaba el vaso con muestra en la manta calefactora hasta que alcanzara la temperatura de ebullición, donde se mantenía por 3 minutos más, tiempo luego del cual se retiraba para enfriar y posteriormente medir pH y conductividad. En

cuanto a la Muestra B, se le aplicó el mismo procedimiento anterior, pero de manera inversa, es decir, primero se realizó la ebullición de la muestra contenida en el vaso precipitado y posteriormente se le aplicó ultrasonido. Luego de estos procedimientos se midió pH y conductividad.

La extracción por microondas fue la técnica aplicada a la *Muestra D*. El filtro con DT fue depositado junto con el agua de lavado del colector (200ml) en un vaso precipitado de 250ml que fue depositado en el interior de un horno microondas comercial a una potencia de 900w durante 10 minutos aproximadamente, tiempo al cual la muestra comienza a ebullición. Se dejaba la muestra en ebullición por 3 minutos, luego de los cuales era retirada del horno microondas para ser enfriada y posteriormente medir pH y conductividad.

⇒ Experimento n° 2

Se repitió durante una semana el muestreo del experimento n° 1, pero en esta ocasión cada muestra A, B, C y D tenía su respectivo duplicado (A', B', C', D'), es decir, en la estación Torreón fueron montados 8 CPDT de manera simultánea.

La diferencia principal con el experimento anterior radica en que; a las muestras A y D que solo se les aplicaba un método único de extracción (ebullición y microondas respectivamente), se les aplicó ultrasonido de manera posterior a su extracción original, con la finalidad de observar un posible aumento del rendimiento de la extracción (reflejado en un aumento de la conductividad de la muestra), producido por la sinergia de los métodos utilizados.

5.3.2 Comparación del efecto del tiempo de ebullición y de exposición al ambiente de laboratorio sobre las propiedades de la muestra

Para observar el efecto que tiene el tiempo de ebullición de una muestra sobre las propiedades fisicoquímicas de esta, junto con aclarar la influencia del ambiente de laboratorio sobre estas mediciones, se realizaron los siguientes experimentos:

⇒ Experimento n° 1

Se realizó un experimento para evaluar si el aumento de la conductividad de la muestra en los procesos de extracción se debe principalmente a la pérdida de volumen por evaporación o puede estar influenciado además, por el periodo de exposición de la muestra al ambiente de laboratorio.

Para esto se colocaron cuatro colectores pasivos en la estación Torreón, la DT de dos de ellos sería extraída mediante ebullición, mientras que los otros dos servirían de muestras control. De esta forma, cada vez que las muestras A y B alcanzaran la ebullición se les mediría la Conductividad a ellas y paralelamente a las muestras C y D que no eran extraídas. Esto hasta llegar a un volumen mínimo que impidiera la medición. De esta forma se podría comparar y establecer si el aumento de la conductividad debido a la simple exposición de la muestra con el ambiente es comparativamente importante respecto del aumento producido por el proceso de extracción y la pérdida de volumen que genera.

Muestra A: Ebullición 01
Muestra B: Ebullición 02

Muestra C: Control 01
Muestra D: Control 02

⇒ Experimento n° 2

Con el fin de observar la influencia del ambiente sobre el pH de la muestra, debido al efecto de dilución de CO₂ atmosférico en el agua tridestilada usada en el tratamiento de las muestras de deposición total, se realizó el siguiente experimento:

Se dispuso en vasos precipitados de tres muestras de 50 ml de agua tridestilada y tres de agua milli-Q recién obtenidas. A cada muestra se le midió el pH inicial y posteriormente en intervalos de 10 minutos, durante 70 minutos, teniendo de esta forma un total de 8 mediciones por muestra. De esta forma se podría establecer el grado de influencia del CO₂ sobre la acidez de las muestras de DT.

5.3.3 Evaluación del efecto de dilución de las muestras sobre pH y conductividad

Debido a que en los meses de febrero las muestras de Deposición se acumulan durante cuatro semanas, estas debieron ser diluidas en el laboratorio antes de realizar el procedimiento de análisis. Se realizó un cuarto experimento con la finalidad de apreciar la relación entre la dilución de las muestras y las variables fisicoquímicas medidas (pH y conductividad) junto con obtener (si es posible) un factor de corrección para el mes febrero.

Para esto se colocaron cuatro CPDT en paralelo en la estación Torreón durante una semana, período luego del cual fueron retirados y llevados al laboratorio para el análisis de sus filtros.

Cada filtro con DT fue depositado junto con el agua de lavado de su colector (200 ml) en un vaso precipitado de 250 ml y antes de ser extraídos se les midió pH y conductividad.

Posteriormente se procedió a la extracción de las cuatro muestras mediante microondas. Una vez las que las cuatro muestras extraídas alcanzaban temperatura ambiente, se midió su pH y conductividad nuevamente.

Después de esto se procedió a diluir las cuatro muestras de la siguiente manera: se agregaron porciones de 50 ml de agua Milli-Q a cada muestra hasta alcanzar un volumen final de 600ml. Posterior a cada dilución con 50 ml se media el pH y la conductividad de cada solución.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados y análisis de experimentos realizados en el laboratorio

6.1.1 Evaluación del tipo de extracción

Para poder verificar la efectividad de los métodos de extracción del MP utilizados en el laboratorio se realizaron una serie de experimentos cuyos resultados se muestran a continuación.

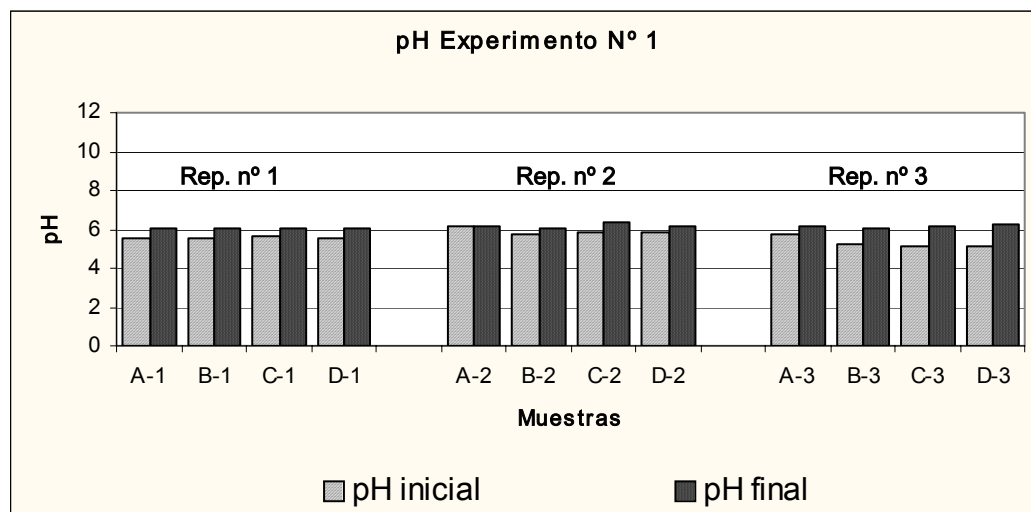
⇒ Experimento n° 1

Siendo :

	Repetición n° 1	Repetición n° 2	Repetición n° 3	Método aplicado	
Muestra	A1	A2	A3	Ebullición	Eb.
Muestra	B1	B2	B3	Ebullición + Ultrasonido	Eb. + Us.
Muestra	C1	C2	C3	Ultrasonido + Ebullición	Us. + Eb.
Muestra	D1	D2	D3	Microondas	mW.

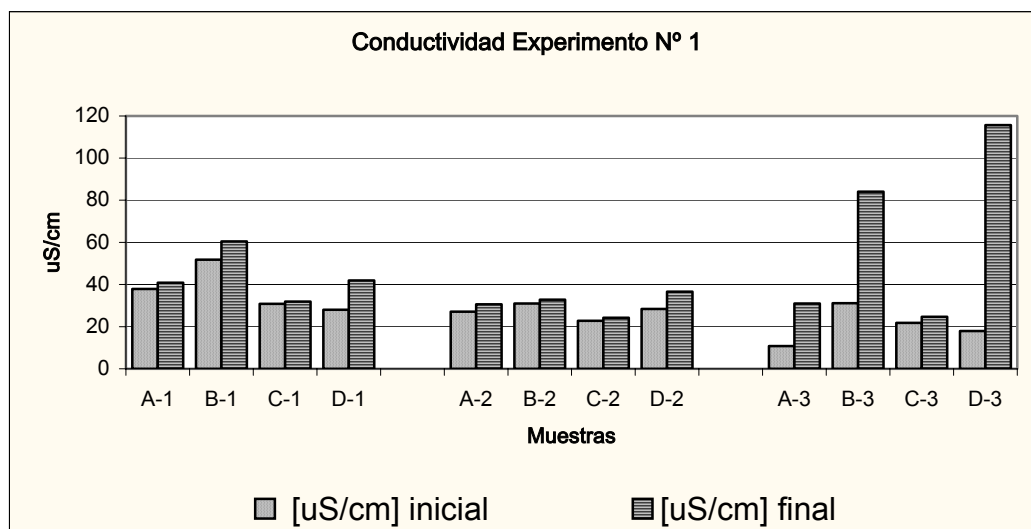
En la figura 6.1 se observa que el pH no muestra una variación importante después de las extracciones. Esta pequeña variación se puede observar en la tabla 6.1, donde se aprecia una leve dependencia con el tipo de extracción.

Fig. 6.1 Gráfico de pH pre y post extracción



Al observar la figura 6.2, podemos notar que la conductividad es afectada claramente por algunos de los métodos de extracción empleados, siendo claramente el método de microondas el que presenta el mayor rendimiento de extracción, como indica también la tabla 6.1.

Fig. 6.2 Gráfico de conductividad pre y post extracción



En la tabla 6.1 se aprecia el rendimiento de cada método de extracción, expresado en términos de la diferencia de las propiedades fisicoquímicas, conductividad y pH; pre y post extracción (Δ uS/cm y Δ pH).

Tabla 6.1 Diferencias (Δ) pre/post extracción en cada muestra

Muestras	Δ pH	Δ uS/cm
A-1	0.58	2.9
A-2	0.04	3.5
A-3	0.44	20.2
B-1	0.48	8.6
B-2	0.33	1.8
B-3	0.81	52.9
C-1	0.38	1.1
C-2	0.53	1.4
C-3	1	2.9
D-1	0.47	13.9
D-2	0.38	8.2
D-3	1.08	97.8

En la tabla 9.1 del anexo 01 se encuentran disponibles datos adicionales de este experimento, como son los valores iniciales y finales de pH y conductividad, y la cantidad de MP recolectado en cada filtro.

⇒ Experimento n° 2

Para demostrar la superioridad del método de microondas sobre el resto de los métodos de extracción propuestos, se realizó una repetición del experimento n° 1. En esta ocasión a las muestras que solo se les aplicaba un método único de extracción, por ejemplo A y A', D y D', con ebullición y microondas respectivamente, también se les aplicó ultrasonido de manera posterior, con la finalidad de observar un posible aumento de la conductividad.

El experimento se centró en la conductividad, pues como ya se ha podido observar que el pH de las muestras no muestra un cambio significativo después de la extracción.

En la tabla 6.2 se encuentran los rendimientos de cada método, expresados en el aumento de la conductividad (donde Δ uS/cm = conductividad final (uS/cm) – conductividad inicial (uS/cm)) y en la figura 6.3 se observan gráficamente los resultados de este experimento.

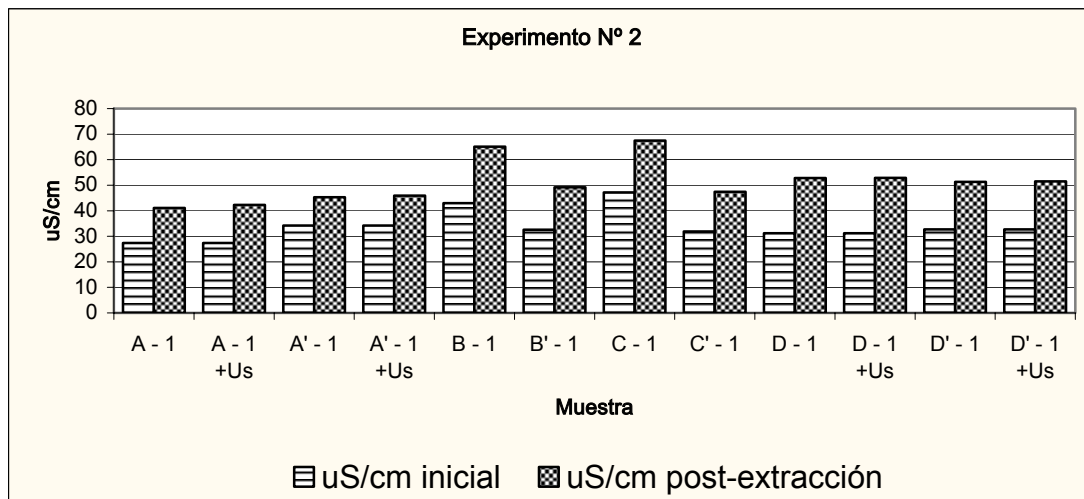
Tabla 6.2 Resultados del experimento n° 2

<i>Filtro n°</i>	<i>Método</i>	Δ uS/cm
A - 1	Eb.	13.7
A' - 1	Eb.	11.1
Filtro A – 1 + Us.	Eb. + Us.	14.9
Filtro A' – 1 + Us.	Eb. + Us.	11.7
B - 1	Eb. + Us.	22.1
B' - 1	Eb. + Us.	16.6
C - 1	Us. + Eb.	20.3
C' - 1	Us. + Eb.	15.5
D- 1	mW.	22.6
D' - 1	mW.	18.6
Filtro D – 1 + Us.	mW. + Us.	22.7
Filtro D' – 1 + Us.	mW. + Us.	18.8

Al observar la tabla 6.2 se aprecia que el método de *Microondas* (Filtros D y D') genera un mayor rendimiento en la extracción, aunque esta diferencia no es significativa respecto de los otros métodos utilizados como en el caso de la extracción por *Ebullición + Ultrasonido* (Filtros B y B'). Sin embargo, la extracción mediante microondas es un proceso mucho más rápido (demora solo 3 minutos y no los 20 minutos que implican utilizar ebullición) y pulcro (consta de solo una etapa, la cual se realiza en una cámara cerrada – el mismo horno microondas) que cualquiera de los otros métodos empleados. Estas ventajas comparativas son fundamentales a la hora de elegirlo como el método de extracción de las muestras de Deposición total.

Por otra parte, no queda claro una posible ventaja del proceso de Us+Eb por sobre el de Eb+Us. La aplicación inicial de ultrasonido favorecería la ruptura de las partículas y por lo tanto provocaría la liberación de más iones durante el proceso de ebullición, provocando un aumento en la conductividad. Sin embargo, como se aprecia en la tabla 6.2 y en gráfico 6.3, la diferencia entre los rendimientos de extracción obtenida entre estos dos métodos es mínima y los datos escasos como para tener una conclusión definitiva.

Fig. 6.3 Gráfico del experimento n° 2



Lo que queda claro al observar la tabla 6.2 y el gráfico 6.3, particularmente las muestras A, A', D y D' es el escaso aporte del ultrasonido como método de extracción secundario, lo cual hace presumir que los valores de las muestras B y B' se deben principalmente a la extracción mediante ebullición, y no a un posible aporte del ultrasonido en segunda instancia.

En la tabla 9.2 del anexo 01 se encuentran disponibles datos adicionales de este experimento, como son los valores iniciales y finales de conductividad, y la cantidad de MP recolectado en cada filtro.

6.1.2 Comparación del efecto del tiempo de ebullición y de exposición al ambiente sobre las propiedades de la muestra

Normalmente, luego del proceso de extracción de las muestras, estas se dejaban enfriar en el mismo recipiente a temperatura ambiente, para luego medir pH y conductividad.

⇒ Experimento n° 1

Con el fin de evaluar el posible efecto de la exposición al medio sobre la conductividad, se compararon los resultados obtenidos al medir repetidas veces una misma muestra sometida a numerosas ebulliciones (provocando reducción de volumen) con mediciones realizadas a otras muestras que solo fueron expuestas al ambiente habitual del laboratorio.

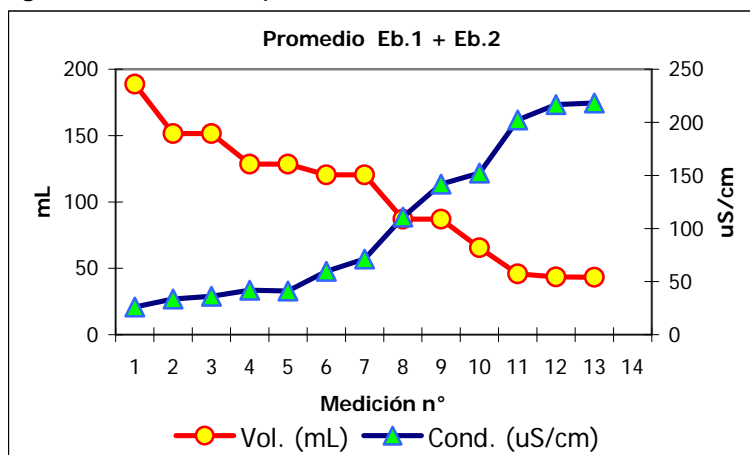
De esta forma tendremos:

Muestra A: Ebullición 01
Muestra B: Ebullición 02

Muestra C: Control 01 (exposición 01)
Muestra D: Control 02 (exposición 02)

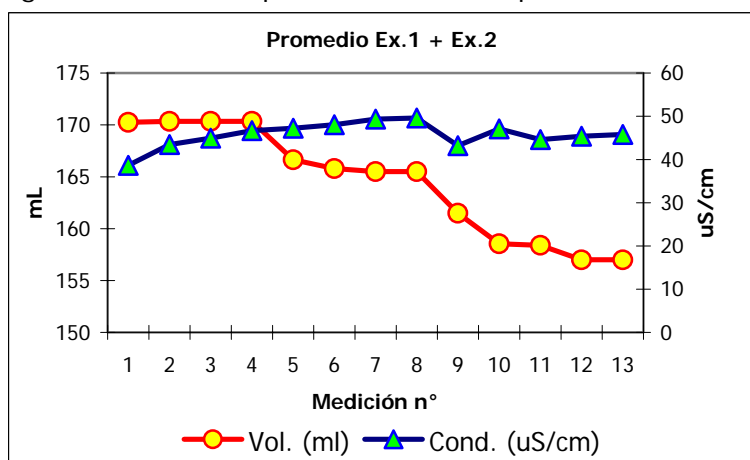
En el gráfico 6.4 se observa que al someter a ebullición una muestra por segunda vez hay un pequeño aumento de la conductividad, este incremento es ocasionado por la concentración de la muestra por pérdida de solvente. De hecho, cada vez que se repite una ebullición se incrementa la pérdida de solvente inicial (ver tabla 9.3, anexo 01) incrementando la conductividad inicial de la muestra, al punto que después de una séptima ebullición el volumen esta reducido a la mitad y la conductividad es mas del doble de la inicial. (ver gráfico 6.4)

Fig. 6.4 Gráfico del promedio de las ebulliciones v/s conductividad.



En el grafico 6.5 se observa que la exposición de la muestra al medio genera una pequeña reducción de volumen (13 ml aprox.), que puede explicar el pequeño incremento de la conductividad (7.2 uS/cm aprox.). Si comparamos este aumento con los mas de 190 uS/cm en los que aumentó la conductividad al ser sometida a sucesivas ebulliciones, podemos decir que el efecto de exposición es poco significativo.

Fig. 6.5 Gráfico del promedio de las exposiciones v/s conductividad.



En las tablas 9.3 y 9.4 del anexo 01 se encuentran disponibles los datos con los que se construyeron los gráficos de este experimento. Además, en las figuras 9.1 a 9.4 que se encuentran en el anexo 01, se muestran de forma individual las relaciones entre conductividad y volumen para las muestras en ebullición y para aquellas que solo eran expuestas al medio ambiente (muestras C y D).

⇒ Experimento n° 2

Para apreciar la influencia del ambiente sobre la acidez de la muestra, debido al posible efecto de disolución de CO₂ atmosférico en el agua usada en el tratamiento de las muestras de deposición total, se realizaron mediciones de pH sobre tres muestras de agua tridestilada y tres de agua milli-Q, en intervalos de 10 minutos, durante una hora.

En la figura 6.6 podemos notar que el pH de las soluciones se comporta de manera muy similar, y más que disminuir, presenta un alza respecto de su valor inicial en cuatro de las seis muestras, aunque como se observa en la tabla 6.3 esta variación es mínima.

Fig. 6.6 Gráfico de variación de pH.

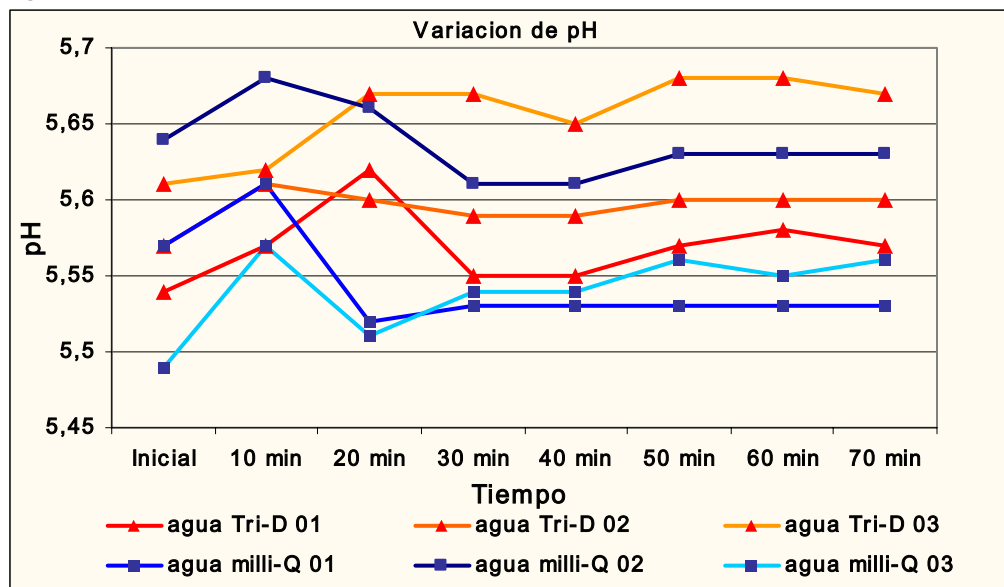


Tabla 6.3 Resultados del experimento n° 2

Tiempo	Agua Tridestilada			Agua milli-Q		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Inicial	5,54	5,57	5,61	5,57	5,64	5,49
10 min	5,57	5,61	5,62	5,61	5,68	5,57
20 min	5,62	5,60	5,67	5,52	5,66	5,51
30 min	5,55	5,59	5,67	5,53	5,61	5,54
40 min	5,55	5,59	5,65	5,53	5,61	5,54
50 min	5,57	5,60	5,68	5,53	5,63	5,56
60 min	5,58	5,60	5,68	5,53	5,63	5,55
70 min	5,57	5,60	5,67	5,53	5,63	5,56
Promedio	5,57	5,60	5,66	5,54	5,64	5,54
Desv. Est.	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03

El comportamiento de las muestras de agua tridestilada y milli-Q fue prácticamente igual (promedio agua tridestilada: 5,61 +/- 0,04 y promedio agua milli-Q: 5,61 +/- 0,05), presentando para las seis muestras una variación escasa. De esta forma podemos comprobar que la exposición de las soluciones al ambiente (con la posible disolución de CO₂) no afecta de manera significativa su pH.

6.1.3 Evaluación del efecto de dilución de las muestras sobre pH y conductividad

Este experimento fue desarrollado con la finalidad de apreciar la relación entre la dilución de las muestras de deposición total y las variables fisicoquímicas medidas, es decir, pH y conductividad. Al observar las figuras 6.6 y 6.7 se puede verificar que existe una relación directa entre la dilución de las muestras y los valores de estas variables.

Fig. 6.7 Gráfico de pH v/s dilución

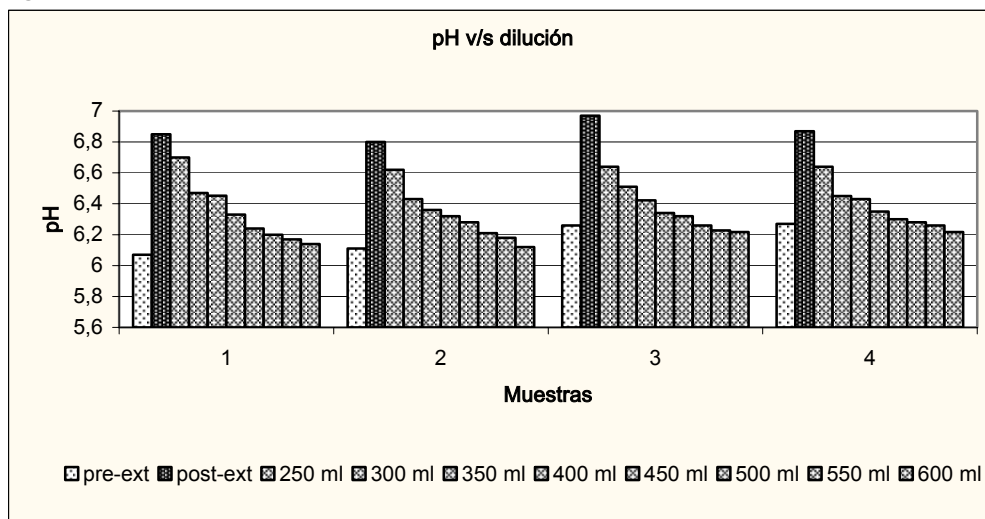
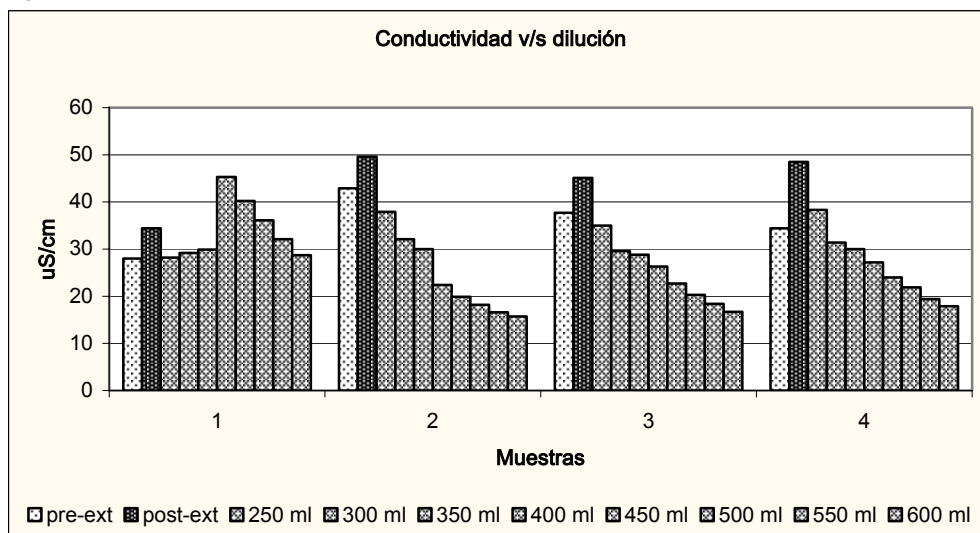


Fig. 6.8 Gráfico de conductividad v/s dilución



La disminución de pH no se debe como se pensó en un comienzo, a la disolución de CO_2 en el agua tridestilada, pues este efecto es poco significativo, como se comprobó en el experimento anterior. Se debe entonces, a que después de la extracción el pH aumenta significativamente (Fig. 6.7) y con las diluciones lo que se consigue es equilibrar el pH de la solución extraída con el del agua tridestilada (promedio pH agua tridestilada recién obtenida: $5,5 \pm 0,03$) con la que se diluye.

Por lo tanto, a pesar de la notoria curva de disminución que presenta la figura 6.7, es importante señalar que el pH no varía mayormente con las diluciones, tendiendo a estabilizarse al final y dando un promedio de $6,35 \pm 0,15$ durante todo el experimento.

En cuanto a la conductividad, su disminución por efecto de la dilución se debe a que la misma cantidad de iones presentes en la muestra de DT debe distribuirse en un volumen mayor de agua de alta pureza. De esta forma cuando el volumen de solvente se duplica (400 ml), la conductividad disminuye en promedio a la mitad del valor inicial (47 +/- 7%), si la muestra se sigue diluyendo la conductividad sigue bajando, así con 600 ml la diferencia fue de 65 +/- 3%, es decir, 1/3 del valor inicial. Es decir, existe una relación directa entre la conductividad y el volumen de la dilución.

Estos resultados son importantísimos, pues nos permiten corregir tanto las conductividades de las muestras obtenidas en los meses de febrero (mes en el cual se realiza solo una medición, pues corresponde al periodo de vacaciones de verano) como aquellos obtenidos al durante el periodo de muestreo mensual v/s semanal. En ambos casos, las muestras tomadas mensualmente fueron lavadas con 200 ml y no con 800ml como correspondería a la relación: 200 ml por semana de muestreo, produciéndose una concentración errónea de la muestra.

Se pueden revisar los valores medidos en este experimento consultando en la tabla 9.5 del anexo 01.

6.2 Comparación entre monitoreos mensuales y semanales

Durante los años 2002 y 2003 se realizó una campaña de monitoreo mensual en Valparaíso, paralela al tradicional monitoreo semanal, cuyo objetivo era comprobar si la diferencia entre los periodos de recolección afectaba en alguna forma a la muestra o a la eficiencia del muestreo de DT.

En la tabla 6.4 se puede observar la estabilidad del pH independiente de los tiempos de muestreo, y la mayor conductividad de las muestras semanales.

Tabla 6.4 Promedios de pH, conductividad y DT para el periodo 2002 – 2003 de muestreo mensual vs. Semanal

ESTACIÓN MONITOREO	MUESTREO MENSUAL			MUESTREO SEMANAL		
	pH Promedio	Conductividad Promedio	DT promedio	pH Promedio	Conductividad Promedio	DT promedio
Av. ESPAÑA	6,7 +/- 0,3	22.5 +/- 15	11,46 +/- 4,3	6,0 +/- 0,3	43 +/- 16	14,30 +/- 5
TORRE USM	6,4 +/- 0,6	11 +/- 5	3,00 +/- 1,5	6,4 +/- 0,4	16 +/- 15	3,34 +/- 1,5

Al comparar los tiempos de muestreo (mensual v/s semanal), se observó que las diferencias en el pH de la estación Av. España son apenas de un 3% en el año 2002 y un 1.6% en el año 2003.

En el caso de la estación Torre USM, el pH varía un 4% en el año 2002 y un 3% en el año 2003 entre los monitoreos mensuales y semanales. Además se observó que en el 72.5% de las veces medidas, el monitoreo mensual arrojó un pH mas elevado (ver tablas 9.8 y 9.10 ; 9.12 y 9.14, ANEXO 02).

Para el caso de la conductividad, esta evidenció diferencias de hasta un 200% entre los tiempos de muestreo, siendo el 80% de las veces muestreadas mayores los valores de conductividad en el muestreo semanal.

Consecuente con los datos obtenidos en la conductividad, el 82.5% de las veces medidas la cantidad de DT fue mayor en el caso del muestreo semanal (ver Tablas 9.7, 9.9, 9.11 y 9.13; ANEXO 02), esto se debería principalmente a que las muestras mensuales están expuestas un mayor tiempo al ambiente y deben sufrir en mayor grado la resuspensión y pérdida de parte de su MP por efecto del viento.

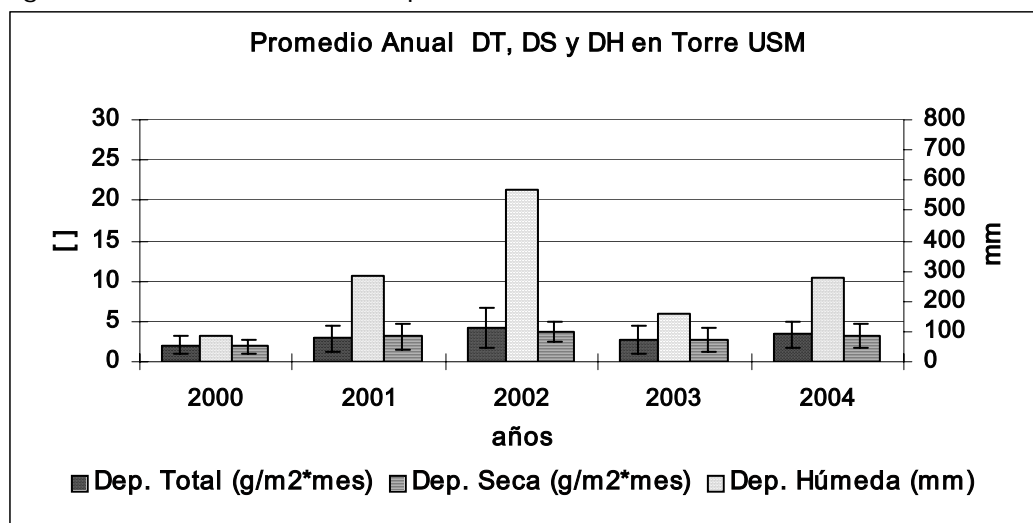
En conclusión, se sugiere continuar utilizando el monitoreo semanal, puesto que además de capturar aproximadamente un 18% más de DT que el monitoreo mensual, permite hacer análisis estadísticos mas continuos y representativos de la realidad local.

6.3 Resultados y análisis de la data histórica en Valparaíso

Durante el periodo comprendido entre los años 2000 y 2004 se realizó una campaña de monitoreo atmosférico en la ciudad de Valparaíso. Con los datos obtenidos de esta campaña, se pudo analizar las tendencias en la data histórica de la Deposición total, Deposición Seca (DS) y Deposición húmeda (DH).

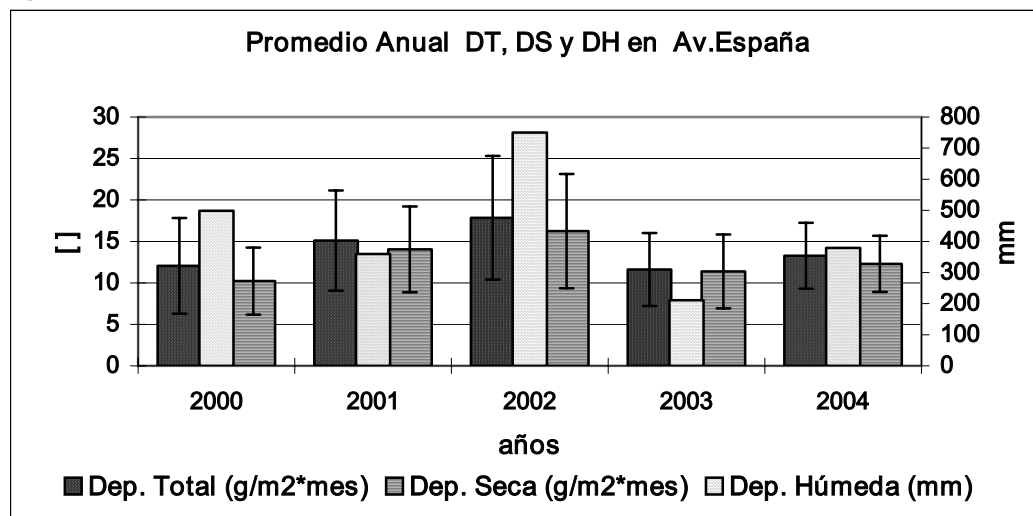
Lo primero que puede observarse en los resultados (Fig. 6.8 y 6.9) es que la estación de monitoreo "Av. España" colecta una mayor cantidad de deposición total y seca que la estación "Torre USM". Esto se debe a que la estación Av. España es una estación de alto tráfico donde el efecto de resuspensión del $MP > 10$ es importante.

Fig. 6.9 Promedio anual de Deposiciones en la estación Torre USM



Nota: en el año 2000 se realizaron trabajos entre enero y marzo en la estación Torre USM, por lo que permaneció fuera de operaciones durante ese periodo.

Fig. 6.10 Promedio anuales de Deposiciones en la estación Av. España



En cambio, la estación Torre USM se encuentra a 70 m.s.n.m, altura bastante considerable y a la cual una parte importante del $MP > 10$ no alcanza a llegar, además esta estación se ve influenciada por la presencia de fuertes vientos (8 a 10 m/s) que tienen un efecto de dispersión y dilución sobre el MP (ver Fig. 9.9, ANEXO 02).

La presencia de estos vientos, predominantes en Valparaíso principalmente en invierno, tiene como resultado que la estación Torre USM, además colecte menos DH (medida en mm. de agua caída). (Fig. 6.9 y 6.10). Esto se debe principalmente a que estos vientos modifican la velocidad y el ángulo de caída de las gotas de agua.

Las variables fisicoquímicas que se midieron también mostraron resultados interesantes. En el caso de la conductividad ($\mu\text{S/cm}$), esta demostró ser mayor en la estación Av. España que en la Torre USM (Fig. 6.11 y 6.12), debido a que al estar cerca de una vía de alto tráfico, en la estación Av. España existe una importante acción mecánica producida por los vehículos al resuspender continuamente el MP depositado. Además, existe un importante influencia de aerosoles marinos en esta estación.

Al observar las figuras 6.9 y 6.11 ó 6.10 y 6.12 se aprecia que la conductividad promedio anual de las muestras de DT se comporta de manera independiente de la cantidad de agua caída (mm). Para el caso de la DH ocurre todo lo contrario. Esta presenta una relación estrecha (inversa) entre agua caída y conductividad, es decir, a mayor cantidad de agua caída, menor es la conductividad de sus muestras.

Fig. 6.11 Promedio anual de conductividad en la estación Torre USM

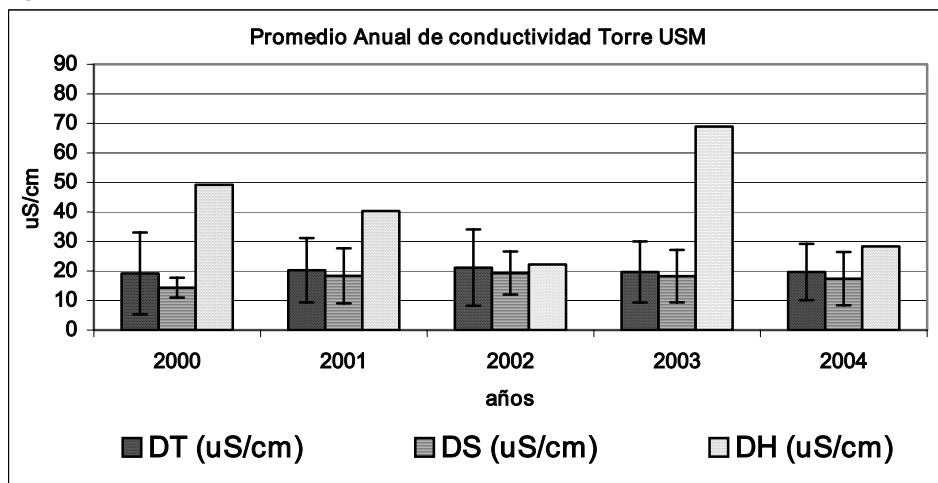
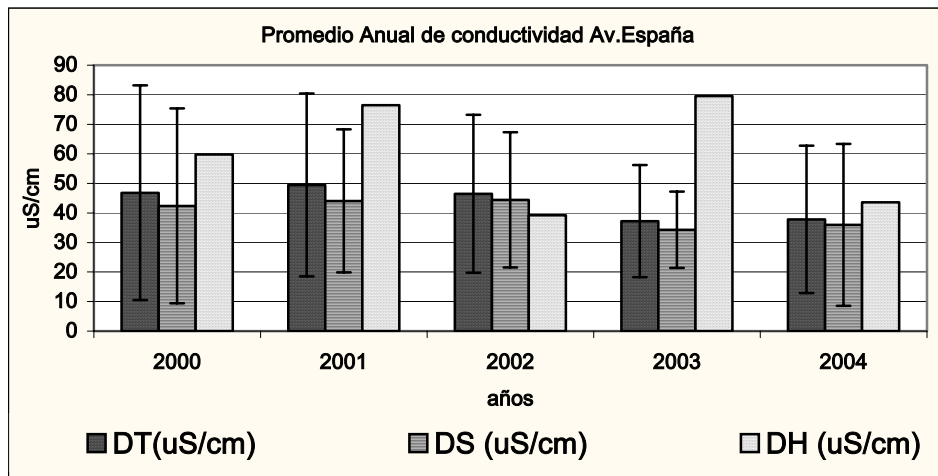


Fig. 6.12 Promedio anual de conductividad en la estación Av. España



Al comparar el año promedio mas lluvioso (año 2002) con el menos lluvioso (año 2003), se aprecian diferencias en la conductividad de la DH del 50% para Av. España y del 68% para la Torre USM. Esto muestra (aunque en un grado menor), que la efectividad de la DH es mayor en atmósferas con concentraciones y diámetros aerodinámicos mayores en su MP, como ocurre en la estación Av. España. Esto indica que existe una competencia entre la cercanía a la fuente emisora (una vía de alto tráfico, por ejemplo) y la cantidad de MP que en ella se concentra versus la efectividad de la DH como agente de limpieza de la atmósfera.(ver tabla 6.5)

La relación entre conductividad y cantidad de MP recolectado por efecto de los hidrometeoros es mayor en una atmósfera mas saturada como es el caso de la estación Av. España. (ver tabla 6.5)

Tabla 6.5 Comparación de variables entre el año mas y el menos lluvioso

	Av. España		Torre USM	
	2002	2003	2002	2003
Agua caída (mm)	749,86	211,1	545,38	161,23
DT (g/m ² x mes)	854,21	557,65	203,49	131,59
pH	6,68	6,69	6,4	6,4
Conductividad (µS/cm)	44,5	36,3	20,7	19

En cuanto al pH, este demostró ser prácticamente constante durante todo el año (y todo el periodo de muestreo) e independiente de los eventos de precipitación y de sus intensidades, tanto para la estación Av. España como para la Torre USM (Tabla 6.5). Lo anterior también puede observarse en la tabla 9.6 del ANEXO 02, en la que se muestra el promedio anual de pH para ambas estaciones de monitoreo.

En la Tabla 6.6 se puede apreciar la estabilidad del pH durante todo el periodo de muestreo en Valparaíso.

Tabla 6.6 Promedio de pH en Valparaíso para el período 2000 - 2004

Estación de monitoreo	pH promedio del período 2000-2004	
	DT	DH
Av. España	6,58 +/- 0,48	5,42 +/- 0,36
Torre USM	6,28 +/- 0,47	5,43 +/- 0,38

6.4 Comparación de los muestreos paralelos entre Valparaíso y Santiago

Entre los años 2001 y 2003 se realizó una campaña de monitoreo atmosférico en paralelo entre Valparaíso y Santiago con el objetivo de comparar las tendencias históricas en la DT, DS y DH para estas ciudades entre los meses de junio y septiembre (semanas julianas 22 a 40).

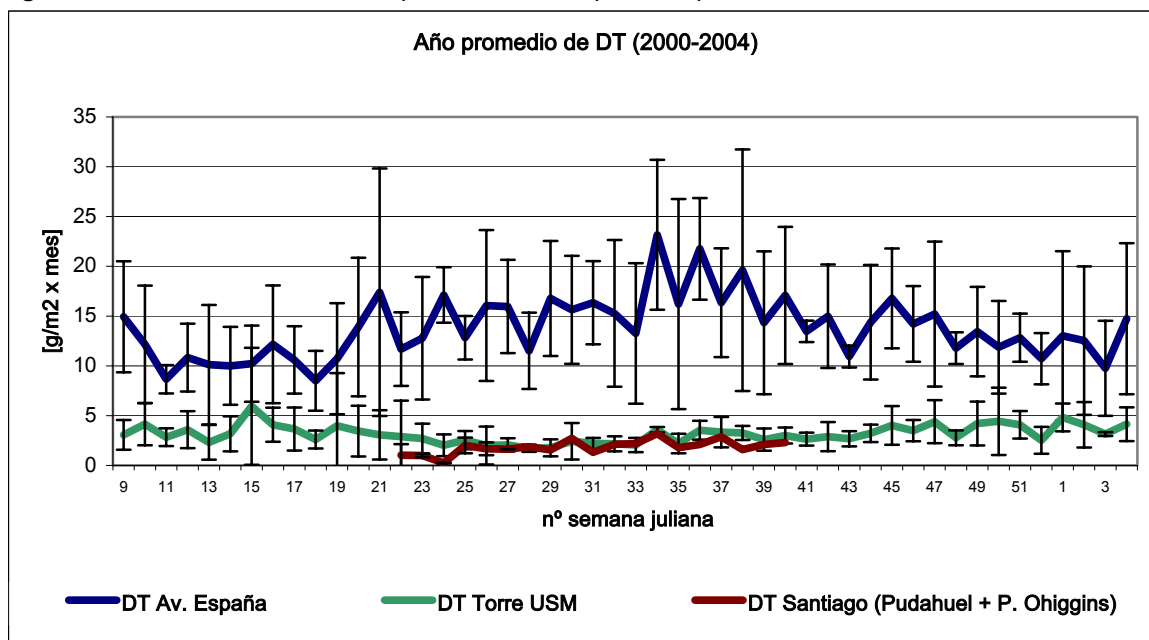
Los resultados indican que las concentraciones de DT son mayores en Valparaíso (estaciones Av. España y Torre USM) que en Santiago (estaciones Pudahuel y P. O'Higgins). Además, según el análisis estadístico (Prueba t para medias de dos muestras emparejadas) las estaciones Pudahuel y P. O'Higgins no tienen diferencias significativas en cuanto a cantidad y características fisicoquímicas del MP recolectado, por lo que se decidió usar el promedio de ambas, para efectos de los gráficos que se muestran mas adelante.

Si observamos la Fig. 6.13 podemos apreciar que la concentración de DT en Av. España es notoriamente mayor al resto de las estaciones de monitoreo, esto se debería principalmente a la influencia de material de la costa (arena) y al hecho que Av. España es una estación de alto tráfico, donde el efecto de MP >10 resuspendido es importante.

En cuanto a los datos obtenidos en la estación Torre USM, se comprobó que a pesar de estar ubicada en altura (70 m.s.n.m) y estar sometida a fuertes vientos (8 a 10 m/s), captura una cantidad no significativamente mayor de DT (según Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales) que el promedio de las estaciones Pudahuel y P. O'Higgins (Fig. 6.13).

Estos resultados muestran que contrario a lo que se cree, en lo que respecta a MP > 10µm, la realidad de Valparaíso no dista mucho de la de Santiago.

Fig. 6.13 Año Promedio de Deposición Total para el periodo de muestreo

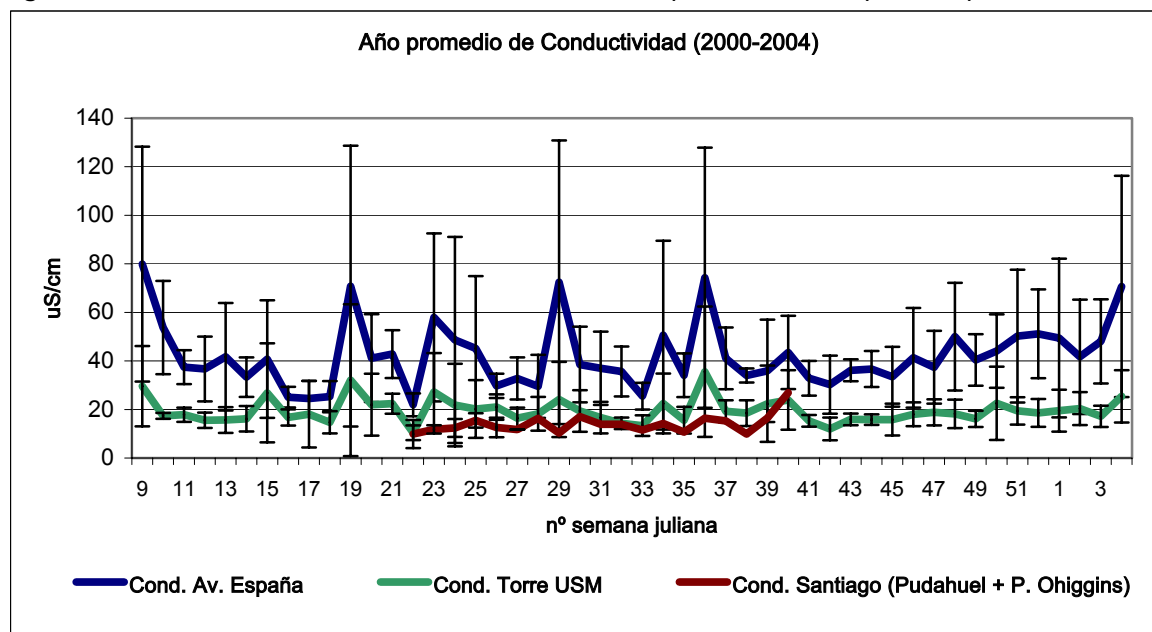


Lo anterior se ratifica al observar los datos obtenidos durante el periodo de muestreo paralelo, de la semana 22 a la 40, es decir, durante el periodo de Invierno. Durante ese tiempo la estación Torre USM capturo en total (es decir, la suma del periodo) 48 g/m² x mes de DT contra 35 g/m² x mes en promedio de las estaciones de Santiago (Pudahuel y P. O'Higgins). Muy por encima de estos valores, la estación Av. España capturo un total de 303.7 g/m² x mes (ver tabla 9.15 ANEXO 02)

Uno de los factores que explicaría la menor concentración de DT recolectada en Santiago, comparada con la estación Torre USM, sería el hecho que, como muestra la tabla 9.16 (ANEXO 02), la cantidad de agua caída en Santiago fue menor en el periodo de muestreo paralelo. Esto porque a mayor cantidad de agua caída (medida como DH en mm), mayor es la recolección de DT.

Para el mismo periodo de muestreo, los valores de conductividad de la DT mostraron ser mayores en ambas estaciones de Valparaíso (Av. España = 41.5 +/- 14 µS/cm ; Torre USM = 20 +/- 5.5 µS/cm) que en el promedio de las estaciones de Santiago (Santiago = 14.05 +/- 3.9) (ver tabla 9.17, ANEXO 02), lo que se explica por la mayor concentración de MP > 10 recolectado tanto en la estación Av. España como en la Torre USM, comparadas con Pudahuel y P. O'Higgins, y por la influencia de los iones presentes en los aerosoles marinos sobre las dos primeras. La figura Fig. 6.14 muestra estos resultados, en un grafico del año promedio de conductividad.

Fig. 6.14 Año Promedio de conductividad de la Deposición Total para el periodo de muestreo



Los valores de pH obtenidos muestran que la DT es más básica en la estación Av. España ($\text{pH} = 6.58 \pm 0.48$) que en la estación Torre USM ($\text{pH} = 6.28 \pm 0.47$) o en las estaciones monitoreadas en Santiago (pH promedio = 6.28 ± 0.3) (tablas 9.6 y 9.17, ANEXO 02). Además, al realizar un análisis estadístico (Prueba t para medias de dos muestras emparejadas) se comprueba que las diferencias de pH entre las estaciones de Santiago no es significativa. Sin embargo, al realizar el mismo análisis se observa que existe una diferencia significativa entre los valores de pH de las estaciones de Valparaíso, a pesar que en promedio este valor se muestra estable durante todo el año en cada una de las estaciones (ver tabla 9.17, ANEXO 02).

En cuanto a la DH (medida como mm agua caída), su conductividad mostró ser mayor en ambas estaciones de Valparaíso (estación Av. España = 60.78 ± 35.6 ; estación Torre USM = 44.13 ± 23.9) que en las estaciones de Santiago (promedio 25.87 ± 15).

Los muestreos de DH indican claramente que en invierno Santiago presenta valores mas altos en sus eventos de precipitación ($\text{pH} = 6.43 \pm 0.41$) que el pH de las estaciones de Valparaíso (estación Av. España = 5.42 ± 0.36 ; estación Torre USM = 5.43 ± 0.38) que es prácticamente el pH del agua de lluvia. Este es un resultado muy importante, puesto que en la atmósfera santiaguina existe presencia importante de CO_2 , NO_x y SO_x , (que son precursores de lluvia ácida) y se hubiera esperado una acidez mayor en la DH medida. Esta tendencia a un pH básico del agua de lluvia capturada en Santiago se debería a que existen elementos (especies químicas) en el MP y en la misma composición del suelo (Fosfatos, Amonios, etc.) que están actuando como soluciones reguladoras de pH, neutralizando la acidez de la lluvia.

6.5 Evaluación de la efectividad de los procesos de Deposición como mecanismos de limpieza de la atmósfera

A partir de la data histórica obtenida con los CPDT en las estaciones de Valparaíso, se obtuvieron los siguientes resultados:

Análisis de MP

En la tabla 6.7 puede observarse que las variables medidas en las estaciones de monitoreo se relacionan de manera distinta según los periodos del año. Para esto se analizaron los periodos de verano y de invierno. Se consideró *invierno* al periodo desde la primera semana de junio hasta la última semana de septiembre, y *verano* al periodo que abarca desde la primera semana de diciembre a la última semana de marzo.

Para el caso de la estación Av. España, donde en promedio se captura cuatro veces más DT que en la estación Torre USM en un año, la influencia de los fenómenos de precipitación es importante a tal punto que en invierno, se captura un 37.7% más de MP>10 que en verano. Además al contrastar esto con el total de DT recolectado en esta estación de monitoreo, podemos notar que solo en invierno se recolecta el 41% del total anual de DT, contra apenas un 25% del total anual en verano.

En la estación Torre USM, la relación anterior se invierte: en verano se recolecta un 18% mas de DT que en invierno. Esto da como resultado que mas del 34% del total de DT anual en esta estación, se capture en verano y solo un 28% de ese total en invierno (Tabla 6.7).

Este resultado se debe a que la estación Torre USM está ubicada en una posición y a una altura tal que (a barlovento y sobre los 70 m.s.n.m), los regímenes de vientos que la afectan en invierno [con dirección predominante suroeste y que pueden ir fácilmente de los 4,5 m/s a los 8 o 10 m/s] ayudan a la DH a dispersar eficientemente el MP que se encuentra en la atmósfera cercana, teniendo esto como resultado que la estación capture una cantidad menor de DT. Estas altas velocidades en los vientos tienen otro efecto (antes señalado), y es que cambian la trayectoria (inclinación) de la gota de lluvia, haciendo que esta estación además capture menos DH (medida como mm de agua caída). Esto no ocurre en Av. España, porque además de estar a nivel del mar, se encuentra protegida por la ladera del cerro y por los mismos edificios de la Universidad, midiéndose velocidades de viento no superiores a los 4 m/s.

Tabla 6.7 Concentración de DT para el año promedio del periodo de muestreo

DT (g/m ² x mes)	Concentración de DT para el año promedio del período 2000-2004					
	VERANO (*)		INVIERNO (*)		ANUAL	
	Av. España	Torre USM	Av. España	Torre USM	Av. España	Torre USM
Suma	169,55	51,88	272,27	42,48	664,49	151,52
Promedio Semanal	12,11	3,71	16,02	2,5	13,84	3,16
Desviación Estándar	1,74	0,71	3,23	0,61	3,14	0,89

(*)Nota: Se considero *invierno* al periodo desde la primera semana de junio hasta la última semana de septiembre, y *verano* al periodo que abarca desde la primera semana de diciembre a la última semana de marzo.

Análisis de conductividad y pH

En la tabla 9.18 del ANEXO 02 se observa que para la Av. España existe una relación entre la conductividad de la DT y el periodo del año en que se mide. De esta forma, en promedio la conductividad es en invierno un 17% menor que en verano para esa estación de monitoreo. Esto se debería a que la primera lluvia bastaría para limpiar la atmósfera de MP>10, las precipitaciones posteriores tendrían como resultado un fenómeno de dilución de las muestras.

Para el caso de la estación Torre USM esta relación no existe, esto se debería a que la cantidad de DT que colecta esta estación tiene una variabilidad escasa (Desv. Estándar. = 0.89) durante todo el año, y por ende sus conductividades también son similares (ver tabla 9.18, ANEXO 02). En cuanto al pH, como ya sabemos este es prácticamente constante durante todo el periodo de muestreo (tabla 9.6, ANEXO 02).

Al comparar la deposición total recolectada previamente a eventos de precipitación en las estaciones Av. España y Torre USM, con aquella que es recolectada después de estos mismos eventos (ver tablas 9.19 a 9.24, ANEXO 02), se puede establecer que solo en el 11% de las mediciones la cantidad de deposición total disminuye claramente después de las precipitaciones, por el contrario, en más del 60% de los casos no se aprecia una influencia clara de las precipitaciones sobre la recolección de deposición total. En cuanto a la conductividad, se observa que un 37% de las veces esta aumenta luego de una semana de precipitaciones y un 49% de las veces medidas disminuye. Para poder evaluar el efecto de las deposición húmeda sobre la depuración de la atmósfera, se necesitaría información diaria tanto de deposición total como de cantidad de agua caída. Sin embargo, esto no sería suficiente, pues en Valparaíso los fenómenos meteorológicos tienen carácter continental, es decir, Valparaíso presenta una geografía “abierto”, influyendo muchas variables sobre la distribución del MP, a diferencia de Santiago, que por sus condiciones geográficas constituye un claro microclima.

En cuanto a las mediciones realizadas en las estaciones Pudahuel y P. O’Higgins (Santiago) con los CPDT (ver tablas 9.25, 9.28, 9.31 y 9.34; ANEXO 02) no se observa una relación clara entre los fenómenos de deposición y la limpieza de la atmósfera. Esto obedecería a la resolución del método de monitoreo, pues al ser semanal el posible efecto de depuración atmosférico no se distingue, debido a la resuspensión del MP.

Para un análisis más fino, se estudio el Índice de calidad del aire por partículas (ICAP) para las fechas coincidentes con las mediciones realizadas en Santiago con los CPDT. Con la ventaja que el ICAP es un índice diario (monitoreado activamente) por lo que se tendrían los datos de cada evento de precipitación, además de las condiciones atmosféricas y de contaminación previas y posteriores a cada evento. Aunque sobre datos de MP10 y no de MP>10, que es el obtenido en los CPDT. En la tabla 6.8 se definen los niveles de calidad del aire según el ICAP.

Tabla 6.8 Niveles de calidad del aire (Fuente: www.conama.cl)

Niveles de calidad del aire		
NIVEL 0	BUENO A REGULAR	MP10 menor a 195 ug/m3N
NIVEL 1	ALERTA	MP10 195 a 239 ug/m3N
NIVEL 2	PRE EMERGENCIA	MP10 240 a 329 ug/m3N
NIVEL 3	EMERGENCIA	MP10 330 ug/m3N o superior

Nota: Nivel Bueno : MP10 menor a 100 ug/m3N
 Nivel Regular : MP10 101 a 194 ug/m3N

Para realizar el análisis de eficiencia de las deposiciones, se creo una matriz de limpieza de la atmósfera basada en los datos obtenidos del ICAP (ver tablas 9.26, 9.29, 9.32 y 9.35, ANEXO 02). Esta matriz presenta las condiciones de contaminación atmosférica antes, durante y después del evento de precipitación y entrega un primer diagnostico de eficiencia, que puede ser:
 “no efecto”: si las condiciones previas y posteriores al evento no varían,
 “limpia” : si las condiciones de contaminación atmosférica mejoran después del evento,
 “ensucia” : si la calidad del aire posterior al evento empeora.

Además, para distinguir aquellas situaciones donde el primer diagnóstico se obtuviera de distintas condiciones de contaminación, por ejemplo:

ICAP ANTES	ICAP DURANTE	ICAP DESPUES	DIAGNOSTICO
BUENO	REGULAR	BUENO	NO EFECTO
BUENO	BUENO	BUENO	NO EFECTO

Lo anterior dio como lugar un segundo diagnóstico, complementario del primero, donde:

- Para el caso de los diagnósticos “ensucia” o “limpia”, el signo (-) indica una disminución y el signo (+) indica un aumento del efecto del diagnóstico, de esta forma:

L+ >L > L-
E+ >E > E-

- Para el caso de los diagnósticos “no hay efecto”, el signo (-) indica que el efecto no es claro, pero empeora la situación original y el signo (+) que el efecto no es claro, pero mejora la situación original. de esta forma:

NE+ >NE > NE-

A continuación se observa la matriz que fue aplicada como método de estudio.

Tabla 6.9 Matriz de eficiencia de limpieza de la atmósfera

MATRIZ DE EFICIENCIA DE LIMPIEZA DE LA ATMOSFERA				
ICAP ANTES PRECIPITACION	ICAP DURANTE PRECIPITACION	ICAP DESPUES PRECIPITACION	DIAGNOSTICO (1)	DIAGNOSTICO (2)
BUENO	BUENO	BUENO	NO EFECTO	NE
BUENO	BUENO	REGULAR	ENSUCIA	E-
BUENO	REGULAR	REGULAR	ENSUCIA	E+
BUENO	REGULAR	BUENO	NO EFECTO	NE
BUENO	BUENO	ALERTA	ENSUCIA	E-
BUENO	ALERTA	ALERTA	ENSUCIA	E+
BUENO	ALERTA	BUENO	NO EFECTO	NE
REGULAR	REGULAR	REGULAR	NO EFECTO	NE
REGULAR	REGULAR	BUENO	LIMPIA	L-
REGULAR	BUENO	BUENO	LIMPIA	L+
REGULAR	BUENO	REGULAR	NO EFECTO	NE
REGULAR	REGULAR	ALERTA	ENSUCIA	E-
REGULAR	ALERTA	ALERTA	ENSUCIA	E+
REGULAR	ALERTA	REGULAR	NO EFECTO	NE
ALERTA	ALERTA	ALERTA	NO EFECTO	NE
ALERTA	ALERTA	REGULAR	LIMPIA	L-
ALERTA	REGULAR	REGULAR	LIMPIA	L+
ALERTA	REGULAR	ALERTA	NO EFECTO	NE
ALERTA	ALERTA	BUENO	LIMPIA	L-
ALERTA	BUENO	BUENO	LIMPIA	L+
ALERTA	BUENO	ALERTA	NO EFECTO	NE

Al realizar el análisis se puede concluir (ver tablas 9.26, 9.29, 9.32 y 9.35; ANEXO 02), que contrario a lo esperado, no existe un efecto claro (79% de las mediciones) de los eventos de precipitación sobre la limpieza de la atmósfera. De hecho, solo en el 10% de los casos se aprecia un evidente efecto positivo (limpieza).

Además, existe un antagonismo entre los fenómenos de autodepuración de la atmósfera y las condiciones meteorológicas de Santiago, ya que en un 10% de las mediciones la calidad del aire empeoró con las precipitaciones, y esto coincidió con condiciones meteorológicas específicas (ver tablas 9.27, 9.30, 9.33 y 9.36, ANEXO 02) como son: la aproximación de núcleos fríos desde el este, es decir, desde la cordillera de los Andes hacia el valle central, provocando que el aire al descender se caliente por compresión, intensificando la inversión térmica de subsidencia.

En estas condiciones, la capa de mezcla que tiende a desarrollarse durante el día por efecto del calentamiento superficial, ve su crecimiento disminuido por la fuerte estabilidad que debe vencer. Esta reducción en la altura de la capa de mezcla produce una disminución del volumen de aire en el cual los contaminantes pueden ser dispersados, y en consecuencia el aumento en la concentración de contaminantes en el aire de la ciudad y zonas cercanas. A esto se suman el ingreso de vaguadas costeras y malas condiciones de ventilación que actúan de manera sinérgica en contra de la efectividad de los fenómenos de autodepuración de la atmósfera.

Lamentablemente, los factores meteorológicos adversos a la contaminación están presentes la mayor parte del tiempo en la zona central del país, de manera que las condiciones promedio en la cuenca de Santiago tienden a la acumulación de contaminantes. Es importante recordar que los factores meteorológicos solo modulan los niveles de contaminación, y son las emisiones las causantes reales del problema.

7. CONCLUSIONES

Sobre el procesamiento de las muestras

1. La extracción mediante microondas no mostró ser significativamente mayor (según análisis estadístico “Prueba T para dos muestras emparejadas”) que los demás métodos de extracción, sin embargo, posee ventajas comparativas claves que justifican su elección, como lo son su rapidez y menor número de etapas.
En cuanto al resto de los métodos empleados, ninguno de ellos presenta una ventaja clara y significativa sobre los demás. Sin embargo, se puede afirmar que el aporte del ultrasonido como método de extracción secundario es mínimo.
2. La conductividad utilizada en el procesamiento de los datos debe ser la obtenida inmediatamente después de la extracción, debido a un aumento posterior a la medición. De todas formas el aumento de la conductividad de las muestras por exposición al ambiente de laboratorio es mínimo y se debe a la captación de iones del entorno y a una pequeña reducción de volumen del solvente producido por la evaporación natural.
3. La dilución de una muestra afecta de manera distinta al pH y la Conductividad. En el caso de la primera variable, ésta disminuye poco y se debe principalmente a que por ley de logaritmo se necesita que el volumen disminuya 10 veces para que baje en una unidad el pH.
En el caso de la conductividad, la disminución es notoria y ocurre de manera directamente proporcional a la cantidad de solvente con el que se realiza la dilución. Esto permite introducir un factor de corrección para las muestras obtenidas en los meses de febrero (obtenidas de manera mensual).

Sobre la caracterización fisicoquímica de las muestras

4. Los monitoreos semanales capturan en promedio un 18% más deposición total (DT) que los mensuales, esto ocurre en más del 82% de las mediciones. Conforme a esto, las conductividades de las muestras semanales son en más de un 80% de las veces mayores que las mensuales, alcanzando diferencias de hasta un 200%. En cuanto al pH, este se muestra independiente del tiempo de muestreo, variando apenas entre 0.2% y 0.6%.
5. La estación de monitoreo Av. España colecta una gran cantidad de DT debido a que es una estación de alto tráfico, por lo que presenta mayores concentraciones de material particulado (de distinto tamaño), se suma a esto el efecto mecánico de resuspensión y fraccionamiento de MP que producen los vehículos. Conforme a esto, es también la estación de monitoreo que presenta la más alta conductividad.
6. En cambio, la estación Torre USM (que representa la realidad de los cerros de Valparaíso) captura mucho menos material particulado sedimentable debido a que no colecta directamente el material particulado como en la estación de tráfico, al encontrarse a una altura considerable (70 m.s.n.m) y además a que esta sometida a fuertes regímenes de vientos durante gran parte del año que mantienen limpia la atmósfera cercana.
7. La conductividad de la deposición húmeda (DH) en la estación Av. España es un 29% mayor que en la estación Torre USM, lo que es consistente con la mayor cantidad de deposición total (77%) que se colecta en la primera.

8. En Valparaíso la DH muestra claramente una relación inversa entre agua caída y conductividad, es decir, a mayor cantidad de agua caída, menor conductividad; lo que indicaría que basta la primera lluvia semanal para limpiar la atmósfera de $MP > 10\mu m$, pues las lluvias posteriores solo tendrían un efecto de dilución sobre la muestra. Sin embargo, la efectividad de este primer evento de precipitación depende de la concentración de MP en la atmósfera y de condiciones meteorológicas como la velocidad de los vientos y la inclinación de caída de las gotas de lluvia, entre otros. Lo cual diferencia ampliamente a ambas estaciones de monitoreo de Valparaíso. En cambio, el pH de la DH es independiente a la estación de monitoreo en la que se mida.
9. Las estaciones Pudahuel y P. O'Higgins no presentan diferencias significativas (según análisis estadístico "Prueba T para dos muestras emparejadas") en cuanto a cantidad y características fisicoquímicas del MP recolectado, debido a que preliminarmente sus fuentes son las mismas.
10. La mayor conductividad de la estación Av. España comparada con las estaciones de Santiago se debe principalmente a que en Valparaíso el aerosol marino contribuye de manera importante en la presencia y a que existe una mayor concentración de deposición total.

Sobre la efectividad de las deposiciones

11. Las estaciones Pudahuel y P. O'Higgins no colectan una cantidad significativamente mayor de DT que la estación Torre USM (según "Prueba T para dos muestras suponiendo varianzas desiguales") a pesar de que esta última está ubicada en altura y está sometida a fuertes vientos. Esto indica que, en lo que respecta a $MP > 10\mu m$, la realidad de Santiago no dista mucho de la de Valparaíso. Uno de los factores que explica la menor concentración de DT recolectada en Santiago, sería el hecho que la cantidad de agua caída en esa ciudad fue menor (62% menos que en estación Av. España y 40% menos que en estación Torre USM) en el periodo de muestreo paralelo con Valparaíso (2001–2003). Esto debido a que a mayor cantidad de DH, mayor es la recolección de DT.
12. En una estación de alto tráfico como Av. España (con altas concentraciones de material particulado sedimentable y con un elevado nivel de resuspensión del mismo, por acción mecánica de los vehículos) la influencia de los fenómenos de precipitación es importante a tal punto que en invierno, se captura un 37.7% más de MP que en verano. Además al contrastar esto con el total de MP recolectado (como DT) en esta estación, podemos notar que solo en invierno se recolecta el 41% del total anual de MP, contra apenas un 25% en verano. Esta relación no se mantiene para el caso de la estación Torre USM, ya que en ese lugar existe un fenómeno de artefacto de muestreo causado por eventos meteorológicos (precipitaciones y vientos) locales.
13. No obstante lo anterior, al comparar la DT recolectada previamente a eventos de precipitación en las estaciones Av. España y Torre USM, con aquella que es recolectada después (una semana) de estos mismos eventos, se observa que solo en el 11% de las mediciones la cantidad de deposición total disminuye claramente después de las precipitaciones, por el contrario, en más del 60% de los casos no se aprecia una influencia clara de las precipitaciones sobre la recolección de DT. Esto se debe a que las precipitaciones arrastran parte del $MP > 10\mu m$ en suspensión, pero al dejar de llover este se resuspende paulatinamente, y como el método pasivo utilizado (CPDT) no posee una resolución temporal elevada, este efecto no se aprecia.

14. El grado de efectividad de las DH como agentes de limpieza de la atmósfera, depende más de la continuidad que de la intensidad de los eventos, puesto que el $MP > 10\mu m$ se resuspende rápidamente entre fenómenos de precipitación. Tanto es así, que al realizar el análisis los datos del ICAP en Santiago se observa que, contrario a lo esperado, en un 79% de las mediciones no existe un efecto claro de los eventos de precipitación sobre la limpieza de la atmósfera. De hecho, solo en el 10% de los casos se aprecia un evidente efecto positivo (limpieza), medido como el valor del índice ICAP y como evaluación cualitativa de la clasificación del mismo índice.
15. Existe un antagonismo entre los fenómenos de autodepuración de la atmósfera y las condiciones meteorológicas de Santiago, ya que en un 10% de las mediciones la calidad del aire (ICAP) empeoró con las precipitaciones, y esto coincidió con condiciones meteorológicas específicas como la aproximación de núcleos fríos, el ingreso de vaguadas costeras en superficie y malas condiciones de ventilación en el valle.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. López Bonillo, Diego
El medio ambiente
Editorial Cátedra
Madrid, 2001
2. Derek, Elsom
La contaminación atmosférica
Editorial Cátedra
Madrid, 1990
3. Moretton
Contaminación de aire en Argentina, aspectos generales, legislación y situación en la capital federal y provincia de Buenos Aires
Ediciones Universo
Buenos Aires, 1996
4. Anural y otros
Informe anual del Banco Mundial
Banco Mundial
1997
5. Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente
www.sesma.cl
2004
6. Ministerio de Obras Publicas, Transporte y Medio Ambiente
Dioxinas y Furanos: problemática ambiental y metodología analítica
Madrid, 1996
7. Sociedad Española de Física
www.fisicaysociedad.es
2004
8. Rocha, L.; Orlando, J.; Vera L.
Modelos gaussianos de difusión atmosférica, evaluación de un caso fuerte elevado en la región de Valparaíso
Departamento de Obras Civiles, UTFSM
1982 - 1993
9. Vergaz, Ricardo
Atmospheric aerosol characterization
Universidad de Valladolid
España, 2001

10. Krupa, Sagar.
Sampling and physico-chemical análisis of precipitation: a review
Article in press, Elsevier
USA, 2002
11. Wark, Warmer
Contaminación del aire: origen y control
Editorial Limusa S.A. de e.v
México, 1996
12. Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente
Análisis de las normas de calidad del aire en Chile, México, Estados Unidos y la
Comunidad Europea
Sesma, Chile
2002
13. Environmental Pollution Agency
www.epa.org
2004
14. Organización Panamericana de la Salud
Plan regional sobre la calidad del aire urbano y Salud para el periodo 2000 - 2009
Oficina regional de la OMS
Washington D.C, USA
2000
15. Cereceda Balic, Francisco
Definición de los aspectos técnicos de la norma primaria para material particulado
respirable (PM10) y u evaluación técnico económica
Chile, 2002
16. Pontificia Universidad Católica de Chile
www.puc.cl/sw_educ/contam/index.html
17. Sandoval, H.; Prendez M.
Contaminación atmosférica de Santiago: estado actual y soluciones
Universidad de Chile
Santiago, Chile 1993
18. Ministerio de Transportes
Secretaria regional de transportes
SECTRA, 1999
19. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
www.shoa.cl
2004

20. Corvalán, C.; Corral, M.
Estudio diagnóstico de la calidad del aire en regiones urbano industriales de Chile
CONAMA, 1999
21. Kavouras, I.G.; Cereceda, F.; Oyola, P.
Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in five Chilean cities using factor analysis
Journal of the air and waste management association
2001
22. Rodríguez A.P.; Romieu I.
Introducción al monitoreo atmosférico
Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y medio ambiente
Oficina regional de la OMS
www.cepis.org.com
1999
23. Schnelle, Karl B.; Dey Portha R.
Atmospheric dispersion modeling compliance guide
Editorial McGraw-Hill
New York, 2000
24. Seinfeld, John H.; Pondis Spyris N.
Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change
Editorial John Wiley and Sons, INC
New York, 1998
25. Baumbach, Günter
Air quality control: formation and sources, dispersion characteristic and impact of
pollution-measuring methods, techniques for reduction of emissions and regulations for
air quality control
Editorial Springer
Berlin, 1996
26. World Meteorological Organization
Report of the workshop on precipitation chemistry laboratory techniques
Global Atmospheric Watch n° 102
Hradec Kralove, Czech Republic
18 – 21 october 1994
27. World Meteorological Organization
Global atmospheric watch measurements guide
Global Atmospheric Watch n° 143
2001
28. World Meteorological Organization
Report on passive samplers for atmospheric chemistry measurements and their role
in GAW
Global Atmospheric Watch n° 122
1997

29. World Meteorological Organization
Expert meeting on chemistry of aerosols, clouds and atmospheric precipitation in the former USSR
Global Atmospheric Watch n° 116
Saint Petersburg, Russian Federation
13 – 15 november 1995
30. Henry, J. Glynn
Ingeniería Ambiental
Editorial Prentice Hall
Mexico, 1999
31. Kiely, Gerard
Ingeniería Ambiental
Editorial McGraw-Hill
Madrid, 1999
32. Klaassen, Curtis D.
Casarett and Doull Manual de toxicología: la ciencia de los tóxicos
Editorial McGraw-Hill
Mexico, 2001
33. Pena C., Francisco
Medio ambiente y salud
Editorial Santiago de Compostella
Compostella, 1998
34. Vega de Kuyper, Juan Carlos
Química del medio ambiente y de los recursos naturales
Ediciones Universidad Católica de Chile
Santiago, 2002
35. de Nevers, Noel
Air pollution control engineering
Editorial McGraw-Hill
Boston, USA
2000
36. Law, R.J. and Biscaya, J.L
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)- Problems and progress in sampling, analysis and interpretation
Marine Pollution Bulletin 29
1994
37. Miller, J.C; Miller, J.N
Estadística para Química Analítica
Ediciones Addison-Wesley
USA, 1993

9. ANEXOS

ANEXO 01 : RESULTADOS DE EXPERIMENTOS

⇒ Tabla 9.1 Resultados del experimento n° 1 de evaluación del tipo de extracción

Filtro n°	pH inicial	[uS/cm] inicial	MP en Filtro [mg]	Método	pH	[uS/cm]	Δ pH	Δ uS/cm
A-1	5,49	37,9	10,42	Eb	6,07	40,8	0.58	2.9
B-1	5,54	51,8	11,32	Eb + Us	6,02	60,4	0.48	8.6
C-1	5,67	30,8	11,22	Us + Eb	6,05	31,9	0.38	1.1
D-1	5,57	28	10,92	Mw	6,04	41,9	0.47	13.9

A-2	6,11	27,1	19,66	Eb	6,15	30,6	0.04	3.5
B-2	5,76	31	18,42	Eb + Us	6,09	32,8	0.33	1.8
C-2	5,81	22,8	26,8	Us + Eb	6,34	24,2	0.53	1.4
D-2	5,8	28,4	23,17	Mw	6,18	36,6	0.38	8.2

A-3	5,7	10,8	15,25	Eb	6,14	31	0.44	20.2
B-3	5,27	31,1	16,77	Eb + Us	6,08	84	0.81	52.9
C-3	5,15	21,8	16,17	Us + Eb	6,15	24,7	1	2.9
D-3	5,14	17,9	15,69	mW	6,22	115,7	1.08	97.8

⇒ Tabla 9.2 Resultados del experimento n° 2 de evaluación del tipo de extracción

Filtro n°	MP en filtro (mg)	uS/cm inicial	Método	uS/cm media	uS/cm final	Δ uS/cm
A - 1	13.78	27.4	Eb.	32.15	41.1	13.7
A' - 1	6.94	34.2	Eb.	39.95	45.3	11.1
A - 1	13.78	27.4	Eb. + Us.	32.45	42.3	14.9
A' - 1	6.94	34.2	Eb. + Us.	40.35	45.9	11.7
B - 1	17.14	43	Eb. + Us.	52.3	65.1	22.1
B' - 1	12.51	32.6	Eb. + Us.	39.35	49.2	16.6
C - 1	17.07	47.2	Us. + Eb.	57.2	67.5	20.3
C' - 1	10.85	31.9	Us. + Eb.	38.4	47.4	15.5
D - 1	14.14	31.2	mW.	39.2	52.8	21.6
D' - 1	9.41	32.7	mW.	37.2	51.3	18.6
D - 1	14.14	31.2	mW. + Us.	39.8	52.9	21.7
D' - 1	9.41	32.7	mW. + Us.	37.6	51.5	18.8

⇒ Tabla 9.3 Resultados del experimento de comparación del tiempo de ebullición y exposición al ambiente sobre las propiedades de la muestra

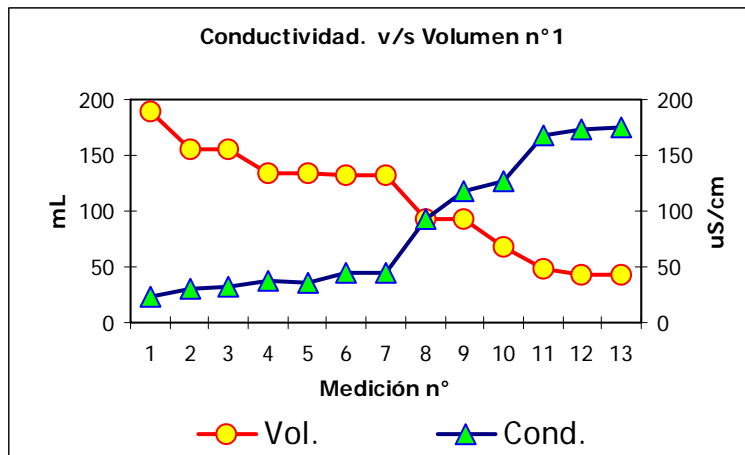
Ebullición 1		Ebullición 2	
Vol (ml)	uS/cm	Vol (ml)	uS/cm
189,7	23,4	188	28,7
155,2	29,8	148	37,5
155,2	32,1	148	40,3
133,5	37,1	123,5	46,5
133,5	36,6	123,5	45,7
133	44,1	108	75,1
133	45,2	108	97,2
93	92	81,2	129,8
93	117	81,2	166,6
68	125,9	63	178,7
48	167,9	43,6	236,7
43,4	173,7	43,6	259,6
43,4	174,5	43	261,9

Exposición 1		Exposición 2	
Vol (ml)	uS/cm	Vol (ml)	uS/cm
171,3	27,8	169,2	49,5
171,3	35,2	169,4	51,7
171,3	36,8	169,4	53,1
171,3	39,7	169,4	53,7
164,7	39,5	168,6	55
163	40,4	168,6	55,7
163	41,3	168	57,4
163	41,6	168	57,6
163	43,2	160	43,2
158,7	47,1	158,4	47,1
158,4	44,6	158,4	44,6
158	45,4	156	45,4
158	45,8	156	45,8

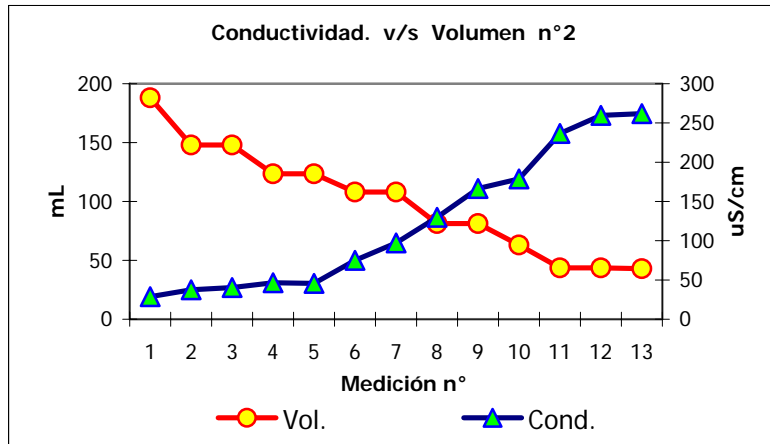
⇒ Tabla 9.4 Promedios de ebullición y exposición del experimento de comparación del tiempo de ebullición y exposición al ambiente sobre las propiedades de la muestra

Promedio Eb.1 + Eb. 2		Promedio Ex.1 + Ex. 2	
Vol (ml)	uS/cm	Vol (ml)	uS/cm
188,85	26,05	170,25	38,65
151,6	33,65	170,35	43,45
151,6	36,2	170,35	44,95
128,5	41,8	170,35	46,7
128,5	41,15	166,65	47,25
120,5	59,6	165,8	48,05
120,5	71,2	165,5	49,35
87,1	110,9	165,5	49,6
87,1	141,8	161,5	43,2
65,5	152,3	158,55	47,1
45,8	202,3	158,4	44,6
43,5	216,65	157	45,4
43,2	218,2	157	45,8

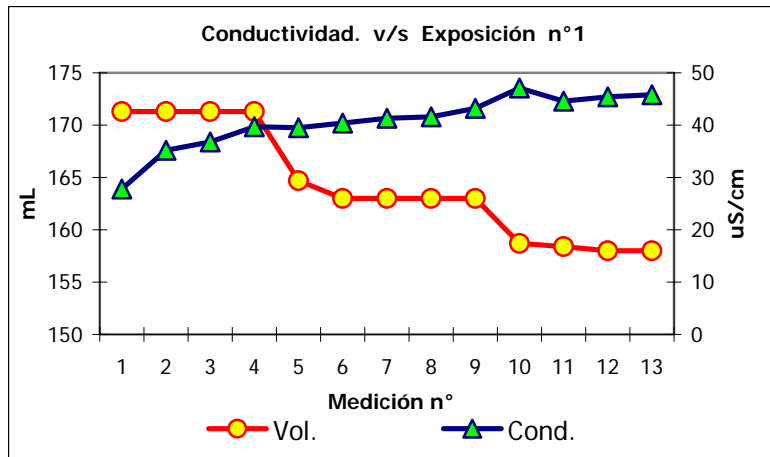
⇒ Fig. 9.1 Gráfico de conductividad v/s volumen n° 1 (muestras A y C) del experimento de ebullición v/s exposición.



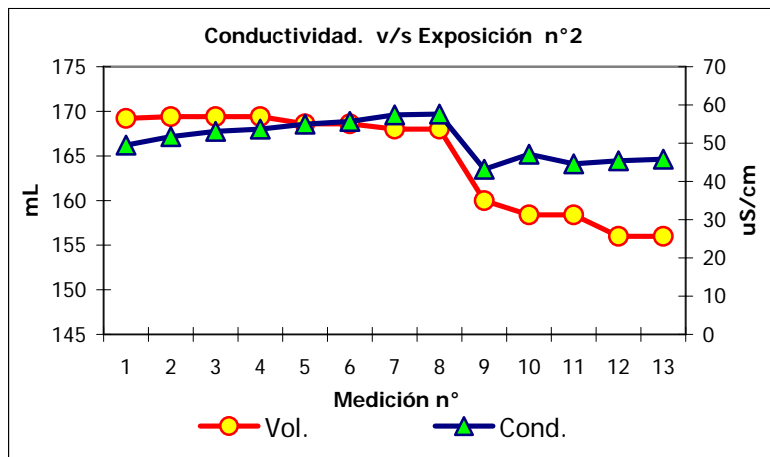
⇒ Fig. 9.2 Gráfico de conductividad v/s volumen n° 2 (muestras B y D) del experimento de ebullición v/s exposición.



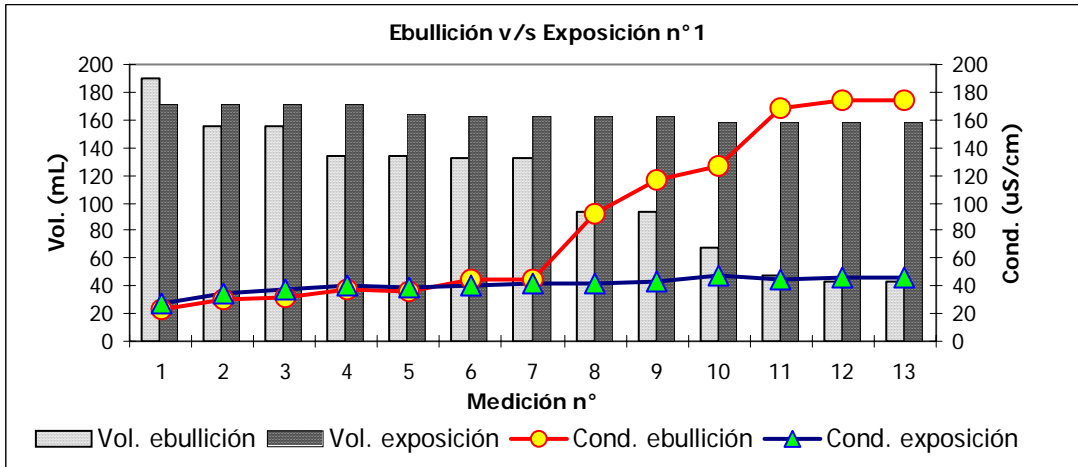
⇒ Fig. 9.3 Gráfico de conductividad v/s exposición n° 1 (muestras A y C) del experimento de ebullición v/s exposición.



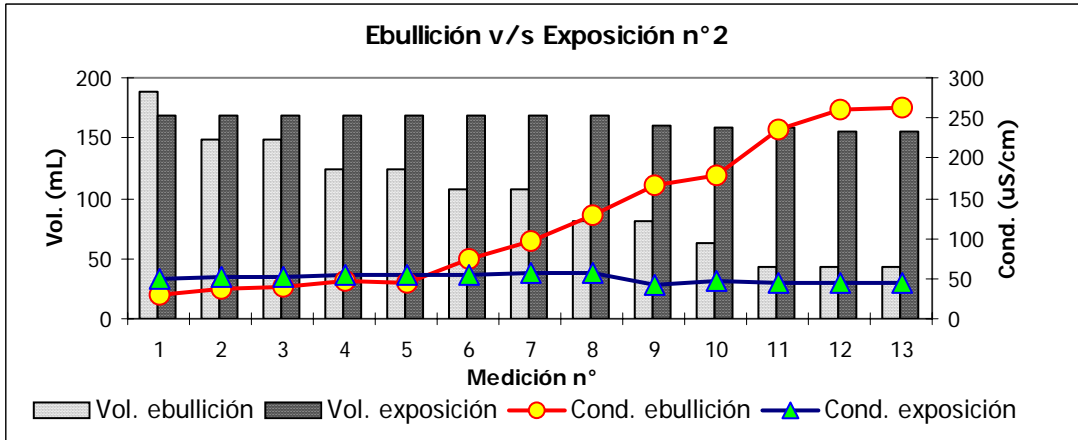
⇒ Fig. 9.4 Gráfico de conductividad v/s exposición n° 2 (muestras B y D) del experimento de ebullición v/s exposición.



⇒ Fig. 9.5 Gráfico ebullición v/s exposición n° 1 (muestras A y C)



⇒ Fig. 9.6 Gráfico ebullición v/s exposición n° 2 (muestras B y D)

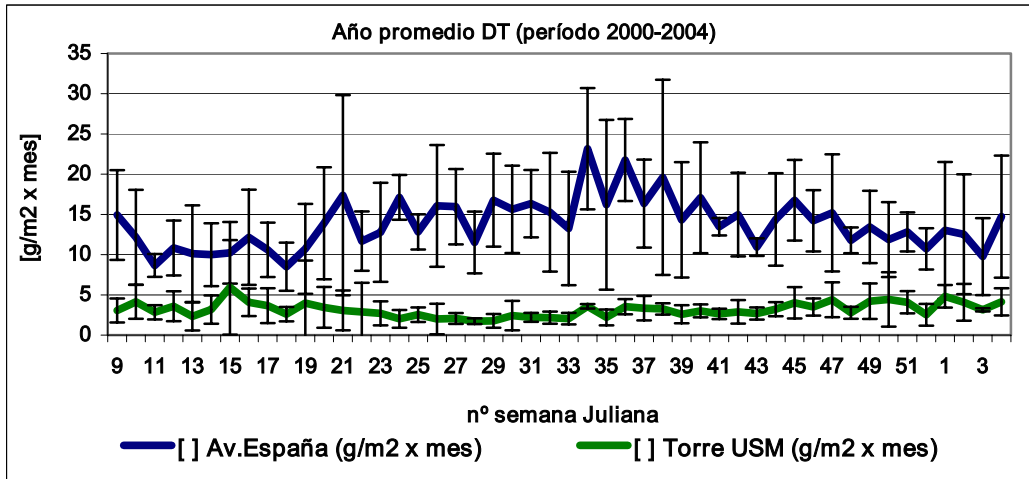


⇒ Tabla 9.5 Resultados del experimento de evaluación del efecto de dilución.

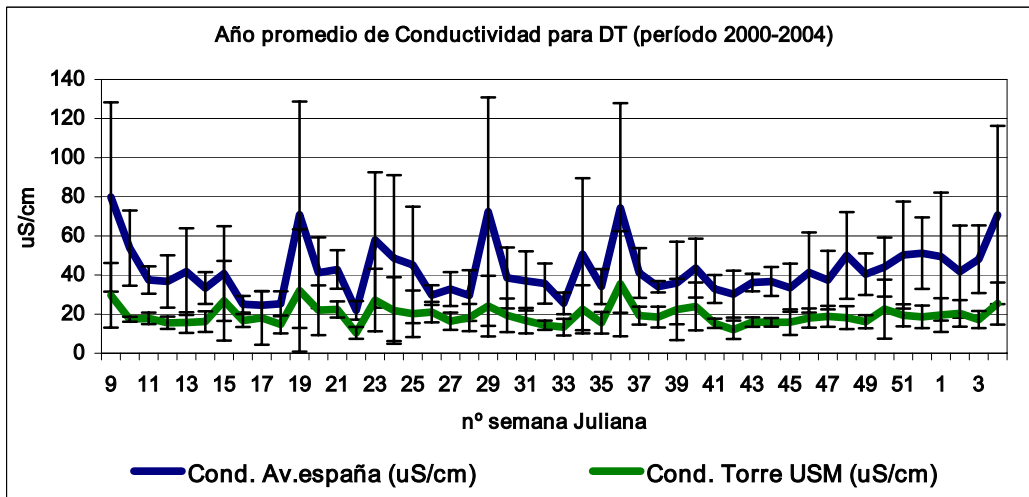
	Muestra # 1		Muestra # 2		Muestra # 3		Muestra # 4	
	pH	uS/cm	pH	uS/cm	pH	uS/cm	pH	uS/cm
pre- ext	6,07	28	6,11	42,9	6,26	37,7	6,27	34,4
post-ext	6,85	34,4	6,8	49,6	6,97	45,1	6,87	48,5
250 ml	6,7	28,2	6,62	37,9	6,64	35	6,64	38,3
300 ml	6,47	29,2	6,43	32,1	6,51	29,6	6,45	31,4
350 ml	6,55	29,9	6,46	32,9	6,49	30,3	6,43	31,6
400 ml	6,33	45,3	6,32	22,4	6,34	26,3	6,35	27,2
450 ml	6,24	40,2	6,28	19,9	6,32	22,7	6,3	24
500 ml	6,2	36,1	6,21	18,2	6,26	20,3	6,28	21,9
550 ml	6,17	32,1	6,18	16,6	6,18	18,4	6,26	19,4
600 ml	6,14	28,7	6,12	15,7	6,16	16,7	6,14	17,9

ANEXO 02 : DATA HISTÓRICA DE DT, DS y DH EN VALPARAÍSO y SANTIAGO

⇒ Fig. 9.9 Año promedio de DT



⇒ Fig. 9.10 Año promedio de conductividad para DT



⇒ Tabla 9.6 Promedios anuales de pH para DT, DS y DH

Sección 1.02 PROMEDIOS ANUALES DE pH						
AÑOS	TORRE USM			AV. ESPAÑA		
	DT	DS	DH	DT	DS	DH
2000	5,72 +/- 0,39	5,78 +/- 0,38	5,17 +/- 0,85	6,07 +/- 0,29	6,12 +/- 0,26	5,26 +/- 0,49
2001	6,30 +/- 0,57	6,43 +/- 0,53	5,49 +/- 0,64	6,74 +/- 0,63	6,87 +/- 0,62	5,57 +/- 0,60
2002	6,40 +/- 0,50	6,47 +/- 0,29	5,0 +/- 1,28	6,68 +/- 0,42	6,82 +/- 0,25	5,40 +/- 1,29
2003	6,40 +/- 0,53	6,44 +/- 0,55	5,78 +/- 0,95	6,69 +/- 0,45	6,72 +/- 0,46	5,41 +/- 0,27
2004	6,36 +/- 0,43	6,48 +/- 0,44	5,22 +/- 0,46	6,68 +/- 0,37	6,78 +/- 0,38	5,13 +/- 0,29

⇒ Tabla 9.7 Comparación entre la DT mensual y semanal en Av. España para el año 2002

Año 2002 AV. España						
Mes	DT Mensual	pH	conductividad (uS/cm)	DT Semanal	Promedio	Promedio Cond.
	(g/m ² x mes)			(g/m ² x mes)	pH	(uS/cm)
ENERO	12,13	6,79	57,23	13,17	6,99	81,33
FEBRERO	9,74	6,94	26,28			
MARZO	12,27	6,76	30,83	13,11	6,83	37,63
ABRIL	11,91	7,08	18,95	14,66	6,93	30,32
MAYO	20,05	6,61	20,18	23,60	6,41	74,58
JUNIO	17,19	5,6	8,40	18,02	6,35	26,14
JULIO	12,48	6,33	5,28	14,57	6,22	43,08
AGOSTO	15,79	6,32	8,65	23,85	6,22	38,60
SEPTIEMBRE	20,72	6,62	10,65	23,73	6,63	40,22
OCTUBRE	8,51	7,26	31,03	15,67	6,97	40,55
NOVIEMBRE	8,35	6,93	5,45	15,45	7,01	38,90
DICIEMBRE	7,78	6,79	51,78	11,72	6,90	59,02

⇒ Tabla 9.8 Porcentajes de diferencia y factor de corrección para tabla 9.7

Año 2002 AV. España				
Mes	% diferencia MP {(mes-semana)/mes}*100	Factor de corrección	% diferencia pH	% diferencia conductividad
ENERO	-8,61	1,09	-2,95	-42,13
FEBRERO				
MARZO	-6,80	1,07	-1,07	-22,06
ABRIL	-23,05	1,23	2,06	-60,00
MAYO	-17,69	1,18	2,99	-269,64
JUNIO	-4,80	1,05	-13,32	-211,19
JULIO	-16,78	1,17	1,70	-716,59
AGOSTO	-51,10	1,51	1,62	-346,24
SEPTIEMBRE	-14,56	1,15	-0,21	-277,65
OCTUBRE	-84,09	1,84	4,03	-30,70
NOVIEMBRE	-85,08	1,85	-1,08	-613,76
DICIEMBRE	-50,57	1,51	-1,56	-13,99
Promedio	-33,01	1,33	-2,96	-236,72

⇒ Tabla 9.9 Comparación entre la DT mensual y semanal en Av. España para el año 2003

Año 2003 AV. España						
Mes	DT Mensual	pH	conductividad (uS/cm)	DT Semanal	Promedio	Promedio Cond.
	(g/m ² x mes)			(g/m ² x mes)	pH	uS/cm
ENERO	5,88	6,58	22,10	8,27	6,67	49,03
FEBRERO	6,48	6,8	20,28			
MARZO	6,33	6,58	27,75	6,92	6,47	36,62
ABRIL	7,60	6,77	12,90	8,64	6,72	27,48
MAYO	10,51	6,81	12,78	10,68	6,57	33,92
JUNIO	12,16	6,62	42,55	12,66	6,54	69,30
JULIO	11,12	6,62	19,68	11,26	6,58	27,93
AGOSTO	12,27	6,72	17,45	11,47	6,58	25,64

⇒ Tabla 9.10 Porcentajes de diferencia y factor de corrección para tabla 9.9

Año 2003 AV. España				
Mes	% diferencia MP	Factor de corrección	% diferencia	% diferencia
	{(mes-semana)/mes}*100		pH	conductividad
ENERO	-40,63	1,41	-1,37	-121,87
FEBRERO				
MARZO	-9,27	1,09	1,61	-31,96
ABRIL	-13,65	1,14	0,70	-112,98
MAYO	-1,53	1,02	3,58	-165,52
JUNIO	-4,14	1,04	1,21	-62,87
JULIO	-1,25	1,01	0,68	-41,93
AGOSTO	6,55	0,93	2,02	-46,93
Promedio	-11,00	1,09	1,60	-83,44

⇒ Tabla 9.11 Comparación entre la DT mensual y semanal en Torre USM para el año 2002

Año 2002 TORRE USM						
Mes	DT Mensual	pH	conductividad (uS/cm)	DT Semanal	Promedio	Promedio Cond.
	(g/m ² x mes)			(g/m ² x mes)	pH	uS/cm
ENERO	2,47	SD	SD	4,60	6,79	27,83
FEBRERO	3,21	6,18	10,93	0,00	0,00	0,00
MARZO	3,46	6,25	9,53	3,86	6,43	14,88
ABRIL	5,91	7,77	18,28	6,09	7,01	23,88
MAYO	6,22	6,06	7,03	6,32	6,10	35,88
JUNIO	3,81	5,74	3,58	4,50	6,15	14,28
JULIO	3,99	5,52	6,83	2,89	5,84	18,80
AGOSTO	4,39	5,12	5,25	1,99	5,32	62,90
SEPTIEMBRE	2,12	6,67	14,43	3,33	6,42	19,90
OCTUBRE	3,13	7,06	12,95	3,89	6,53	15,98
NOVIEMBRE	3,66	6,83	11,70	4,94	6,83	22,68
DICIEMBRE	2,70	6,75	17,45	2,65	6,54	20,32

⇒ Tabla 9.12 Porcentajes de diferencia y factor de corrección para tabla 9.11

Año 2002 TORRE USM				
Mes	% diferencia MP	Factor de corrección	% diferencia	% diferencia
	{(mes-semana)/mes}*100		pH	conductividad
ENERO	-86,02	1,86	SD	SD
FEBRERO				
MARZO	-11,67	1,12	-2,88	-56,17
ABRIL	-3,02	1,03	9,73	-30,67
MAYO	-1,49	1,01	-0,66	-410,68
JUNIO	-18,16	1,18	-7,07	-299,44
JULIO	27,70	0,72	-5,80	-175,46
AGOSTO	54,60	0,45	-3,91	-1098,10
SEPTIEMBRE	-57,07	1,57	3,75	-37,95
OCTUBRE	-24,17	1,24	7,47	-23,36
NOVIEMBRE	-35,14	1,35	0,04	-93,80
DICIEMBRE	1,87	0,98	3,08	-16,45
Promedio	-29,17	1,14	-4,44	-224,21

⇒ Tabla 9.13 Comparación entre la DT mensual y semanal en Torre USM para el año 2003

Año 2003 TORRE USM						
Mes	DT Mensual	pH	conductividad (uS/cm)	DT Semanal	Promedio	Promedio Cond.
	(g/m2 x mes)			(g/m2 x mes)	pH	uS/cm
ENERO	2,51	7	13,53	3,21	6,63	3,36
FEBRERO	3,22	6,91	13,08	0,00	0,00	0,00
MARZO	1,91	6,46	13,55	1,78	6,35	1,97
ABRIL	2,37	6,61	6,73	2,23	6,44	2,40
MAYO	SD	SD	SD	2,82	6,27	3,02
JUNIO	1,64	6,33	20,48	1,69	6,43	1,72
JULIO	1,86	6,01	6,63	1,59	6,35	1,63
AGOSTO	1,50	6,01	8,83	1,72	6,12	1,81

⇒ Tabla 9.14 Porcentajes de diferencia y factor de corrección para tabla 9.13

Año 2003 TORRE USM				
Mes	% diferencia MP	Factor de corrección	% diferencia	% diferencia
	{(mes-semana)/mes}*100		pH	conductividad
ENERO	-28,05	1,28	5,24	75,13
FEBRERO				100,00
MARZO	6,67	0,93	1,73	85,43
ABRIL	6,14	0,94	2,57	64,33
MAYO	SD	SD	SD	SD
JUNIO	-2,64	1,03	-1,50	91,61
JULIO	14,17	0,86	-5,62	75,33
AGOSTO	-14,58	1,15	-1,76	79,46
Promedio	-12,04	1,03	-3,07	81,61

⇒ Tabla 9.15 Concentración de DT para el periodo de muestreo

Concentración de DT para el período 2000-2004			
DT (g/m ² x mes)	Av. España	Torre USM	Santiago
Suma anual	664,49	151,52	no corresponde
Suma Invierno (*)	303,67	48,08	35,33
Prom. Semanal Anual	13,84 +/- 3,14	3,16 +/- 0,89	1,86 +/- 0,69
Prom. Semanal Invierno	16 +/- 3,2	2,5 +/- 0,6	1,86 +/- 0,69

(*)Nota : Acá el periodo de invierno corresponde a las semanas julianas 22 a 40.

⇒ Tabla 9.16 mm de agua caída

Agua caída en un Año promedio			
DH (mm)	Av. España	Torre	Santiago
Suma anual	439,59	275,74	110,47
Promedio anual	46,2	28,54	17,18

⇒ Tabla 9.17 Promedios de pH y conductividad por periodo para las tres estaciones de monitoreo

Estación	pH promedio del periodo 2000-2004				Conductividad promedio del periodo 2000-2004			
	Promedio Anual		Promedio Invierno (*)		Promedio Anual		Promedio Invierno (*)	
	DT	DH	DT	DH	DT	DH	DT	DH
Av. España	6,58 +/- 0,48	5,42 +/- 0,36	6,45 +/- 0,49	5,42 +/- 0,37	42,40 +/- 13,50	54,43 +/- 23,39	41,5 +/- 14	60,78 +/- 35,75
Torre USM	6,28 +/- 0,47	5,43 +/- 0,38	6,08 +/- 0,51	5,43 +/- 0,38	19,48 +/- 4,96	38,51 +/- 30,66	20 +/- 5,5	44,13 +/- 23,92
Santiago	6,28 +/- 0,30	6,43 +/- 0,41	6,28 +/- 0,30	6,43 +/- 0,41	14,05 +/- 3,91	25,87 +/- 15	14,05 +/- 3,91	25,87 +/- 15

⇒ Tabla 9.18 Conductividad de DT para el año promedio del periodo de muestreo

(uS/cm)	Conductividad de DT para el año promedio del período 2000-2004					
	VERANO		INVIERNO (*)		ANUAL	
	Av. España	Torre USM	Av. España	Torre USM	Av. España	Torre USM
Promedio	50,3	19,8	41,7	19,7	42,4	19,5
Desviación Estándar	12,5	4	15	5,8	13,5	5

⇒ Tabla 9.19 Deposición total semana a semana en estación Av. España en el año 2001

DT (g/m ² x mes) semana a semana en AV. ESPAÑA 2001									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
15	5,94	6,50	21,30	13,31	6,48	32,30	21,29	6,17	24,60
16	13,31	6,48	32,30	21,29	6,17	24,60	12,66	6,41	33,00
19	6,14	6,23	21,30	10,49	6,10	113,70	17,39	6,53	34,00
21	17,39	6,53	34,00	6,34	6,54	55,70	17,88	6,60	20,20
24	8,31	6,00	46,30	14,20	6,64	28,70	12,26	6,82	29,70
27	12,03	7,25	30,20	21,00	5,97	45,50	11,50	5,52	34,10
28	21,00	5,97	45,50	11,50	5,52	34,10	23,02	6,40	165,00
29	11,50	5,52	34,10	23,02	6,40	165,00	16,39	5,73	54,60
30	23,02	6,40	165,00	16,39	5,73	54,60	14,42	6,18	45,9
34	15,30	6,84	21,00	32,57	6,34	113,00	24,71	8,24	33,80
39	10,35	7,16	36,20	23,93	6,56	67,60	25,15	7,38	53,00

⇒ Tabla 9.20 Deposición total semana a semana en estación Torre USM en el año 2001

DT (g/m ² x mes) semana a semana en TORRE USM 2001									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
15	0,64	5,81	10,50	1,51	6,15	14,00	3,26	5,48	11,90
16	1,51	6,15	14,00	3,26	5,48	11,90	1,94	5,90	10,30
19	1,38	6,13	10,40	1,85	5,72	31,60	1,85	5,99	15,10
21	1,85	5,99	15,10	0,51	6,32	22,20	0,33	6,18	7,40
24	1,07	5,69	17,80	0,96	6,70	15,50	1,49	6,15	13,10
27	1,11	7,25	30,20	1,28	5,55	19,80	2,01	5,49	25,40
28	1,28	5,55	19,80	2,01	5,49	25,40	1,32	6,31	50,50
29	2,01	5,49	25,40	1,32	6,31	50,50	3,28	5,28	15,80
30	1,32	6,31	50,50	3,28	5,28	15,80	1,49	5,81	20,50
34	3,25	6,03	10,60	3,26	5,44	41,90	3,24	7,38	9,60
39	3,71	5,00	26,40	3,91	6,11	44,90	3,42	6,98	22,30

⇒ Tabla 9.21 Deposición total semana a semana en estación Av. España en el año 2002

DT (g/m ² x mes) semana a semana en AV. ESPAÑA 2002									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
11	14,65	6,86	36,40	10,26	6,67	39,6	14,10	6,80	33,70
13	14,10	6,80	33,70	20,49	7,15	32,8	14,50	6,96	36,90
19	9,31	6,66	31,80	23,22	6,11	151,3	23,87	6,72	64
20	23,22	6,11	151,3	23,87	6,72	64	38,00	6,16	51,2
21	23,87	6,72	64	38,00	6,16	51,2	11,45	5,35	23,5
22	38,00	6,16	51,2	11,45	5,35	23,5	23,52	6,41	29,90
26	7,56	6,29	16,70	28,36	6,74	36,4	11,80	6,29	22,30
29	8,52	6,40	25,90	12,83	5,9	92,1	24,18	6,3	31,4
30	12,83	5,9	92,1	24,18	6,3	31,4	20,97	6,49	30,9
31	24,18	6,3	31,4	20,97	6,49	30,9	25,20	6,9	35,2
32	20,97	6,49	30,9	25,20	6,9	35,2	23,17	6,12	24,4
33	25,20	6,9	35,2	23,17	6,12	24,4	26,08	5,36	63,9
34	23,17	6,12	24,4	26,08	5,36	63,9	30,13	6,65	48,00

⇒ Tabla 9.22 Deposición total semana a semana en estación Torre USM en el año 2002

DT (g/m ² x mes) semana a semana en TORRE USM 2002									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
11	4,56	6,58	15,70	3,35	6,49	15,40	4,20	6,25	13,60
13	4,20	6,25	13,60	4,23	6,73	14,30	3,33	6,59	14,90
19	3,15	5,99	11,50	13,85	8,46	56,70	13,41	6,12	86,20
20	13,85	8,46	56,70	13,41	6,12	86,20	5,08	6,21	23,90
21	13,41	6,12	86,20	5,08	6,21	23,90	4,45	6,08	21,90
22	5,08	6,21	23,90	4,45	6,08	21,90	3,99	6,38	18,40
26	2,37	6,06	11,20	9,28	5,54	13,90	2,56	6,44	14,70
29	2,14	5,67	20,90	5,00	6,84	18,70	2,15	5,30	22,80
30	5,00	6,84	18,70	2,15	5,30	22,80	5,10	5,95	16,80
31	2,15	5,30	22,80	5,10	5,95	16,80	2,39	5,96	10,50
32	5,10	5,95	16,80	2,39	5,96	10,50	2,15	5,47	10,20
33	2,39	5,96	10,50	2,15	5,47	10,20	3,59	5,67	27,50
34	2,15	5,47	10,20	3,59	5,67	27,50	3,24	6,53	21,60

⇒ Tabla 9.23 Deposición total semana a semana en estación Av. España en el año 2003

DT (g/m ² x mes) semana a semana en AV. ESPAÑA 2003									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
20	7,06	6,88	30,10	13,25	6,69	49,60	14,85	6,40	36,00
23	9,86	6,43	22,80	10,10	6,25	88,70	18,95	6,79	117,80
24	10,10	6,25	88,70	18,95	6,79	117,80	12,59	6,61	43,60
27	9,00	6,51	27,10	10,93	6,02	35,70	11,89	6,76	17,10
31	9,60	6,67	26,60	15,03	6,38	20,20	11,03	6,56	21,10

⇒ Tabla 9.24 Deposición total semana a semana en estación Torre USM en el año 2003

DT (g/m ² x mes) semana a semana en TORRE USM 2003									
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION		
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm
20	2,11	6,53	17,70	7,14	6,22	42,40	2,03	6,09	26,30
23	1,33	6,35	13,20	1,44	6,27	32,10	2,25	6,47	49,90
24	1,44	6,27	32,10	2,25	6,47	49,90	1,89	6,32	20,20
27	1,29	6,64	17,20	1,73	5,76	21,80	1,42	6,61	8,60
31	1,54	6,50	16,70	2,69	6,05	12,30	1,56	5,64	10,20

⇒ Tabla 9.25 DT y DH semana a semana en estación P. O'higgins durante el año 2001.

DT (g/m ² x mes) y DH (mm agua caída) semana a semana en P. OHIGGINS 2001												
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION					
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	mm	pH	uS/cm
27	0,70	6,47	9,90	0,34	6,17	10,5	1,16	5,85	6,8	21,18	6,21	14,20
28	0,34	6,17	10,5	1,16	5,85	6,8	0,89	5,7	5,2	34,70	6,13	8,13
29	1,16	5,85	6,8	0,89	5,7	5,2	3,14	5,95	7,30	51,90	6,13	4,00
34	1,74	6,01	11,00	3,10	5,91	7,9	0,99	6,66	6,60	36,58	5,98	9,40
39	1,04	5,64	7,80	1,65	6,61	19,3	muestreo hasta semana 39			12,52	6,77	35,30

⇒ Tabla 9.26 Relación diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentración de MP en P. O'higgins 2001

Relacion diaria entre los eventos de Precipitacion y la Concentracion de MP en P. OHIGGINS 2001											
Día	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION			DIAGNÓSTICO	% de dif. entre ICAP
	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10		
	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3		
08.07	BUENO	31	46	REGULAR	133	165	BUENO	58	87	NE -	-46,55
13.07	BUENO	51	76	BUENO	99	149	BUENO	29	44	NE+	75,86
16.07	ALERTA	233	210	BUENO	21	31	BUENO	68	102	L+	242,65
17.07	BUENO	21	31	BUENO	68	102	BUENO	11	17	NE+	90,91
18.07	BUENO	68	102	BUENO	11	17	BUENO	60	90	NE+	13,33
19.07	BUENO	11	17	BUENO	60	90	BUENO	65	98	NE-	-83,08
25.08	BUENO	23	34	BUENO	8	12	BUENO	SD	SD	NE	SD
26.08	BUENO	8	12	BUENO	SD	SD	BUENO	39	58	NE-	-79,49
28.08	BUENO	39	58	BUENO	55	83	BUENO	37	56	NE+	5,41

⇒ Tabla 9.27 Observaciones meteorológicas en P. O'higgins 2001

DIA	OBSERVACIONES METEOROLOGICAS P.O'HIGGINS 2001
08.07	condiciones de ventilacion regulares antes de llegada de sist.frontal / presencia de vaguada en altura y condiciones de ventilacion buenas
13.07	aprox. de sist frontal y regulares cond. de ventilacion / paso de sist frontal y cond. De ventilacion buenas
16.07	aprox. de sist frontal y regulares cond. de ventilacion / presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
17.07	presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
18.07	presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
19.07	presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
25.08	aprox de vaguada en altura asociada a sist frontal y cond de ventilacion regulares / sist frontal y condiciones de ventilacion buenas
26.08	vaguada en altura asociada a sist frontal y cond de ventilacion buenas
28.08	aprox. de sist frontal y cond. de ventilacion regulares a buenas / paso de sist frontal y cond de ventilacion buenas

⇒ Tabla 9.28 DT y DH semana a semana en estación Pudahuel durante el año 2002.

DT (g/m ² x mes) y DH (mm agua caída) semana a semana en PUDAHUEL 2002												
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION					
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	mm	pH	uS/cm
29	2,79	6,38	22,50	1,62	6,05	5,40	2,11	5,91	10,40	57,80	6,18	5,50
30	1,62	6,05	5,40	2,11	5,91	10,40	1,87	5,87	9,50	15,80	6,51	24,20
33	2,25	6,50	23,90	2,76	6,52	12,50	2,25	6,10	13,60	7,53	6,20	20,20
34	2,76	6,52	12,50	2,25	6,10	13,60	2,56	6,86	14,80	34,66	6,40	19,50
35	2,25	6,10	13,60	2,56	6,86	14,80	2,23	6,26	17,60	19,26	5,97	9,70
36	2,56	6,86	14,80	2,23	6,26	17,60	2,90	6,64	12,70	7,53	6,37	14,60
38	2,90	6,64	12,70	2,15	6,38	12,00	2,56	6,33	13,60	4,14	6,62	45,90
40	2,56	6,33	13,60	2,30	6,50	26,90	muestreo hasta semana 40			2,49	6,78	55,20

⇒ Tabla 9.29 Relación diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentración de MP en Pudahuel 2002

Relacion diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentración de MP en PUDAHUEL 2002											
Día	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION			DIAGNÓSTICO	% de dif. entre ICAP
	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10		
	descripcion	valor	ug/m ³	descripcion	valor	ug/m ³	descripcion	valor	ug/m ³		
19.07	REGULAR	107	153	BUENO	38	57	BUENO	49	73	L+	54,21
20.07	BUENO	38	57	BUENO	49	73	BUENO	18	27	NE+	52,63
21.07	BUENO	49	73	BUENO	18	27	BUENO	54	81	NE-	-10,20
22.07	BUENO	18	27	BUENO	54	81	BUENO	72	108	NE-	-300,00
30.07	BUENO	41	62	BUENO	94	141	REGULAR	158	176	E-	-285,37
18.08	BUENO	67	100	BUENO	60	90	BUENO	70	105	NE-	-4,48
23.08	BUENO	43	64	BUENO	46	69	BUENO	SD	SD	NE	SD
24.08	BUENO	46	69	BUENO	SD	SD	BUENO	91	137	NE-	-97,83
27.08	BUENO	62	93	BUENO	54	81	BUENO	67	101	NE-	-8,06
28.08	BUENO	54	81	BUENO	67	101	BUENO	93	139	NE-	-72,22
05.09	BUENO	55	82	BUENO	65	97	BUENO	83	124	NE	-50,91
16.09	BUENO	68	102	BUENO	53	79	BUENO	86	129	NE-	-26,47

(SD) = Sin data, no existen datos en la estación de muestreo para esta fecha.

⇒ Tabla 9.30 Observaciones meteorológicas en Pudahuel 2002

DIA	OBSERVACIONES METEOROLOGICAS PUDAHUEL 2002
19.07	paso de dorsal de onda corta y malas cond de ventilacion / aprox de sist frontal y cond de ventilacion buenas
20.07	presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
21.07	inestabilidad post frontal, acercamiento de un nuevo frente y cond de ventilacion buenas
22.07	aprox de sist frontal / presenia de sist frontal y cond de vetilacion buenas
30.07	aprox de sist frontal y cond de ventilacion buenas a regulares/ aprox de nucleo frio desde el norte y ventilacion regular
18.08	sist frontal y cond. de ventilacion buenas
23.08	aprox. de sist frontal y buenas cond. de ventilacion / presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
24.08	presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
27.08	aprox. de sist frontal y buenas cond. de ventilacion / presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas
28.08	inestabilidad post rontal y cond de ventilacion buenas
05.09	paso de sist frontal y cond de ventilacion buenas / aprox. de dorsal en altura y condiciones de ventilacion regulares
16.09	paso de sist frontal y cond de ventilacion buenas a regulares / inestabilidad post rontal y cond de ventilacion buenas

⇒ Tabla 9.31 DT y DH semana a semana en estación P. O'higgins durante el año 2003

DT (g/m2 x mes) y DH (mm agua caída) semana a semana en P. OHIGGINS 2003												
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION					
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	mm	pH	uS/cm
28	*	*	*	1,85	6,72	20,10	1,67	6,61	14,50	4,30	6,72	20,10
29	1,85	6,72	20,10	1,67	6,61	14,50	2,64	6,44	38,10	0,50	6,61	14,50
31	2,64	6,44	38,10	1,81	6,31	13,10	2,48	6,27	15,30	5,30	6,31	13,10

(*) = No se realizo medición en esta fecha.

⇒ Tabla 9.32 Relación diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentración de MP en P. O'higgins 2003

Relacion diaria entre los eventos de Precipitacion y la Concentracion de MP en P. OHIGGINS 2003											
Día	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION			DIAGNÓSTICO	% de dif. entre ICAP
	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10	ICAP		MP- 10		
	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3		
07.07	BUENO	27	40	BUENO	44	66	BUENO	50	75	NE-	-85,19
14.07	BUENO	SD	SD	REGULAR	116	157	BUENO	89	133	NE	SD
20.07	BUENO	53	79	REGULAR	113	156	BUENO	37	55	NE+	30,19
04.08	BUENO	31	46	BUENO	74	111	BUENO	62	93	NE-	-100,00

⇒ Tabla 9.33 Observaciones meteorológicas en P. O'higgins 2003

DIA	OBSERVACIONES METEOROLOGICAS P. OHIGGINS 2003
07.07	paso de vaguada en altura y condiciones de ventilacion buenas / presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas a regulares
14.07	aprox de dorsal en altura y vaguada costera en superficie con cond de ventilacion regulares a malas
20.07	paso de vaguada en altura asociada a sist frontal y condiciones de ventilacion buenas a regulares / flujo zonal del viento en altura
04.08	aprox de vaguada en altura y cond de ventilacion buenas/ dorsal en altura y altas presiones en superficie, ventilacion regular a buena

⇒ Tabla 9.34 DT y DH semana a semana en estación Pudahuel durante el año 2003

DT (g/m2 x mes) y DH (mm agua caída) semana a semana en PUDAHUEL 2003												
S. Juliana	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION					
	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	DT	pH	uS/cm	mm	pH	uS/cm
28	*	*	*	1,71	6,63	16,10	2,09	6,38	16,10	6,70	6,85	49,80
29	1,71	6,63	16,10	2,09	6,38	16,10	3,01	6,13	12,50	1,10	7,27	102,50
31	3,01	6,13	12,50	1,34	6,20	18,80	2,55	6,13	9,80	7,41	6,85	48,40

(*) = No se realizo medición en esta fecha.

⇒ Tabla 9.35 Relación diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentración de MP en Pudahuel 2003

Relacion diaria entre los eventos de Precipitación y la Concentracion de MP en PUDAHUEL 2003											
Día	PRE PRECIPITACION			PRECIPITACION			POST PRECIPITACION			DIAGNÓSTICO	% de dif. entre ICAP
	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10	ICAP		MP - 10		
	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3	descripcion	valor	ug/m3		
07.07	BUENO	57	85	BUENO	59	89	BUENO	67	100	NE-	-17,54
14.07	REGULAR	173	183	REGULAR	109	154	ALERTA	293	237	E-	-69,36
20.07	REGULAR	162	178	BUENO	72	108	BUENO	79	118	L+	51,23
04.08	BUENO	58	87	BUENO	67	100	REGULAR	129	163	E-	-122,41

⇒ Tabla 9.36 Observaciones meteorológicas en Pudahuel 2003

DIA	OBSERVACIONES METEOROLOGICAS PUDAHUEL 2003
07.07	paso de vaguada en altura y condiciones de ventilacion buenas / presencia de sist frontal y cond de ventilacion buenas a regulares
14.07	aprox de dorsal en altura y vaguada costera en superficie con cond de ventilacion regulares a malas
20.07	paso de vaguada en altura asociada a sist frontal y condiciones de ventilacion buenas a regulares / flujo zonal del viento en altura
04.08	aprox de vaguada en altura y cond de ventilacion buenas/ dorsal en altura y altas presiones en superficie, ventilacion regular a buena