

METEOROLOGIA DE MESOESCALA EN PROBLEMAS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA URBANA. COMPARACION ENTRE CONDICIONES POTENCIALES DE SANTIAGO Y CONCEPCION (\*).

José Rutllant C.

RESUMEN

Se describe tres elementos meteorológicos fundamentales que condicionan la difusión y transporte de contaminantes en un medio urbano con características climáticas predominantemente radiativas: inversiones térmicas, vientos locales e isla calórica. Con este marco de referencia se analiza las condiciones más desfavorables a que pueden estar sometidas fuentes puntuales y de área. Sobre la base de esas condiciones y algunas características geográficas se compara el potencial de contaminación entre Santiago y Concepción, concluyéndose que esta última presenta características marcadamente más favorables.

1. INTRODUCCION.-

Las características físicas de la atmósfera, incluyendo su estado de movimiento, determinan múltiples aspectos de la generación, transporte, difusión y eliminación de contaminantes atmosféricos. Desde aspectos fundamentales de planificación urbana hasta el pronóstico de episodios

---

(\*) Nota basada en ideas expuestas en la Mesa Redonda sobre Contaminación Ambiental organizada por la U. Católica de Chile, Sede Talcahuano, el 1° de Junio de 1979.

de contaminación potencial, diferentes escalas de fenómenos meteorológicos en el espacio y tiempo condicionan el destino de los agentes contaminantes durante su residencia en la atmósfera.

Entre los aspectos meteorológicos que inciden en este problema nos limitaremos sólo al papel de la atmósfera como agente del transporte y difusión de contaminantes.

En particular, esta nota se refiere sólo a un grupo de fenómenos meteorológicos de mesoescala que son condicionados primariamente por el ciclo diario de insolación. Estos se podrían definir como fenómenos de periodicidad diaria que afectan escalas horizontales del orden de las decenas de kilómetros y extensiones verticales típicas de un kilómetro. La importancia de estos procesos frente a otros de escala mayor, que trataremos en otra oportunidad, dependen del tipo de clima en cuestión.

Así, es posible distinguir en cada clima una componente radiativa y una advectiva. La primera de ellas se manifiesta en la dominancia de un ciclo diario en las variables meteorológicas forzada por el ciclo diario de radiación solar. En la segunda, en cambio, predomina la variabilidad interdiaria asociada al desplazamiento de grandes sistemas de tiempo atmosférico.

Un clima de tipo radiativo casi puro es el que caracteriza el desierto de Atacama. En el otro extremo, constituido por climas de tipo advectivo, podríamos mencionar el que domina en el extremo occidental del estrecho de Magallanes, representado por Faro Evangelistas.

Las características radiativas dominantes durante gran parte del año en el clima de las zonas Norte y Central de Chile se deben a la presencia del gran centro de alta presión del Pacífico suroriental y su gran estabilidad asociada a la corriente de Humboldt, surgencia costera de aguas frías, altura y orientación de la cordillera de los Andes (Rutllant, 1978).

Dentro de este marco general de referencia es posible hacer un paralelo entre las zonas que comprenden los complejos urbanos de Santiago y Concepción.

## 2. ELEMENTOS METEOROLOGICOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.-

### 2.1 Inversiones térmicas.

El estado de permanente movimiento que caracteriza la atmósfera terrestre sólo puede explicarse mediante una continua alimentación de energía solar que sobrecompense su también permanente pérdida radiativa de calor hacia el espacio.

Debido a que la atmósfera es básicamente transparente a la radiación solar y mala conductora del calor, el necesario calentamiento medio de sus capas bajas se produce desde la superficie terrestre por convección. Esta transferencia de calor desde abajo hacia arriba trae como consecuencia que, en promedio, la temperatura del aire disminuya con la altura.

Sin embargo, el enfriamiento nocturno superficial, que adquiere especial relevancia en climas predominantemente radiativos, produce un subsecuente enfriamiento del aire en contacto con la superficie generándose un aumento de temperatura con la altura. La "inversión" de la disminución "normal" de la temperatura con la altura constituye una inversión térmica. En este caso particular se trata de una inversión térmica que comienza a partir de la superficie misma (inversión térmica superficial) que se conoce como inversión de radiación o inversión nocturna.

La existencia de lentos movimientos descendentes de aire constituye un segundo mecanismo generador de inversiones térmicas (Rutllant, 1978). El descenso de aire o subsidencia es normalmente frenado por la presencia de la superficie terrestre y la existencia de una capa de mezcla turbulenta asociada a la transferencia de calor desde abajo o al efecto mecánico de la rugosidad superficial en el viento. A diferencia de la anterior, esta "inversión de subsidencia" será una inversión elevada.

Una tercera posibilidad es la generación de inversiones térmicas está en la ocurrencia de flujos de aire sobre superficies más frías (inversiones advectivas superficiales) y entradas de aire caliente en altura asociadas al desplazamiento de sistemas meteorológicos de gran escala (inversiones advectivas elevadas).

Como el nombre lo indica, estas inversiones serían más notorias en climas de tipo advectivo. Sin embargo, advecciones superficiales se dan también en el caso de brisas locales y en particular en las marinas, que son fenómenos típicamente de mesoescala y ciclo diario.

¿Cuál es la importancia de las inversiones térmicas en los procesos de difusión de contaminantes? Una experiencia bastante común la constituye el siguiente hecho: un globo de aire caliente asciende debido a que el aire en su interior es menos denso que el aire frío que lo rodea, a igual presión. Pero ¿qué sucede si el globo alcanza una zona en que el aire circundante está tan caliente como el de su interior? Simplemente el ascenso se detiene y el globo se estabiliza en un nivel inferior en que su peso es compensado por el empuje de Arquímedes, proporcional a la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y el interior. Cualquier intento externo de desplazar verticalmente el globo traerá como inevitable consecuencia la vuelta del globo a su nivel original.

El ejemplo anterior nos enseña que las inversiones térmicas elevadas limitan la difusión vertical de gases y partículas contenidas en la capa que está inmediatamente por debajo, en que los procesos turbulentos de origen térmico y mecánico están permanentemente favoreciendo la difusión en todas direcciones. También nos enseña que un efluente emitido en el seno de una capa de inversión no se difunde verticalmente con facilidad.

La Fig. 1 muestra formas esquemáticas de difusión vertical de un penacho de humo bajo diferentes condiciones de perfil térmico.

Las inversiones térmicas superficiales pueden erosionarse desde abajo debido a varias causas. Entre ellas podemos mencionar:

a) calentamiento solar superficial diurno: a medida que progresa el calentamiento solar diurno, la inversión nocturna va erosionándose desde abajo transformándose en una inversión térmica elevada. Cuando el calentamiento solar sobrepasa un cierto umbral definido por el espesor, altura de la base y gradiente térmico en la capa de inversión, ésta puede eventualmente llegar a disiparse (quiebre de la inversión).

b) flujo de aire estable tierra adentro: cuando el aire que se desplaza sobre un mar costero frío penetra tierra adentro se forma a partir del borde de la discontinuidad superficial una capa límite interna turbulenta. Al efecto mecánico del cambio de rugosidad superficial se agrega la



acción del calentamiento diurno. El crecimiento de esa capa límite interna turbulenta viento abajo de la discontinuidad será mayor en presencia de relieve o de un complejo urbano.

El viento en la dirección señalada puede deberse a un forzamiento de gran escala, a una brisa de mar o combinación de ambos.

## 2.2 Vientos locales.

Dos sistemas de circulación atmosférica de mesoescala pertenecen al problema que nos ocupa son las brisas de mar - tierra y las de valle - montaña. Ambos sistemas pueden representarse esquemáticamente como celdas de circulación convectiva de periodicidad diaria producidas por un calentamiento solar diferencial.

En el caso de la brisa de mar, la tierra se calienta más rápidamente que el agua a medida que el día progresa. La razón principal de este calentamiento diferencial está en la capacidad de mezcla del agua, la mayor profundidad de penetración de los rayos solares y su mayor capacidad calórica. De este modo, mientras el aire que está sobre el mar permanece a una temperatura sensiblemente constante, el que está sobre tierra se calienta, expande y asciende produciéndose en altura un flujo de tierra a mar que es compensado cerca de la superficie por la brisa marina propiamente tal. La celda de convección se cierra con la subsidencia sobre el mar, aumentando así la estabilidad en el caso de un flujo estable tierra adentro (Figura 2).

La escala espacial típica del fenómeno de las brisas de mar es de algunas decenas de kilómetros a ambos lados de la línea costera y un kilómetro de altura.

Durante la noche se desarrolla una celda de circulación en sentido opuesto, en general, de menor intensidad que la diurna, en que la subsidencia tiende a reforzar en este caso la inversión de radiación.

Las brisas de valle en el período diurno se desarrollan pendiente arriba debido al calentamiento de la ladera con respecto a la atmósfera

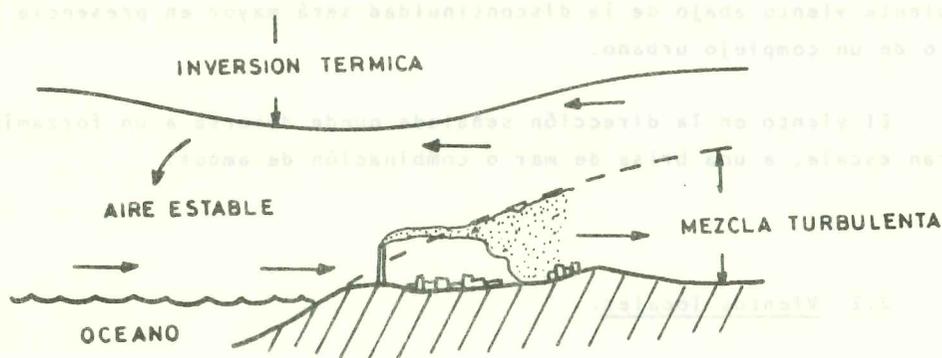


Figura 2 : Esquema de la circulación asociada a una brisa de mar sobre un océano costero frío y bajo una inversión térmica elevada. La fumigación de la fuente elevada se produce cuando el penacho intersecta la capa límite interna turbulenta.

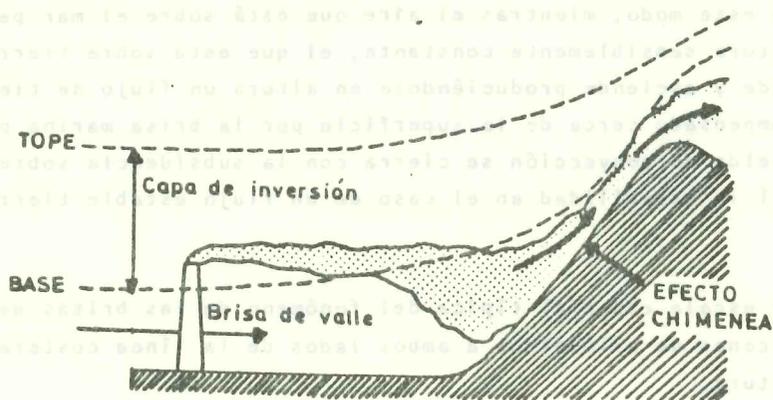


Figura 3 : Deformación de una capa de inversión térmica que intersecta una ladera calentada por el sol. Nótese la fumigación de una fuente elevada y el efecto chimenea que evacúa los contaminantes.

libre al mismo nivel. Cuando existe inicialmente una inversión térmica que intersecta la ladera, ésta se deforma cerca de la superficie produciéndose un efecto chimenea que favorece la evacuación de contaminantes ladera arriba (Figura 3).

En el período nocturno el enfriamiento más rápido de la ladera es comunicado al aire adyacente que escurre ladera abajo acumulándose en las partes más bajas del valle, aumentando el efecto estabilizador de la inversión de radiación.

### 2.3 Isla térmica urbana.

La existencia de numerosas fuentes de calor al interior de una gran ciudad y la mayor inercia térmica que implica, entre otros factores, la existencia de aire confinado en el interior de edificios, da como resultado una diferencia en la temperatura del aire de varios grados respecto del medio rural que la rodea, en especial durante la noche.

Este fenómeno, junto a la turbulencia mecánica generada por el viento, produce una capa de mezcla poco profunda que impide la existencia de inversiones nocturnas superficiales cuando éstas se presentan en el medio rural.

## 3. EFFECTO DE FUENTES PUNTUALES Y MÚLTIPLES.-

### 3.1 Fumigación de fuentes elevadas y confinamiento de fuentes cercanas al suelo.

Cuando el efluente que se encuentra estratificado en el seno de una capa de inversión térmica (Fig. 1) alcanza el tope de una capa límite interna turbulenta (Fig. 2) o una capa de mezcla urbana se produce una rápida difusión hacia abajo conocida como fumigación. Estas condiciones son altamente desfavorables por cuanto equivalen, en el peor caso, a trasladar la fuente al punto en que se produce la fumigación, quedando la totalidad del efluente confinado en la capa de mezcla.

Los problemas inherentes a la fumigación de una fuente elevada pueden agravarse en el caso de brisas de mar cuando la circulación convectiva está limitada en altura por una inversión térmica. En estos casos puede producirse una recirculación de contaminantes con consecuencias fáciles de prever.

Fenómenos de fumigación similares a los descritos se producen también durante el proceso de erosión de la inversión nocturna cuando el espesor de la capa de mezcla es igual a la altura efectiva de emisión de una fuente (Figura 1).

Considerando los efectos de la fumigación de fuentes elevadas parece evidente la conveniencia de situar las fuentes lo más alto posible. Esto, si bien no garantiza que no habrá fumigación, permite que ésta ocurra dentro de una capa de mezcla más profunda con la consiguiente disminución de la concentración del contaminante en la superficie. El incremento de la altura efectiva de emisión se puede lograr también aumentando la temperatura y la velocidad de salida del efluente.

Los contaminantes originados en fuentes situadas al interior de una capa límite interna o capa de mezcla quedarán evidentemente confinadas dentro de ella.

### 3.2 Factor de ventilación.

El modelo más simple de difusión en el caso de un área urbana con múltiples fuentes es el de una caja orientada en la dirección del viento dominante. La base de la caja está constituida por el área urbana en que se emite una cantidad fija y uniforme de contaminantes por unidad de área y tiempo (calefacción, incineradores, vehículos, etc.). La altura de la caja corresponde al espesor de la capa de mezcla.

En estas condiciones, una simple relación de conservación de masa en régimen permanente nos indica que la concentración de contaminantes viento abajo crece linealmente con la distancia al borde de barlovento. La razón de crecimiento de esta concentración, para una velocidad de emisión fija, depende solamente del producto de la profundidad de mezcla y la velocidad media del viento entrando a la caja que representa la ciudad.

Este producto, conocido como "factor de ventilación" resulta ser un buen parámetro en la comparación del potencial de contaminación entre dos ciudades o entre varias situaciones meteorológicas para una misma ciudad. Su determinación precisa en términos probabilísticos requiere de mediciones meteorológicas especiales durante un período de tiempo representativo.

#### 4. COMPARACION ENTRE EL POTENCIAL DE SANTIAGO Y CONCEPCION.-

##### 4.1 Verano.

En la Introducción hemos comentado la predominancia de características climáticas radiativas durante gran parte del año en las zonas Norte y Central de Chile, asociadas al anticiclón del Pacífico.

Durante el período estival, este centro de alta presión domina sin contrapeso el régimen meteorológico hasta aproximadamente los 40 grados de latitud S.

En áreas costeras como Concepción el efecto moderador y estabilizador del mar se hace sentir provocando, entre otros efectos, una variación muy débil a lo largo del día de la intensidad y altura de la inversión de subsidencia (Saavedra y Hernández, 1977).

En contraste, el clima de Santiago durante esta época del año presenta características continentales secas con un fuerte calentamiento superficial diurno que usualmente neutraliza el efecto de la inversión de subsidencia (Ulriksen y Rutllant, 1977). Este fenómeno favorable a la difusión vertical de contaminantes se ve reforzado por un aumento de la velocidad del viento después de mediodía. En consecuencia, el potencial de contaminación atmosférica en Santiago es mínimo durante la estación calurosa.

En la zona de Concepción, además de la presencia de la inversión de subsidencia, se dan condiciones favorables para la ocurrencia de brisas marinas que se superponen al persistente viento del S y SW dominante de Octubre a Marzo (Anuarios Meteorológicos de la Estación Bellavista, Depto. de Geofísica, Universidad de Concepción).

La persistencia de los vientos y su orientación en relación a la línea costera generan surgencia de aguas frías que dan como resultado temperaturas oceánicas superficiales bajas. Esto implica brisas de mar desarrolladas y gran estabilidad del aire que penetra tierra adentro que, junto a la presencia de la inversión de subsidencia, constituyen factores desfavorables a una buena difusión vertical de contaminantes.

La situación descrita se ve agravada durante la ocurrencia de depresiones térmicas continentales en esta estación del año (Saavedra y Hernández, 1977) en que la velocidad media en la capa de mezcla se reduce en aproximadamente un 50% de su valor normal. Mediciones realizadas en Hualpén en Enero de 1976 durante la ocurrencia de una depresión térmica muestran la base de la inversión a unos 200 metros sobre la superficie y un viento medio en la capa de mezcla de 2.5 m/s, lo que resulta en un factor de ventilación del orden de 500 m<sup>2</sup>/s.

#### 4.2 Invierno.

En el curso del período Invernal es notable la dominancia de los vientos del N en la zona de Concepción con velocidades medias mayores que en Verano. El origen de esta dirección está en la frecuente irrupción de depresiones móviles y sistemas frontales asociados que en conjunto conforman un cuadro favorable a la dispersión de contaminantes. Dentro de estas condiciones meteorológicas, que se pueden calificar como advectivas, debería estudiarse la frecuencia de ocurrencia de condiciones de bloqueo de anticiclones fríos que se caracterizan por inversiones térmicas bajas y vientos relativamente débiles.

En Santiago la situación es otra vez completamente diferente. En este período del año, y con mayor razón en las estaciones intermedias de Otoño y Primavera, la presencia de frentes activos de mal tiempo es sólo ocasional, predominando en general condiciones radiativas con vientos superficiales débiles del SW. Por otra parte el calentamiento solar superficial no es lo suficientemente intenso como para quebrar la inversión de subsidencia.

Las condiciones más desfavorables encontradas durante los períodos Invernales en que existen mediciones procesadas (Rutllant, 1973),

Indican profundidades máximas de mezcla de 200 m con vientos medios del orden de 1.6 m/s. De ésto resultan factores máximos de ventilación de 300 m<sup>2</sup>/s. El valor mínimo del factor de ventilación es cero en presencia de calmas que ocurren en las transiciones entre los regímenes de brisas diurnas y nocturnas que por lo demás coinciden con períodos en que la capa de mezcla se limita prácticamente al efecto térmico - mecánico de la ciudad. La extensión mínima de esta capa sobre Santiago no ha sido aun determinada.

En cuanto a las condiciones meteorológicas de escala sinóptica más desfavorables en la región de Santiago, es necesario un análisis in extenso que se hará en un próximo artículo.

A manera de conclusión podemos señalar que tanto el origen de condiciones desfavorables para la difusión de contaminantes atmosféricos como la época del año más propicia, son diferentes en Santiago y Concepción.

La comparación cuantitativa que puede hacerse a partir de la escasa información disponible, es favorable a Concepción que presenta condiciones generales de ventilación muy superiores a las de Santiago, ciclos diarios menos pronunciados y una buena exposición a los vientos dominantes. De este análisis preliminar resulta obvia la necesidad de efectuar mediciones meteorológicas sistemáticas y representativas de las características de las inversiones térmicas y vientos altos; su evolución diaria y estacional. Estas mediciones deben ser acompañadas por determinaciones de emisión y concentración de contaminantes.

La generalización de los resultados obtenidos debería hacerse sobre la base de un estudio de ocurrencia de las configuraciones del tiempo atmosférico más característico en cada región, lo que presupone un control adecuado de las condiciones meteorológicas de escala sinóptica durante las campañas de medición.



### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.-

- RUTLLANT, J. (1973): "Factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago: Resultados de las mediciones 71-72".  
Publ. N° 164 Depto. de Geofísica, U. de Chile. Mayo 1973.
- RUTLLANT, J. (1978): "El desierto más árido del mundo". Revista Mensaje N° 271, Agosto 1978.
- SAAVEDRA, N y A. HERNANDEZ (1977): "Campaña de mediciones meteorológicas desde la costa a la precordillera a lo largo del paralelo 36° 45' S". Sección Meteorología, Depto. de Geofísica, U. de Concepción, Noviembre 1977.
- ULRIKSEN, P. y J. RUTLLANT (1977): "Campaña de mediciones meteorológicas en Santiago, Noviembre de 1976". Informe Depto. de Geofísica, U. de Chile a INTEC por contrato de Asesoría y Prestación de Servicios. Julio 1977.