

# **PROGRAMA DE FISICOQUIMICA ATMOSFERICA**

## **1. DEPENDENCIAS INTEGRADAS**

Programa de Físicoquímica Ambiental  
Subdirección de Meteorología

## **2. GRUPO DE INVESTIGADORES**

### **2.1. Programa de Físicoquímica Ambiental**

Guillermo Cortés  
Carlos Mauricio Páez  
César A. Chacón  
Ovidio Simbaqueva

### **2.2. Subdirección de Meteorología**

Daniel Pabón  
Gloria León  
Franklyn Ruiz

## **3. JUSTIFICACION**

La composición físicoquímica de la atmósfera se ha estado desarrollando desde que se formó la Tierra y hoy día alcanza un equilibrio que permite la vida. La atmósfera “natural” está conformada casi en su totalidad por nitrógeno, oxígeno, argón y vapor de agua. Los contaminantes atmosféricos aún cuando constituyen una cantidad muy reducida de la atmósfera, pueden perturbar el equilibrio y por consiguiente afectar la salud humana, los ecosistemas y las condiciones climáticas de la Tierra.

La OMM desde la década del 50 estableció un programa orientado a vigilar los cambios globales que experimenta el medio ambiente atmosférico, mediante establecimiento de una serie de estaciones denominadas VAG (Estaciones de Vigilancia Atmosférica Global), con propósito de integrar los programas globales y regionales de investigación química y de Vigilancia de la atmósfera, con observaciones complementarias a las variables meteorológicas tradicionales, que incluyera otras como capa de ozono, gases con efecto invernadero, acidez de la lluvia, toxicidad de la lluvia, radiación ultravioleta, transporte de largo alcance de contaminantes etc.

La VAG es esencialmente una vigilancia de las tendencias a largo plazo y al mismo tiempo un sistema de avisos tempranos sobre cambios en la atmósfera. El programa específicamente incluye las siguientes medidas:

Los problemas que existen en la escala global son el cambio climático por gases con efectos invernadero y deterioro de la capa de ozono.

En la escala regional los problemas principales son la acidificación, la radioactividad y la degradación de la visibilidad por aerosoles.

En la escala local predominan la contaminación urbana, la lluvia ácida y el smog fotoquímico.

Dicha contaminación a diferentes escalas depende básicamente de las condiciones meteorológicas, tiempos de residencia de los contaminantes y reacciones fisicoquímicas creando efectos adversos sobre la salud humana, ecosistemas y los materiales de diferentes maneras.

En el país se experimenta una necesidad cada vez mayor que el gobierno, los organismos de planificación y los particulares dispongan de un asesoramiento adecuado, científicamente fundado, fiable y práctico sobre cuestiones de la atmósfera y el medio ambiente. Para conocer suficientemente estos recursos se necesita tener información con amplio cubrimiento, de gran confiabilidad, y de fácil adquisición y oportuna disponibilidad, así como desarrollar estudios e investigaciones en este ámbito.

#### **4. OBJETIVOS GENERALES**

- El grupo de físico-química atmosférica tiene por objeto contribuir al establecimiento de una base científica de la composición química y las características físicas de la atmósfera en diferentes escalas temporales y espaciales para mejorar la comprensión de su comportamiento y reacciones, sus impactos sobre la salud humana y los ecosistemas.
- Apoyo a la vigilancia del estado y evolución de los componentes atmosféricos que perturban el equilibrio natural de la atmósfera y sus consiguientes efectos sobre el clima, medio ambiente y seres vivos.
- Observar la forma en que las actividades humanas afecta la atmósfera y la capacidad de predecir la evolución a corto, mediano y largo plazo del medio atmosférico y, en consecuencia del sistema climático son dos componentes necesarias a ejecutar en este programa para coadyuvar al desarrollo sostenible del país y por ende el de la Tierra.

#### **5. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Desarrollar un sistema funcional de medición en tiempo real y diferido de la composición de la atmósfera sobre el territorio colombiano, que haga posible predecir futuros estados y de ese modo avisar tempranamente de sus cambios para diferentes escalas temporales y espaciales.
- Complementar la comprensión de los procesos atmosféricos en las diferentes escalas.

- Efectuar estudios, investigaciones y modelamiento sobre dispersión, transporte, transformación y deposición de constituyentes y contaminantes atmosféricos sobre el suelo en diferentes escalas temporales y espaciales.
- Efectuar estudios e investigaciones relativas al medio ambiente urbano.
- Proporcionar la información para la toma de decisiones en gestión del medio ambiente atmosférico
- Suministrar la información de apoyo a planes de respuesta ante situaciones de emergencias ambientales en cooperación con las autoridades nacionales e internacionales.
- Establecer un modelo de divulgación de la información, preferentemente en tiempo real.

## 6. DEFINICIONES

Se adoptan las siguientes definiciones contempladas en el decreto 948 del 5 de junio de 1995

**AEROSOL:** partículas sólidas o líquidas, suspendidas en la atmósfera que pueden ser arenas, sales marinas, polvo volcánico o partículas de origen antropogénico.

**AIRE:** Es el fluido que forma la atmósfera de la tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición es, cuando menos, de veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica.

**AREA FUENTE:** Es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

**ATMOSFERA:** Capa gaseosa que rodea la tierra.

**CAMBIO GLOBAL:** se refiere a las modificaciones del medio ambiente mundial (incluyendo alteraciones del clima, la productividad de la tierra, los océanos u otros recursos hídricos, la química atmosférica y los sistemas ecológicos) que pueden alterar la capacidad de la tierra para sustentar la vida.

**CAMBIO CLIMATICO:** "En el sentido más general, el término "cambio climático" abarca todas las formas de inconstancia climática (esto es, cualesquiera diferencias entre las estadísticas a largo plazo de los elementos meteorológicos calculados para distintos períodos pero respecto a la misma zona), con independencia de su carácter estadístico o sus causas físicas. Los cambios climáticos pueden resultar de factores tales como los cambios de la emisión solar, los cambios a largo plazo de elementos de la órbita terrestre (excentricidad, oblicuidad de la eclíptica, precesión de los equinoccios), los procesos internos naturales del sistema climático o el forzamiento antropogénico (por ejemplo, aumento de las concentraciones atmosféricas de dióxido carbónico o de otros gases de efecto invernadero)". "El término "cambio climático" se utiliza a menudo en un sentido más limitado para designar un cambio significativo (esto es, un cambio que tiene efectos económicos, medioambientales y sociales importantes) en los valores medios de un elemento meteorológico (en particular de la temperatura o la cantidad de

precipitación) en el curso de un período dado, tomando las medias en duraciones del orden del decenio o más".

**CAPA DE OZONO:** cantidad de ozono localizado en la principalmente en la estratosfera que protege la superficie terrestre de los rayos ultravioleta provenientes del Sol.

**CONCENTRACION DE UNA SUSTANCIA EN EL AIRE:** Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen del aire en la cual está contenida.

**CONDICIONES DE REFERENCIA:** Son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, que respectivamente equivalen a 25 C y 760 mm de mercurio.

**CONTAMINACION ATMOSFERICA:** Es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire.

**CONTAMINANTES:** Son fenómenos físicos, o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.

**EMISION:** Es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de éstos, proveniente de una fuente fija o móvil.

**EFECTO INVERNADERO:** Calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera debido al hecho que la radiación solar, de longitud de onda corta, penetra en la atmósfera sin sufrir absorción apreciable siendo absorbida fuertemente por la superficie terrestre, mientras que la radiación terrestre de longitud de onda larga absorbida por la atmósfera en una proporción mucho mayor.

**EPISODIO O EVENTO:** Es la ocurrencia o acaecimiento de un estado tal de concentración de contaminantes en el aire que dados sus valores y tiempo de duración o exposición, impone la declaratoria por la autoridad ambiental competente, de alguno de los niveles de contaminación, distinto del normal.

**ESPEJOR DE LA CAPA DE OZONO:** Cantidad de ozono total que se encuentra en la atmósfera si se comprimiera todo el ozono en Condiciones Normales en una columna unitaria de atmósfera. Se mide en unidades Dobson que corresponden a una centésima parte de un milímetro.

**FUENTE DE EMISION:** Es toda actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención susceptible de emitir contaminantes al aire.

**FUENTE FIJA:** Es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

**FUENTE FIJA PUNTUAL:** Es la fuente fija que emite contaminantes al aire productos o chimeneas.

**FUENTE FIJA DISPERSA O DIFUSA:** Es aquella en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión como en el caso de las quemas abiertas controladas en zonas rurales.

**FUENTE MOVIL:** Es la fuente de emisión que por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

**INDICES UV:** valores adimensionales que indican grado de riesgo de ser afectada la piel humana en su exposición a los rayos solares.

**INMISION:** Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un receptor. Se entiende por inmisión la acción opuesta a la emisión. Aire inmisible es el aire respirable al nivel de la tropósfera.

**DOSIS DE INMISION:** Es el valor total integral del flujo de inmisión en un receptor, durante un período determinado de exposición.

**FLUJO DE INMISION:** Es la tasa de inmisión con referencia a la unidad de área de superficie de un receptor.

**LLUVIA ACIDA:** condición de acidez de la precipitación producto de las reacciones entre los gases provenientes de la utilización de combustibles fósiles y el vapor de agua de la atmósfera.

**NIVEL NORMAL (NIVEL I):** Es aquel en que la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración son tales, que no se producen efectos nocivos, directos ni indirectos, en el medio ambiente, o la salud humana.

**NIVEL DE PREVENCIÓN (NIVEL II):** Es aquél que se presenta cuando las concentraciones de los contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración, causan efectos adversos y manifiestos, aunque leves, en la salud humana o en el medio ambiente tales como irritación de las mucosas, alergias, enfermedades leves de las vías respiratorias, o efectos dañinos en las plantas, disminución de la visibilidad u otros efectos nocivos evidentes.

**NIVEL DE ALERTA (NIVEL III):** Es aquél que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su duración o tiempo de exposición puede causar alteraciones manifiestas en el medio ambiente o la salud humana y en especial alteraciones de algunas funciones fisiológicas vitales, enfermedades crónicas en organismos vivos y reducción de la expectativa de vida de la población expuesta.

**NIVEL DE EMERGENCIA (NIVEL IV):** Es aquel que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración puede causar enfermedades agudas o graves u ocasionar la muerte de organismos vivos, y en especial de los seres humanos.

**NORMA DE CALIDAD DEL AIRE O NIVEL DE INMISION:** Es el nivel de concentración legalmente permisible, de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire establecido por el Ministerio del Medio Ambiente, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

**NORMA DE EMISION:** Es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la Autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.

**PROFUNDIDAD OPTICA:** masa relativa de una sustancia que atraviesa un rayo solar en una columna atmosférica.

**RADIACION ULTRAVIOLETA UVB:** conjunto de ondas electromagnéticas solares entre 290 y 320 nm de longitud de onda.

**SISTEMA CLIMÁTICO:** Sistema constituido por la atmósfera, la hidrósfera (comprendidas el agua líquida que se encuentra sobre la superficie terrestre o por debajo de ella; la criósfera, esto es, la nieve y el hielo por encima y debajo de la superficie), la litósfera superficial (que comprende las rocas, el suelo y los sedimentos de la superficie terrestre) y la biosfera (que comprende la vida vegetal y animal en la Tierra, así como el hombre), las cuales, bajo los efectos de la radiación solar recibida por la Tierra, determinan el clima de la Tierra: Aunque el clima sólo se relaciona fundamentalmente con los variados estados de la atmósfera, las otras partes del sistema climático también ejercen una función significativa en la formación del clima, a través de sus interacciones con la atmósfera

**SUSTANCIAS PELIGROSAS:** Son aquellas que aisladas o en combinación con otras, por sus características infecciosas, tóxicas, explosivas, corrosivas, inflamables,

volátiles, combustibles, radiactivas o reactivas, pueden causar daño a la salud humana, a los recursos naturales renovables o al medio ambiente.

**TASA DE INMISION:** Es la masa, o cualquiera otra propiedad física, de contaminantes transferida a un receptor por unidad de tiempo.

**TIEMPO DE EXPOSICION:** Es el lapso de duración de un episodio o evento.

## **7. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA**

El programa físico-química atmosférica consta de 5 componentes:

### **7.1. Sistema de Observación a escala global**

- Columna total del Ozono
- Perfil de la distribución del ozono en columna atmosférica
- Niveles de Radiación UV sobre la superficie
- Isótopos en la lluvia
- Radiación Solar Global

### **7.2. Sistema de observación escala regional y local**

- Turbiedad atmosférica
- Masas ópticas (Aerosoles, vapor de agua, ozono, aire seco)
- Comportamiento químico de la lluvia (pH, conductividad y nitratos)
- Índices UV
- Contaminantes del aire urbano (CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, O<sub>3</sub>, PM10, TSP, COV, CH<sub>4</sub>)
- Mediciones de metales pesados (Pb, Cd)
- Radionucleidos

### **7.3. Sistema de Observación**

#### **7.3.1. Radiación Solar Global**

La radiación solar se mide en forma directa utilizando instrumentos que reciben el nombre de radiómetros y en forma indirecta mediante modelos matemáticos de estimación que correlacionan la radiación con el brillo solar.

Los instrumentos de medida reciben diferentes nombre de acuerdo a la componente de radiación que mide, así:

1. Pirheliómetro, es un instrumento que se utiliza para medir la radiación solar directa, que es la que llega a la superficie terrestre sin cambiar el ángulo de dirección en su paso por la atmósfera y se mide sobre una superficie normal al rayo solar.
2. Piranómetro, es el instrumento para medir la radiación global, que es la radiación que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados. Un piranómetro acondicionado con una banda de sombra mide la radiación difusa, que es la que llega a una superficie horizontal después de haber cambiado su ángulo de

dirección por su interacción con las nubes y partículas en suspensión en la atmósfera.

3. Actinógrafo, es un instrumento para medir radiación global. Se diferencia de un piranómetro por que el sensor es una lámina bimetálica y el del piranómetro es una termopila.

Los datos de radiación solar son valores totales diarios que se interpretan como la energía recibida del sol en una unidad de superficie durante un día.

### 7.3.2. Radiación Ultravioleta

#### 7.3.2.1. Unidades y tipos de medida radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta se mide en microvatios-hora sobre centímetro cuadrado ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$ ) y la radiación visible en micro Einstein por centímetro cuadrado por segundo ( $\mu\text{E}/\text{cm}^2\text{s}$ ). Los instrumentos realizan medidas puntuales en fracciones de segundos para cada banda de medida y las integra en intervalos de un minuto; las medidas se archivan luego en valores máximos, integrales horarios y totales diarios, datos que se encuentran actualizados desde su inicio de medidas en 1998 para cada estación.

El IDEAM estableció una red de cinco estaciones para medir en superficie radiación ultravioleta en las bandas UV-B, UV-A y radiación solar en la banda del Visible (PAR) que es la radiación activa en fotosíntesis. Las estaciones se encuentran localizadas en las siguientes Ciudades:

<b>Estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altura</b>
Riohacha	11° 32' N	72° 56' W	4 m
Santa Fe Bogotá	04° 42' N	74° 09' W	2546 m
Pasto	01° 11' N	77° 18' W	2580 m
Leticia	04° 33' SUR	69° 23' W	84 m
San Andrés Isla	12° 35' N	81° 42' W	2 m

Físicamente consiste en un sensor de cinco canales a temperatura controlada, por medio de una interface que también permite la comunicación con un computador personal. El GUV 511 fue diseñado teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Sus filtros radiométricos tienen características de estabilidad óptica suficientes para aplicaciones de monitoreo a largo plazo y los procedimiento de calibración resultan en estimados precisos de irradiancia.
- La información provista por el radiómetro multicanal, es suficiente para modelar la irradiancia espectral a través del espectro solar (280-400nm), y para calcular las dosis espectrales, como UV-B y UV-A, así como varias dosis biológicas.

- Las características ópticas de este instrumento pueden ser medidas en laboratorio con suficiente precisión para una caracterización total.

El instrumento fue diseñado para trabajar de 85 a 264 VAC a 63 Hertz. Un cable multiconductor blindado de cincuenta metros conecta el sensor a la interfaz de control de temperatura. Este instrumento ha sido utilizado con éxito en todo el mundo bajo las más adversas condiciones climáticas, siendo considerado como un sistema de punta en el monitoreo a largo plazo de la radiación ultravioleta y la radiación fotosintéticamente activa del espectro solar.

### **7.3.2.2 Unidades y tipos de medida radiación ultravioleta**

La radiación ultravioleta se mide en microvatios-hora sobre centímetro cuadrado ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$ ) y la radiación visible en micro Einstein por centímetro cuadrado por segundo ( $\mu\text{E}/\text{cm}^2\text{s}$ ). Los instrumentos realizan medidas puntuales en fracciones de segundos para cada banda de medida y las integra en intervalos de un minuto; las medidas se archivan luego en valores máximos, integrales horarios y totales diarios, datos que se encuentran actualizados desde su inicio de medidas en 1998 para cada estación.

### **7.3.3. El ozono**

El ozono es uno de los muchos gases constituyentes de la atmósfera. Aunque su proporción es pequeña ( $10^{-5}$  %) en comparación con otros componentes, es de vital importancia porque es un contribuyente significativo en el balance de radiación de la atmósfera. Además de sus propiedades radiativas, el ozono reacciona fotoquímicamente con muchos otros gases trazas, algunos de los cuales son de origen antropogénico. Las distribuciones meridional y vertical del ozono en la atmósfera están determinadas por una interacción compleja con la dinámica atmosférica y la fotoquímica. El ozono, al nivel de la estratosfera, protege la vida del planeta de la radiación ultravioleta (UV-B) procedente del sol, la cual es peligrosa para la salud humana, para los animales y las plantas, incluyendo al plancton marino, en tanto que el ozono, a nivel superficial, es el principal contaminante fotoquímico, se origina principalmente en las áreas urbanas por varias fuentes de emisiones, como los automóviles y la industria. Las variaciones del ozono, en las diversas escalas de tiempo y espacio están asociadas, en parte, con procesos atmosféricos y también pueden ser afectada por la actividad solar y humana.

#### **7.3.3.1. Variables**

Hay tres medidas básicas de las características del ozono atmosférico:

- Ozono superficial
- Ozono total
- Perfil vertical del ozono



*Ozono superficial:* Expresa la concentración local del ozono cerca de la superficie, aproximadamente en la capa que se encuentra entre los 3 y 10 metros de altura, para un determinado lugar. Las medidas ozono superficial están dadas en unidades de presión parcial o relación de mezcla (masa o volumen).

*Ozono total:* Expresa la cantidad total de ozono contenida en la columna vertical de aire situada sobre la superficie. Las unidades de medida usadas son el espesor de la columna si todo el ozono distribuido en la atmósfera se comprimiera en condiciones normales de temperatura y presión y se mide en unidades Dobson [UD], que corresponde a la centésima parte de un milímetro. El promedio global es cercano a 300 UD.

*Perfil vertical del ozono:* Expresa la concentración del ozono en función de la altura o presión ambiental. La cantidad de ozono para cada altura o nivel de presión en la atmósfera está expresada como presión parcial, relación de mezcla (masa o volumen), o concentración local. La integración del perfil de ozono desde superficie hasta el tope de la atmósfera es la cantidad de ozono total en la columna.

### 7.3.3.2. Unidades y escalas del ozono

OZONO LOCAL	UNIDADES
Presión parcial	nanobar milipascal
Relación de mezcla por masa	$\mu\text{g g}^{-1}$
Relación de mezcla por volumen	ppb
Concentración local	$\text{moléculas cm}^{-3}$
Densidad local	$\text{g m}^{-3}$
<b>COLUMNA DE OZONO</b>	
Ozono total	matm-cm (UD) $10^{-3}$ cm ozono a STP*
Densidad de la columna	matm cm $\text{km}^{-1}$

- STP - temperatura ( $273^{\circ}\text{K}$ ) y presión (1013.25 hPa) normal

En el anexo A, se presenta una descripción completa de las unidades.

### 7.3.3.3. Métodos de medida

El ozono atmosférico es medido in situ (medidas directas) o por sensores remotos (medidas indirectas). Las mediciones in situ son hechas mediante el análisis de una muestra de aire para determinar el contenido de ozono por técnicas ópticas, químicas o electroquímicas. Las mediciones con sensores remotos son hechas mediante técnicas de absorción diferencial.

- *Medidas directas*

Tres tipos de instrumentos son frecuentemente utilizados para medir la columna total de ozono, desde estaciones localizadas sobre la superficie; todos ellos utilizan el principio de absorción de radiación ultravioleta por el ozono en la banda espectral de 300-460nm. Ellos son:

- *El espectrofotómetro Dobson*, cuyo principio de medición del se basa en el hecho físico que la intensidad de un haz de luz (de una dada longitud de onda), disminuye al atravesar algún medio absorbente. Aplicando esto a la medición de la radiación solar que atraviesa la atmósfera se puede inferir la cantidad de  $O_3$  presente en la misma.
- *El Filtro Ozonométrico*, es un instrumento basado en el mismo principio que el espectrofotómetro Dobson usando la absorción diferencial de la radiación UV y ha sido usado ampliamente en los países de la antigua Unión Soviética desde hace 30 años.
- *El Espectrofotómetro de rejilla Brewer*, es un instrumento que utiliza una rejilla de difracción y cinco pequeñas bandas entre los 306 y los 320 nm de longitud de onda. Este instrumento continuamente sigue la trayectoria del sol durante el día, recibiendo la radiación directa proveniente del sol para el cálculo de la ecuación de transferencia radiativa del contenido total de ozono en la columna atmosférica.
- El método más ampliamente difundido para la determinación de ozono superficial, entre la comunidad científica, por su absoluta precisión, estabilidad, libertad de interferencias, y facilidades de operación es la fotometría UV de superficie. El principio básico de los instrumentos es la medición de la atenuación de radiación UV con longitud de onda de 254nm, debido a la presencia de ozono en una muestra de aire. En la práctica los instrumentos miden la atenuación relativa entre una muestra de aire del medio ambiente y una muestra de aire sin ozono. La **quimiluminiscencia de fase gaseosa** es otro método para medir el ozono. En este método, por reacción química al etileno, el ozono emite luz y esa luz se mide con un tubo fotomultiplicador. La cantidad de luz indica la cantidad presente de ozono.
- *Distribución Vertical*: Dentro del conocimiento de la dinámica atmosférica es imprescindible conocer como se comportan con la altura, las variables de estado del sistema termodinámico atmosférico. En primera aproximación se considera simetría azimutal y solo dependencia con la altura. La forma más directa, es medir capa por capa a través del lanzamiento de un globo meteorológico (Radiosonda), la temperatura, la presión, la humedad relativa, la velocidad del viento. Específicamente la distribución vertical de ozono también puede medirse a través de un instrumento diseñado para reaccionar químicamente con el ozono contenido en el aire, enviando una señal eléctrica proporcional a la concentración del compuesto.

- *Medidas Indirectas*

La medición del ozono total estratosférico por técnicas de absorción diferencial se basa en mediciones de la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre a dos longitudes de onda próximas. Estas longitudes de onda se eligen de suerte tal que la atenuación

debida al ozono sea muy diferente para ambas. En concreto, se toman  $\lambda_{\text{on} < \text{SUB}} = 300$  nanómetros y  $\lambda_{\text{SUB} > \text{off}} = 315$  nanómetros, en donde la sección eficaz de absorción del ozono es varias veces superior en  $\lambda_{\text{on}}$  comparado con  $\lambda_{\text{off}}$ . Además, en esta región del espectro la atenuación de la irradiancia solar debida a otros componentes atmosféricos es muy parecida; por lo tanto, el cociente entre la irradiancia de una longitud de onda y la irradiancia a otra longitud de onda da el valor de la cantidad de ozono total. Si se denomina  $I_\lambda$  a la irradiancia solar que llega a nivel terrestre para una cierta longitud de onda  $\lambda$ , después de atravesar una longitud  $L$  de atmósfera, su valor vendrá dado por la expresión :

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \times \exp\left(-\int_0^L (k_{\text{ab}\lambda} + k_{\text{A}\lambda} + k_{\text{M}\lambda}) dr\right)$$

en donde  $I_{0\lambda}$  es la irradiancia solar fuera de la atmósfera,  $K_{\text{ab}\lambda}$  es el coeficiente de extinción debido a absorción de componentes atmosféricos,  $k_{\text{A}\lambda}$  el coeficiente de extinción debido a dispersión Rayleigh, y  $k_{\text{M}\lambda}$  el coeficiente de extinción por dispersión Mie. El coeficiente de extinción  $K_{\text{ab}\lambda}$  incluye la absorción por vapor de agua ( $k_{\text{va}\lambda}$ ), ozono ( $k_{\text{o}\lambda}$ ) y otros gases ( $k_{\text{g}\lambda}$ ) como  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , etc. En longitudes de onda  $\lambda_{\text{on}}$  y  $\lambda_{\text{off}}$  los coeficientes para dispersión Rayleigh y Mie son casi iguales :  $k_{\text{A}\lambda \text{ on}} = k_{\text{A}\lambda \text{ off}}$ ,  $k_{\text{M}\lambda \text{ on}} = k_{\text{M}\lambda \text{ off}}$ , siendo además en esta zona del espectro las absorciones de los componentes atmosféricos, exceptuando el ozono, prácticamente nulas:  $k_{\text{va}\lambda} = 0$ ,  $k_{\text{g}\lambda}$ . La atenuación de la luz solar en esta región espectral se debe, pues, a la absorción de ozono estratosférico, y como además la absorción a  $\lambda_{\text{on}} = 300$  nm es siete veces superior a la longitud de onda de  $\lambda_{\text{off}} = 315$  nm, se considerará que  $k_{\text{o}\lambda \text{ on}} = 7k_{\text{o}\lambda \text{ off}}$ . Por tanto el cociente de intensidades a  $\lambda_{\text{on}}$  y a  $\lambda_{\text{off}}$  vendrá dado por :

$$\frac{I_{\lambda_{\text{on}}}}{I_{\lambda_{\text{off}}}} = \frac{I_{0\lambda_{\text{on}}}}{I_{0\lambda_{\text{off}}}} \exp\left(-(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}) \int_0^L N dr\right)$$

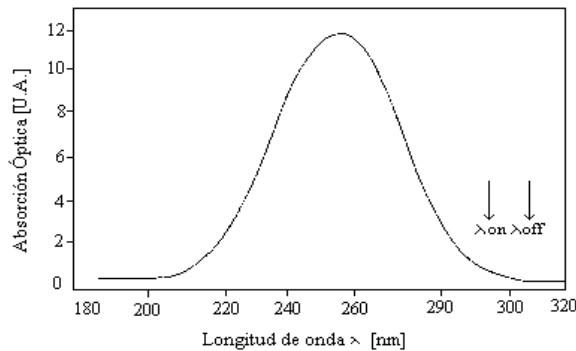
Si expresamos el coeficiente de absorción  $k_{\text{o}\lambda}$  en función de la concentración de ozono  $N$  y de su sección eficaz de absorción  $T$ , la expresión anterior toma la forma :

$$\frac{I_{\lambda_{\text{on}}}}{I_{\lambda_{\text{off}}}} = \frac{I_{0\lambda_{\text{on}}}}{I_{0\lambda_{\text{off}}}} \exp\left(-(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}) \overline{ND} m_r\right)$$

en función de la masa de aire relativa  $m_r$

donde ahora  $D$  es el espesor medio de la capa de ozono y  $N$  su concentración media. El factor  $m_r$  incluye correcciones por efectos de la hora solar, día del año y latitud. Así pues, una medición de  $I_{\lambda_{\text{on}}}$  e  $I_{\lambda_{\text{off}}}$  proporciona un valor de la columna de ozono.

Experimentalmente los medidores dan un valor  $M(\lambda) = \beta(\lambda)/\lambda$ , en donde  $P(\lambda)$  incluye las eficiencias del sistema de detección para cada longitud de onda. Trabajando a longitudes de onda próximas  $\beta(\lambda_{\text{on}}) = \beta(\lambda_{\text{off}})$  de forma que la relación experimental  $M(\lambda_{\text{on}}) / M(\lambda_{\text{off}})$  dará una medida directa del cociente de irradiancias  $I(\lambda_{\text{on}}) / I(\lambda_{\text{off}})$ .



*Espectro de Absorción de la molécula de ozono en el margen 180-320 nanómetros. Las flechas indican las longitudes de onda a las cuales se realizan medidas de absorción diferencial: se eligen a  $\lambda_{on}=300$  nanómetros y  $\lambda_{off}=315$  nanómetros, en donde la sección eficaz de absorción del ozono es varias veces superior en  $\lambda_{on}$  comparado con  $\lambda_{off}$ .*

- *Instrumentos para medir el ozono total*

El ozono total diariamente es medido por espectrómetros portados por satélites. Estas mediciones fueron posibles desde finales del año 1978, fecha en la cual entró en operación el satélite Nimbus-7, cuya misión fue observar la Tierra. Este satélite estaba dotado de tres instrumentos para la medida del ozono: el Espectrómetro Cartográfico Total de Ozono (Total Ozone Mapping Spectrometer - TOMS) para la distribución global del ozono total, el Detector de Ramales Infrarrojos Estratosféricos (Limb Infrared Monitor de la Stratosphere - LIMS) y el Medidor de Dispersión Solar Ultravioleta (Solar Backscatter Ultraviolet - SBUV) para la medida de perfiles verticales de ozono. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites, como el Meteor-3, lanzado en 1991 y el Earth Probe en 1996, el cual aun se encuentra en operación.

El TOMS es un instrumento para medir la cantidad total de la columna de ozono, desde superficie hasta el tope de la atmósfera, bajo cualquier condición geofísica o cualquier hora del día. Las observaciones se efectúan para el espectro electromagnético cercano a la región del ultravioleta, donde la luz solar es parcialmente absorbida por el ozono. Las observaciones se realizan sobre una franja  $51^\circ$ , a lado y lado del satélite, con una resolución 50 km bajo el satélite y de 280 km sobre los extremos de los ángulos de rastreo. La precisión del TOMS es estimada en  $\pm 5\%$ , sin embargo los datos son presentado en forma reticular con para grillas espaciales de  $1^\circ \times 1.25^\circ$  latitud/longitud.

### **7.3.4. Contaminación atmosférica**

La atmósfera está constituida por varias capas de aire. Las de mayor importancia para el estudio del control de la contaminación del aire se llaman troposfera y estratosfera. La troposfera es la capa delgada de aire relativamente denso más cercana a la superficie de la tierra. La troposfera contiene el aire que todos los seres vivos necesitan para respirar. La estratosfera es la capa protectora de aire que ayuda a absorber y dispersar la energía solar.

En teoría, el aire siempre ha tenido cierto grado de contaminación. Los fenómenos naturales tales como la erupción de volcanes, tormentas de viento, descomposición de plantas y animales e incluso los aerosoles emitidos por los océanos "contaminan" el aire. Sin embargo, cuando se habla de la contaminación del aire, los contaminantes son aquéllos generados por la actividad del hombre (antropogénicos). Se puede considerar

como contaminante a la sustancia que produce un efecto perjudicial en el ambiente. Estos efectos pueden alterar tanto la salud como el bienestar de las personas.

Hay cientos de contaminantes en el aire que se presentan en forma de partículas y gases. El material particulado está compuesto por pequeñas partículas líquidas o sólidas de polvo, humo, niebla y ceniza volante. Los gases incluyen sustancias como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles. También se puede clasificar a los contaminantes como primarios o secundarios. Un contaminante primario es aquél que se emite a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química, como por ejemplo, la ceniza de la quema de residuos sólidos. Un contaminante secundario es aquel que experimenta un cambio químico cuando llega a la atmósfera. Un ejemplo es el ozono que surge de los vapores orgánicos y óxidos de nitrógeno que emite una estación de gasolina o el escape de los automóviles. Los vapores orgánicos reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar y producen el ozono, componente primario del smog.

Los contaminantes de aire también se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire. En el nivel internacional los contaminantes criterio son:

- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Plomo(Pb)
- Aerosoles y Material particulado (PM)

Los contaminantes criterios

Como se indicó en la sección anterior, los contaminantes criterio son: monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono, material particulado y plomo. En los últimos diez años, varios países al definir a las partículas totales en suspensión han especificado a las partículas con 10 micrómetros o menos de diámetro y a las partículas con 2,5 micrómetros o menos de diámetro aerodinámico. Estas partículas son comúnmente referidas como PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, respectivamente. La razón fundamental de esta especificación se debe a que las partículas más pequeñas son más peligrosas para la salud de los seres humanos porque son capaces de alcanzar la zona inferior de los pulmones.

Inicialmente, en la lista de contaminantes criterio se incluía a los hidrocarburos. Los hidrocarburos, también denominados compuestos orgánicos volátiles (COV), son precursores en la formación de ozono. Aunque generalmente hay reglamentos que controlan los COV, no hay control específico para los COV en el aire. El control adecuado de los COV se refleja en la reducción de la concentración de ozono en el aire.

Para cada contaminante criterio se han establecido guías y normas. Las guías son recomendaciones para los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos a fin de

reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un período definido. Son los valores límite diseñados con un margen de protección ante los riesgos. La finalidad de las normas es proteger la salud humana (normas primarias) y proteger el bienestar del ser humano y los ecosistemas (normas secundarias). La OMS ha publicado guías sobre la calidad del aire y varios países de América Latina han establecido o propuesto sus propias normas. En el cuadro 4-1 se muestran las normas nacionales de calidad del aire para ozono, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), partículas totales en suspensión (PTS), PM<sub>10</sub> y plomo que se han fijado o propuesto en varios países de América y las guías de la OMS.

A continuación se detalla cada contaminante criterio.

	Pern-top width="82">	Período de muestreo	Argentina	Bolivia	Brasil	Colombia	Chile	Estados Unidos	México	Perú <sup>a</sup>	Venezuela
<b>Ozono</b>	1 hora	195	235	1603			235	2164	2353		
	8 horas				170	1603	1605		120		120
<b>SO<sub>2</sub></b>	24 horas		365	365	400	365	365	3413	1503	80 – 365 <sup>b</sup>	125
	Mensual	707									
<b>NO<sub>2</sub></b>	Anual <sup>8</sup>		80	80	100	80	80	79	80		50
	1 hora	8469	400	3203		470		3953	200		200
	24 horas		150						1503	100-300 <sup>10</sup>	
<b>CO</b>	Anual <sup>8</sup>			100	100	100	100		50		40
	1 hora	57	30	40.0003	50	40.0003	40		30.0003		30
<b>PTS</b>	8 horas	11	10	10	15	10	10	13.0003	10	10.000 – 40.000 <sup>10</sup>	10
	24 horas		260	2403	400	260		2603	3503	75 – 260 <sup>b</sup>	-11
	Mensual	150									-11
<b>PM<sub>10</sub></b>	Anual <sup>11</sup>		75	80	77	75		75	150		-11
	24 horas			150		150	15013	150			-11
<b>Plomo</b>	Anual <sup>8</sup>			50			5014	50			-11
	24 horas									1,5 – 2,0 <sup>10</sup>	
	Mensual										
	3 meses		1,5				1,5	1,5	1,5		
	Anual							0,5			0,5

1. Normas propuestas

2. Guías globales propuestas

3. No debe ser excedida más de una vez al año

4. No debe ser excedida más de una vez cada tres años

5. El cuarto valor más alto no debe ser excedido más de una vez cada tres años

6. El valor bajo se puede exceder en 50% de las mediciones y el alto en el 0,5%

7. Promedio aritmético mensual

8. Promedio aritmético anual

9. La norma de Argentina corresponde a NO<sub>x</sub> (expresado como NO<sub>2</sub>)

10. El valor bajo se puede exceder en 50% de las mediciones y el alto en 5%

11. No se ha establecido ningún valor de referencia para PTS y PM<sub>10</sub> porque no existe un umbral evidente en cuanto a sus efectos en la salud

12. Promedio geométrico anual

13. Estados Unidos también tiene una norma para PM<sub>2,5</sub> de 65 µg/m<sup>3</sup>

14. Estados Unidos también tiene una norma para PM<sub>2,5</sub> de 15 µg/m<sup>3</sup>

Cuadro 4-1 Normas nacionales de calidad del aire de varios países de América y guías de la OMS (en µg/m<sup>3</sup>)

1. Normas propuestas
2. Guías globales propuestas
3. No debe ser excedida más de una vez al año
4. No debe ser excedida más de una vez cada tres años
5. El cuarto valor más alto no debe ser excedido más de una vez cada tres años
6. El valor bajo se puede exceder en 50% de las mediciones y el alto en el 0,5%
7. Promedio aritmético mensual
8. Promedio aritmético anual

## **Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que en concentraciones altas puede ser letal. En la naturaleza se forma mediante la oxidación del metano, que es un gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La principal fuente antropogénica de monóxido de carbono es la quema incompleta de combustibles como la gasolina.

Para que se complete el proceso de combustión es necesario que haya cantidad adecuada de oxígeno. Cuando éste es insuficiente, se forma el monóxido de carbono y una manera de reducirlo es exigir que los automóviles sean afinados debidamente para asegurar la mezcla del combustible con el oxígeno. Por esta razón, los reglamentos de inspección de automóviles han sido útiles para controlar el monóxido de carbono.

El monóxido de carbono es especialmente problemático en zonas urbanas con gran número de automóviles. El volumen del tránsito y el clima local influyen sobre su concentración en el aire. Los efectos sobre la salud dependen de la concentración y duración de la exposición. El monóxido de carbono en los seres humanos afecta el suministro de oxígeno en el torrente sanguíneo. Normalmente, los glóbulos rojos transportan el oxígeno por todo el cuerpo. Cuando hay monóxido de carbono, éste atrae más a los glóbulos rojos que al oxígeno, lo que da lugar a la escasez de oxígeno en la sangre. El efecto a corto plazo es similar a la sensación de fatiga que se experimenta en altura o cuando se padece de anemia.

La exposición al monóxido de carbono puede exacerbar las enfermedades del corazón y del pulmón. El peligro es más evidente en nonatos, neonatos, ancianos y en quienes sufren de enfermedades crónicas.

## **Ozono (O<sub>3</sub>)**

El ozono es considerado como un contaminante criterio y secundario. Se forma mediante una serie compleja de reacciones en la atmósfera. En términos sencillos, se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar.

La concentración de ozono en una determinada localidad depende de muchos factores, incluida la concentración de NO<sub>2</sub> y COV en el área, la intensidad de la luz solar y las condiciones del clima.

El ozono es el principal componente del smog o niebla fotoquímica y causa efectos nocivos en seres humanos y plantas. La población de mayor riesgo a la contaminación por ozono son los enfermos y ancianos, así como los neonatos y nonatos. Además, cuando se le compara con los otros contaminantes criterio, es el que más daña a las plantas.

Una estrategia de control para el ozono es reglamentar las fuentes de COV y óxidos de nitrógeno. Las fuentes principales de estos contaminantes son los productos de combustión incompleta que emiten los escapes de los vehículos, la quema de combustibles fósiles y el uso de compuestos de petróleo y solventes orgánicos en procesos industriales y de limpieza. Por ejemplo, el líquido usado en el proceso de

lavado al seco es un solvente que es un COV.

El ozono tiene la singularidad de que es también beneficioso para los seres humanos y otros seres vivientes. Es un componente necesario de la estratosfera, la capa del aire que protege la troposfera, porque sirve para proteger a la tierra de la nociva radiación ultravioleta del sol. Sin embargo, cuando se encuentra en concentraciones altas en la troposfera o capa inferior de la atmósfera, se le considera un contaminante.

De esta manera, aunque el ozono es nocivo y debe ser controlado en la troposfera, es un protector necesario en la estratosfera. Las nuevas iniciativas de control de la contaminación del aire que se están llevando a cabo, incluidas la reducción progresiva de halocarburos y clorofluorocarbonos, evitan el agotamiento del ozono en la estratosfera.

### **Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)**

Los óxidos de azufre son gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es el contaminante criterio que indica la concentración de óxidos de azufre en el aire. La fuente primaria de óxidos de azufre es la quema de combustibles fósiles, en particular el carbón. Se ha denominado al dióxido de azufre como un contaminante que "pasa a través de" porque la cantidad de dióxido de azufre emitido al aire es casi la misma cantidad presente en el combustible.

Por ejemplo, si se quema cien kilos de carbón que contienen siete kilos de azufre, la emisión producida por la quema contendrá aproximadamente 14 kilos de dióxido de azufre, siete kilos de azufre y siete de oxígeno. El azufre reacciona con el oxígeno en el proceso de combustión para formar dióxido de azufre.

Se ha encontrado que los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio, especialmente de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. Los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o humedad del aire. Esto se conoce como efecto sinérgico porque la combinación de sustancias produce un efecto mayor que la suma individual del efecto de cada sustancia.

Los óxidos de azufre también son responsables de algunos efectos sobre el bienestar. El de mayor preocupación es la contribución de óxidos de azufre a la formación de lluvia ácida que puede perjudicar lagos, la vida acuática, materiales de construcción y la vida silvestre.

### **Material particulado**

Inicialmente, con la denominación de partículas totales en suspensión (PTS) se reconoció a una amplia categoría de material particulado como contaminante criterio. Las PTS son las partículas sólidas o líquidas del aire. Como se mencionó anteriormente, desde la segunda mitad de la década de 1980, varios países incluyeron en sus normas sobre material particulado a las partículas con menos de 10 micrómetros de diámetro aerodinámico (PM<sub>10</sub>). En la segunda mitad de la década de 1990, las normas sobre material particulado especificaron considerar no solo al PM<sub>10</sub> sino también al material particulado con menos de 2,5 micrómetros de diámetro aerodinámico (PM<sub>2,5</sub>). El motivo de este cambio, como ya se ha comentado, es que las partículas más pequeñas



son más peligrosas para el hombre porque tienen mayor probabilidad de ingresar a la parte inferior de los pulmones.

En la naturaleza, el material particulado se forma por muchos procesos, tales como el viento, polinización de plantas e incendios forestales. Las principales fuentes antropogénicas de pequeñas partículas incluyen la quema de combustibles sólidos como la madera y el carbón, las actividades agrícolas como la fertilización y almacenamiento de granos y la industria de la construcción.

El material particulado puede tener efectos en la salud y bienestar del hombre. Puede contribuir a aumentar las enfermedades respiratorias como la bronquitis y exacerbar los efectos de otras enfermedades cardiovasculares. Asimismo, afecta la visibilidad y velocidad de deterioro de muchos materiales hechos por el hombre.

### **Óxidos de nitrógeno (NOx)**

Los óxidos de nitrógeno (comúnmente referidos como NOx) son un grupo de gases conformado por el nitrógeno y oxígeno. El nitrógeno es el elemento más común del aire y representa 78 por ciento del aire que respiramos. Los óxidos de nitrógeno incluyen compuestos como óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El término NOx se refiere a la combinación de estas dos sustancias.

Los procesos naturales y los realizados por el hombre producen óxidos de nitrógeno. En una escala global, la emisión natural de óxido de nitrógeno es casi 15 veces mayor que la realizada por el hombre. Las fuentes más comunes de óxidos de nitrógeno en la naturaleza son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica. Las fuentes principales de emisión antropogénica son los escapes de los vehículos y la quema de combustibles fósiles.

El óxido nítrico es relativamente inofensivo, pero el dióxido de nitrógeno puede causar efectos en la salud y bienestar. En el proceso de combustión, el nitrógeno en el combustible y aire se oxida para formar óxido nítrico y algo de dióxido de nitrógeno. Los óxidos nítricos emitidos en el aire se convierten en dióxido de nitrógeno mediante reacciones fotoquímicas condicionadas por la luz solar.

El dióxido de nitrógeno daña el sistema respiratorio porque es capaz de penetrar las regiones más profundas de los pulmones. Asimismo, contribuye a la formación de lluvia ácida.

### **Plomo (Pb)**

El plomo es una sustancia natural que abunda en el ambiente. Debido a sus propiedades físicas que le permiten formarse y moldearse fácilmente, se emplea en muchas aplicaciones.

El plomo se usaba frecuentemente para fabricar tuberías de agua y recipientes para alimentos. También ha sido un ingrediente importante en la fabricación de pinturas y gasolina.

La fuente primaria de contaminación del aire por plomo ha sido el uso de combustibles

con plomo en automóviles. Como un aditivo en la gasolina, el plomo desacelera el proceso de combustión en los motores. Debido a que el plomo no se consume en el proceso de combustión, se emite como material particulado. Uno de los más grandes éxitos ambientales de los dos últimos decenios ha sido la reducción de plomo en el aire gracias al mayor uso de la gasolina sin plomo y a la reducción del contenido de plomo en combustibles con plomo.

El plomo es un contaminante importante del aire porque es tóxico para los humanos. Su difícil remoción del cuerpo hace que se acumule en varios órganos y puede dañar el sistema nervioso central. Un gran número de estudios científicos ha documentado los efectos nocivos de la exposición al plomo.

### **Progreso en el control de los contaminantes criterio**

Los esfuerzos por controlar los contaminantes criterio en los países desarrollados han dado algunos resultados positivos, aunque queda mucho trabajo por realizar. Desde 1970, los niveles de óxidos de azufre, monóxido de carbono y material particulado en el aire se han reducido, mientras que el plomo se ha eliminado casi completamente. Sin embargo, las emisiones de óxidos de nitrógeno han aumentado ligeramente y el problema del smog sigue siendo difícil de resolver. Aunque se han controlado muchas de las fuentes que producen smog, el gran número de vehículos y fuentes adicionales ha descompensado los logros alcanzados mediante la reducción.

### **Contaminantes Peligrosos del Aire (CPA)**

Los contaminantes peligrosos son compuestos cancerígenos y no cancerígenos que pueden causar efectos serios e irreversibles en la salud. Como se indicó anteriormente, las enmiendas de la Ley del Aire Limpio de 1990 de los Estados Unidos enumeró 189 compuestos como contaminantes peligrosos del aire (CPA), incluidos el tetracloruro de carbono, cloro, óxido de etileno, cadmio y manganeso. La mayoría de los CPA son compuestos orgánicos volátiles.

Las normas para controlar la emisión de estos contaminantes peligrosos están basadas en la salud. En otras palabras, se establecen límites numéricos que protegen la salud del hombre de cualquier efecto adverso.

Sin embargo, el establecimiento de normas de emisión basadas en la salud es un proceso difícil debido a la incertidumbre en la evaluación de los efectos sobre la salud. Como resultado, Estados Unidos ha fijado normas de emisión basadas en la salud solo para ocho contaminantes: asbesto, cloruro de vinilo, benceno, arsénico, berilio, mercurio, radón y radionucleidos diferentes del radón.

Los ocho contaminantes son:

- asbesto
- cloruro de vinilo
- benceno
- arsénico
- berilio
- mercurio
- radón

- radionucleidos diferentes del radón.
- Asbesto

Se sabe que el asbesto produce cáncer en el hombre. Lamentablemente, su resistencia al fuego favoreció su empleo en numerosos materiales, tales como aislantes, pinturas, recubrimiento de freno de automóviles e incluso ropa.

### **Cloruro de vinilo**

El cloruro de vinilo se usa en la producción de plásticos y cloruro de polivinilo (PVC). La exposición al cloruro de vinilo puede dañar el hígado y otros órganos.

### **Benceno**

El benceno es un compuesto cancerígeno usado en agentes desgrasantes, gasolina y solventes. Se han promulgado varias normas para controlar la emisión de benceno, incluidas las normas para la fuga de benceno en equipos, para contenedores de benceno y operaciones de transporte y disposición de desechos de benceno, y para plantas de recuperación de subproductos del coque.

### **Arsénico**

El arsénico es también un agente cancerígeno. Se emplea en la fabricación de vidrio y en la fundición de metales. Las normas de emisión se establecieron para controlar la emisión de arsénico de las plantas de fabricación de vidrio, fundiciones de metales e instalaciones para la producción de arsénico.

### **Berilio**

El berilio puede causar enfermedades del pulmón y también tiene efectos adversos sobre el hígado, bazo, riñones y glándulas linfáticas. Las fuentes de berilio incluyen las fundiciones de metal, plantas de cerámica e incineradores que queman desechos con berilio.

### **Mercurio**

El mercurio puede tener efectos adversos sobre el cerebro y riñones. Las fuentes de mercurio incluyen la quema de combustibles fósiles, plantas de fabricación de baterías de mercurio y procesos de minería que emplean mercurio.

### **Radón**

El radón es un elemento radiactivo natural. También se encuentra en materiales de construcción que contienen sustancias que emiten radón, como el yeso. Se sabe que el radón causa diversas formas de cáncer y es un contaminante importante del aire de interiores. Hasta ahora, se han establecido normas para controlar la emisión de radón en las minas subterráneas de uranio, canteras de yeso fosfórico y relaves de las minas y procesos del uranio.

### 7.3.4.1. Variables y métodos de medición

Los componentes de un sistema de monitoreo de la contaminación del aire incluyen la recolección o muestreo de contaminantes del aire ambiental y de fuentes específicas; el análisis o medición de la concentración de los contaminantes; y la notificación y uso de la información recopilada. El muestreo y análisis del aire ambiental y de la emisión de las fuentes puntuales son importantes por varias razones.

**Se puede medir el aire ambiental y la emisión de las fuentes.**

Los datos del aire ambiental se usan para determinar el cumplimiento de las normas de calidad del aire. También se usan para diagnosticar las condiciones de un área antes de construir una nueva fuente de contaminación, para desarrollar modelos de dispersión de contaminantes, para realizar estudios científicos y para evaluar la exposición humana a contaminantes y el daño al medio ambiente.

**Monitoreo del aire:**

1. **Recolección de muestras**
2. **Análisis de muestras**
3. **Notificación y uso de la información recopilada**

Los datos de emisiones de fuentes puntuales se usan para determinar el cumplimiento de los reglamentos de contaminación del aire, la eficacia del control de la contaminación del aire, la eficiencia de producción y para apoyar la investigación científica.

Las instituciones responsables del monitoreo de la calidad del aire generalmente designan los métodos de referencia para el muestreo y análisis de los contaminantes y de las fuentes de emisión. Los métodos especifican procedimientos precisos que se deben seguir para cualquier actividad de monitoreo relacionada con el cumplimiento de la reglamentación.

**Las instituciones responsables del monitoreo de la calidad del aire generalmente designan los métodos de referencia para el muestreo y análisis de los contaminantes y de las fuentes de emisión.**

Estos procedimientos orientan el muestreo, análisis, calibración de instrumentos y cálculo de las emisiones. La elección del método específico de análisis depende de un número de factores, siendo los más importantes las características químicas del contaminante y su estado físico –sólido, líquido o gaseoso. Los métodos de referencia se diseñan para determinar la concentración de un contaminante en una muestra. La concentración se expresa en términos de masa por unidad de volumen, usualmente en microgramos por metro cúbico.

Hay algunos principios básicos y terminología asociada al muestreo y análisis del contaminante. La recolección de la muestra puede realizarse mediante técnicas manuales o automáticas. El análisis y medición de los contaminantes puede hacerse por diversos medios, según las características químicas y físicas del contaminante. Uno de

los métodos para la medición del material particulado es emplear principios gravimétricos. La **gravimetría** se refiere a la medición del peso. Las partículas se atrapan o recogen en filtros y se pesan. El peso del filtro con el contaminante recolectado menos el peso de un filtro limpio da la cantidad del material particulado en un determinado volumen de aire.

**La medición del material particulado emplea principios gravimétricos. La gravimetría se refiere a la medición del peso.**

**El peso del filtro con el contaminante recolectado menos el peso de un filtro limpio da la cantidad de material particulado en un determinado volumen de aire.**

La **absorción atómica** se usa para medir el plomo. Después que se recolectan las partículas de plomo mediante métodos gravimétricos, el plomo se extrae de la muestra mediante ácidos. En el proceso de absorción atómica, el plomo absorbe pequeñas cantidades de radiación. La radiación emitida por la muestra permite conocer la cantidad de átomos de plomo en la muestra.

**La absorción atómica se usa para medir el plomo.**

Los contaminantes gaseosos se pueden medir con diversos métodos. Las técnicas más comunes son la espectrofotometría, quimiluminiscencia de fase gaseosa e ionización de llama.

La **espectrofotometría** se basa en principios colorimétricos y comúnmente se usa para medir la concentración de dióxido de azufre. En este proceso, los colorantes y productos químicos se combinan con una solución que contiene dióxido de azufre. El color de la solución da lugar a diferentes cantidades de luz absorbida. La cantidad de luz absorbida, medida con un espectrofotómetro, indica la cantidad presente de dióxido de azufre.

**La espectrofotometría se basa en principios colorimétricos y comúnmente se usa para medir la concentración de dióxido de azufre.**

La **quimiluminiscencia de fase gaseosa** es un método para medir el ozono. En este método, por reacción química al etileno, el ozono emite luz y esa luz se mide con un tubo fotomultiplicador. La cantidad de luz indica la cantidad presente de ozono.

**La quimiluminiscencia de fase gaseosa es un método para medir el ozono.**

En la **ionización de llama** se quema la muestra de aire gaseoso con una pequeña llama de hidrógeno. El número de iones o electrones que se forma es proporcional al número de átomos de carbono que se encuentra en la muestra y se cuenta electrónicamente. Esta técnica puede usarse para medir los compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos). Como este método también detecta los carbonos en el metano, un gas relativamente inofensivo que se encuentra naturalmente en la atmósfera, se debe realizar correcciones para justificar su presencia.

<b>Cuadro 7-1: Ejemplos de métodos de medición y análisis de los contaminantes de aire</b>		
<b>Método</b>	<b>Principio</b>	<b>Contaminante</b>
<b>Ionización de llama</b>	Responde en proporción al número de átomos de carbono en la muestra de gas	COV
<b>Absorción infrarroja</b>	La muestra absorbe la radiación en la región infrarroja del espectro; se mide la diferencia en la absorción. Se usa otras regiones del espectro, por ejemplo, UV	Monóxido de carbono
<b>Absorción atómica</b>	La muestra absorbe la radiación; la radiación emitida depende de los átomos presentes.	Plomo
<b>Espectroscopía de fluorescencia</b>	La muestra excitada puede reemitir el exceso de energía excitada	Ozono, NO <sub>2</sub>
<b>Recolección de partículas</b>	Gravimetría; la masa de material particulado se determinado por el peso	PM <sub>10</sub>
<b>Espectrofotometría</b>	Se forma soluciones coloreadas mediante la mezcla de los reactivos con los contaminantes	SO <sub>2</sub>

El resultado final de los procedimientos de muestreo y análisis son los datos cuantitativos. La validez de los datos depende de la exactitud y precisión de los métodos usados para generar datos. Para asegurar la validez, se emplean diversas medidas de control de calidad para cada uno de los métodos de referencia. La principal medida de control de calidad es la calibración. La **calibración** comprueba la exactitud de una medición al establecer la relación entre el resultado de un proceso de medición y un insumo conocido. Cada uno de los métodos de referencia tiene procedimientos precisos de calibración que se deben seguir para asegurar resultados exactos.

**La calibración comprueba la exactitud de una medición al establecer la relación entre el resultado de un proceso de medición y un insumo conocido.**

También se han desarrollado programas extensos de garantía de la calidad para asegurar la validez de los datos. Un componente esencial del programa de garantía de la calidad de datos son las **auditorías**. En una auditoría, uno o varios laboratorios analizan una muestra estándar conocida de un contaminante. Si los laboratorios obtienen el resultado esperado, pueden estar seguros que sus métodos y procedimientos son precisos.

**En una auditoría, uno o varios laboratorios analizan una muestra estándar conocida de un contaminante.**

### **Monitoreo de la Concentración de Contaminantes en el Aire**

En el Valle de México, Santiago, São Paulo y otras ciudades de América Latina se han establecido sistemas de monitoreo para medir la concentración de los contaminantes criterio y el progreso en el cumplimiento de las metas establecidas por la ley.

Por ejemplo, en São Paulo, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB) está a cargo de la administración y operación de las estaciones de monitoreo del aire ubicadas en el Estado de São Paulo, Brasil. Desde 1981, la CETESB opera más de 25 estaciones automáticas y 15 estaciones manuales.

En general, todas las estaciones de monitoreo en una red uniforman los criterios para la localización, instrumentación y garantía de la calidad del monitoreo. Existen procedimientos específicos que se deben seguir al realizar el muestreo de cada contaminante criterio. Estos procedimientos detallados son los **métodos de referencia**, los cuales se revisan y actualizan de acuerdo con el avance de la tecnología.

**Todas las estaciones de monitoreo en una red uniforman los criterios para la localización, instrumentación y garantía de la calidad del monitoreo.**

Los métodos de referencia pueden ser manuales o automatizados. Los **manuales** son técnicas específicas que se deben seguir cuando se recolecta y analiza la muestra de un contaminante del aire. Un **método de referencia automatizado** se refiere generalmente a un instrumento aprobado que satisface los requisitos técnicos para la recolección y análisis exactos de un contaminante. Los métodos automatizados se usan principalmente para recolectar y analizar aire de manera permanente.

**Los métodos de referencia pueden ser manuales o automatizados.**

La siguiente figura presenta un muestreador de alto volumen que se usa como un método manual para medir partículas totales en suspensión (PTS) y plomo en el aire. En este proceso gravimétrico, la bomba en el muestreador de aire de alto volumen crea un vacío que lleva el aire a una caseta cubierta. El aire pasa a través de un filtro que atrapa el material particulado. Para determinar la cantidad de material particulado en una muestra de aire, se pesa el filtro antes y después del muestreo. La diferencia de peso es la cantidad de material particulado atrapado en el filtro. La concentración de plomo se determina mediante técnicas de extracción adicional y absorción atómica.

**Para determinar la cantidad de material particulado en una muestra de aire, se pesa el filtro antes y después del muestreo.**

Se está desarrollando equipo más sofisticado para medir la concentración de material particulado en el ambiente porque como contaminantes criterio se está considerando a las PTS con menos de 10 micrómetros de diámetro aerodinámico (PM<sub>10</sub>) y material particulado con menos de 2,5 micrómetros de diámetro (PM<sub>2,5</sub>). El muestreador de aire de alto volumen contiene dispositivos que separan las partículas grandes de las pequeñas y se colocan en el equipo de muestreo de manera que el aire pasa por el dispositivo antes de atravesar el filtro. De esta manera se remueven las partículas que exceden el diámetro especificado.

Hay numerosos métodos automatizados para el muestreo y medición de contaminantes ambientales. El proceso de quimiluminiscencia de fase gaseosa, tratado anteriormente, se usa para medir el ozono. En una cámara, la muestra de aire se combina con etileno y la reacción química entre el ozono y el etileno crea pulsaciones de luz que son detectadas y contadas por un tubo fotomultiplicador. La concentración del ozono se determina al comparar el número de pulsaciones de la muestra con el número de pulsaciones de una muestra con concentración conocida de ozono.

La tecnología para medir los contaminantes del aire sigue evolucionando. Los últimos avances del monitoreo del aire incluyen el uso de rayos infrarrojos y ultravioletas para

detectar y medir los contaminantes criterio y tóxicos. La espectroscopía infrarroja de la transformada de Fourier (EITF) puede medir directamente más de 120 contaminantes gaseosos en el aire, como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y ozono. La EITF también puede medir contaminantes tóxicos, como el tolueno, benceno y metanol. La tecnología se basa en que cada gas tiene su propia "huella digital" o espectro de absorción. El sensor de la EITF monitorea todo el espectro infrarrojo y lee las diferentes huellas digitales de los gases presentes en el aire. Se están desarrollando aplicaciones específicas para esta tecnología.

**Los últimos avances del monitoreo del aire incluyen el uso de rayos infrarrojos y ultravioletas para detectar y medir contaminantes criterio y tóxicos.**

**La espectroscopía infrarroja de la transformada de Fourier (EITF) puede medir directamente más de 120 contaminantes gaseosos en el aire, como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y ozono.**

Los datos del monitoreo ambiental se usan para diversos propósitos. Se emplean para monitorear el progreso en el cumplimiento de las metas nacionales de calidad del aire y para evaluar la exposición humana. Asimismo, para desarrollar y evaluar los modelos de dispersión del aire, ejecutar planes y realizar estudios científicos de la contaminación del aire.

### **Medición de Emisiones de Contaminantes**

La medición de contaminantes de fuentes puntuales se realiza generalmente con fines específicos, por ejemplo, para evaluar el cumplimiento de las normas de emisión, medir la eficacia de las tecnologías de control y para llevar a cabo investigaciones científicas. Un término que se usa frecuentemente en relación con la muestra de una fuente estacionaria es "prueba de chimenea". Esto se debe a que muchas de las mediciones se toman en las chimeneas industriales. En realidad, las mediciones se pueden tomar en otros lugares.

**Un término común usado en referencia a una muestra de fuente estacionaria es "prueba de chimenea".**

Para determinar la emisión de contaminantes de una fuente se usan cuatro métodos de referencia. Estos métodos permiten conocer la ubicación apropiada de la muestra, la velocidad o tasa de flujo del gas, la composición del flujo de gas y el contenido de humedad del flujo de gas. Estos cuatro métodos se usan junto con otros métodos específicos diseñados para medir la concentración de contaminantes como el material particulado y el dióxido de azufre.

**Para determinar la emisión de contaminantes de una fuente se usan cuatro métodos de referencia.**

En la siguiente figura aparece un equipo de muestreo especificado por el método de referencia 5 de la EPA para la medición de partículas. Comúnmente referido como el



"método tren 5", esta configuración de muestreo puede modificarse para medir varios contaminantes. El método tren 5 consiste en una sonda de muestreo, un filtro ubicado en una caja calentada, una serie de percutores y equipo auxiliar como una bomba, contador de gas seco y manómetros para medir los cambios de presión. La sonda recoge la muestra que pasa a través de un filtro donde queda atrapado el material particulado. Luego el gas pasa por los percutores sumergidos en hielo para remover la humedad del flujo de gas. El contador de gas mide la tasa de flujo, mientras que la bomba y manómetros se usan para mantener las condiciones isocinéticas durante el período del muestreo. La **isocinética** se define como la relación entre el flujo de gas de una chimenea con el flujo de gas de una sonda de muestreo. Es importante que estos flujos permanezcan iguales para recopilar una muestra representativa.

**La isocinética se define como la relación entre el flujo de gas de una chimenea con el flujo de gas de una sonda de muestreo.**

### **Inventarios de Emisiones**

Los datos recopilados de la medición de contaminantes del aire y de fuentes de emisión pueden ser útiles para los profesionales de la contaminación del aire. El desarrollo de inventarios de emisiones es un producto derivado del manejo de esos datos.

**Los inventarios de emisiones** son listados detallados de contaminantes emitidos por fuentes específicas en una determinada área. Son herramientas valiosas de planificación y evaluación y ayudan a definir la relación entre las fuentes contaminantes y las comunidades vecinas, contribuyen al desarrollo de estrategias alternativas para el control de la contaminación y proporcionar información concisa sobre contaminantes, fuentes y emisiones.

El desarrollo de un inventario es una tarea tediosa y detallada. Los datos que constituyen el inventario deben ser recopilados y analizados cuidadosamente. Se deben seguir lineamientos estrictos de garantía de calidad para asegurar la precisión y validez del inventario.

#### **7.3.5. Radionucleidos**

En la atmósfera se encuentran isótopos<sup>1</sup> radioactivos de origen natural, como: <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb, and <sup>222</sup>Rn y de origen antropogénico el <sup>85</sup>Kr. Estos isótopos radiactivos son emitidos como gases o partículas en suspensión. Normalmente se encuentran en concentraciones bajas que no suponen peligro, salvo que en algunas zonas se concentren de forma especial.

Estas sustancias causan graves daños, cuando sus concentraciones son relativamente altas (pero son muy bajas en valor absoluto) y pueden producir cáncer, afectar el sistema reproductor de los seres vivos dañando a las futuras generaciones.

---

<sup>1</sup> Elementos químicos que tienen el mismo número atómico pero distinta masa atómica, porque tienen distinto número de neutrones. Muchos elementos químicos tienen algún isótopo que es radiactivo, es decir que es inestable y se va descomponiendo en otros elementos liberando radiactividad.

El  $^{222}\text{Rn}$  es exhalado de las superficies terrestres como consecuencia de la descomposición de uranio en el suelo. En la actualidad preocupa porque puede penetrar desde el suelo y acumularse en el interior de los edificios poco ventilados, alcanzando concentraciones peligrosas. El radón que sale a la atmósfera se diluye con rapidez y no llega a niveles de riesgo. Estudios serios demuestran que la radiactividad emitida por este gas cuando entra en los pulmones es responsable de entre el 10 y el 15% de los cánceres de pulmón. Su efecto se suma al del tabaco, porque las moléculas del gas se adhieren a las partículas del humo y se depositan en la pared de los alvéolos, sometiendo a sus células a intensas dosis de radiactividad. El efecto de este contaminante hay que tenerlo en cuenta especialmente en los edificios construidos en suelos que por sus características geológicas son productores de altas cantidades de radón.

El  $^7\text{Be}$  es producido por interacciones de los rayos cósmicos en la alta troposfera y baja estratosfera. El  $^{210}\text{Pb}$  es producido en la baja troposfera por la descomposición del  $^{222}\text{Rn}$  en la atmósfera. La mayor parte del  $^{85}\text{Kr}$  que se encuentra en la atmósfera, ha sido liberado durante el retratamiento de combustible nuclear.

#### 7.3.5.1. Variables

- Radionucleidos naturales  
 $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{222}\text{Rn}$
- Radionucleidos antropogénicos  
 $^{85}\text{Kr}$

#### 7.3.5.2. Unidades y escalas

La cantidad de radionucleidos contenida en el aire se mide en picocurios por litro de aire (pCi/L) o bequerel por metro cubico de aire ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

$$\text{pCi/L} = 0.6 \text{ Bq}/\text{m}^3$$

El curio es el numero de mutaciones nucleares por segundo en un gramo de radio.

$$1 \text{ Curio} = 1.000 \text{ microcurios} = 1.000.000 \text{ de Picocurios.}$$

El becquerel. es la unidad básica para la medición de radioactividad: 1 bequerel es el nivel de radiación emitido en un segundo por un átomo en una sustancia radioactiva al descomponerse y transformarse en otro.

#### 7.3.5.3. Métodos de medida

La espectrometría de masas utilizando aceleradores de partículas (AMS) es una técnica ultrasensible que permite medir concentraciones pequeñas, del orden de una parte en  $10^{16}$  de diferentes nucleídos. En particular se utiliza para la identificación y medición de

isótopos radiactivos de vidas medias largas, dentro del rango de  $10^3$  a  $10^8$  años. Estos radioisótopos son de particular interés en ramas tan diferentes como las ciencias de la atmósfera, la cosmología o la arqueología. Dadas las concentraciones extremadamente bajas que es posible medir con esta técnica, así como las pequeñas cantidades de muestra que son necesarias (del orden de unos pocos miligramos).

### 7.3.6. Isótopos en precipitación

Un trazador naturales son los isótopos estables del agua. A diferencia de las especies químicas disueltas, estos trazadores están incorporados en la propia molécula de agua, y su comportamiento, desde el punto de vista químico, es idéntico a las del resto de moléculas de agua.

La posibilidad de utilizar esta herramienta viene proporcionada por la existencia de forma natural de especies isotópicas pesadas de hidrógeno y oxígeno ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ), de forma que la relación entre el número de isótopos pesados y los más abundantes ( $^{16}\text{O}$  y  $^1\text{H}$ ) en cada tipo de agua, varía como consecuencia de procesos naturales. Esta variabilidad isotópica natural, que se observa en la precipitación y se transmite a ríos, lagos y aguas subterráneas, es resultado de los procesos que controlan la condensación de la lluvia, en especial la temperatura. Existe, por tanto, una marcada variación natural tanto espacial (latitud, altitud) como temporal (estacional) que proporciona a cada cuerpo de agua con una composición isotópica característica.

La relación entre los isótopos pesados  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  frente a los más abundantes  $^{16}\text{O}$  y  $^1\text{H}$  en las moléculas de agua varía cada vez que se produce un cambio de fase (evaporación o precipitación) como consecuencia de la diferente tensión de vapor de cada molécula. La precipitación, que constituye el punto de partida para las aguas continentales, presenta un rango de variación importante tanto espacial como temporalmente, que viene a representar el resultado de la historia de las masas de nubes que generan la precipitación en cada punto. Estas variaciones, aunque de magnitud muy pequeña, permiten trazar cada cuerpo de agua a lo largo del ciclo hidrológico.

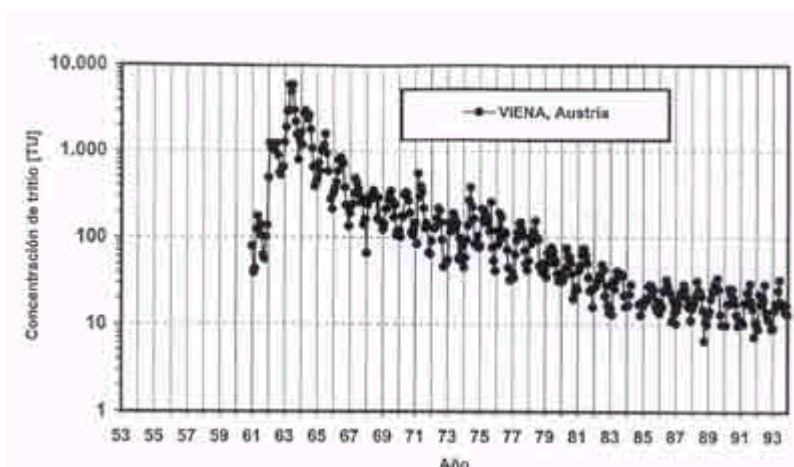
En general, las aguas subterráneas presentan un contenido de isótopos estables muy similar a la media anual de la lluvia en la zona de recarga, ponderada por la cantidad de precipitación. Sin embargo la evaporación prolongada de aguas continentales en lagos, embalses, humedales y ríos de bajo caudal produce una concentración de isótopos pesados, de modo que la relación isotópica de las aguas sometidas a evaporación está "enriquecida" en isótopos pesados, y por tanto, ya no refleja la composición original de la precipitación.

Durante la evaporación en la superficie de mar y océanos, las moléculas que contienen las especies isotópicas pesadas tienden a permanecer en la fase líquida, mientras que las que contienen las especies más abundantes se trasladan preferentemente a la fase gaseosa, de forma que el vapor atmosférico se encuentra isotópicamente "empobrecido" en isótopos pesado respecto al agua de la que procede. Este hecho explica que la mayoría de las aguas no evaporadas en zonas continentales presente contenidos de oxígeno-18 y deuterio negativos (respecto al patrón V-SMOW). En cada episodio de condensación del vapor de agua se produce un empobrecimiento progresivo del vapor de agua residual, de modo que las nuevas precipitaciones presentarán contenidos isotópicos más negativos. Es por ello, que los contenidos de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  más negativos se

encuentran en los casquetes glaciares a altas latitudes y en zonas de montaña. Como norma general, las lluvias en las zonas costeras son más positivas isotópicamente que las del interior o de las zonas montañosas.

El tritio  $^3\text{H}$  es un isótopo radiactivo del hidrógeno y como tal, forma parte integral de la molécula del agua, constituyendo otro trazador ideal del agua ya que también es conservativo en la mayoría de las condiciones. Además de permitir estudiar el origen de los diferentes cuerpos de agua, su desintegración radiactiva permite añadir una dimensión temporal.

La utilidad del tritio en hidrología durante las últimas décadas ha estado potenciada por el aumento de varios ordenes de magnitud de la concentración de este isótopo en la precipitación. El elevado número y potencia de los ensayos con bombas termonucleares en la atmósfera durante el periodo 1952-1963 originó una importante lluvia radiactiva incluyendo una cantidad de tritio varios ordenes de magnitud superior a la que se produce de forma natural en la alta atmósfera. A partir de 1963, año en que se firmó un tratado de prohibición parcial de ese tipo de ensayos, la cantidad de tritio emitida a la atmósfera por estas fuentes ha sido muy pequeña (figura 5). A partir de dicho año, en el que se observó un máximo en la concentración de tritio en el agua de lluvia, los valores medidos en ambos hemisferios han mostrado un descenso hasta valores muy próximos a los que había en el período anterior a las explosiones. En la actualidad, existen otras fuentes adicionales de tritio (industria de señales luminiscentes, procesamiento de combustible nuclear, industria relojera, etc.), pero a diferencia del tritio derivado de las explosiones nucleares, el tritio presente en dichas precipitaciones tiene un carácter muy local, lo que puede complicar en algunos casos la datación con precisión de las aguas subterráneas recientes.



**Figura** Concentración de tritio en las aguas de lluvia típica para ambos hemisferios desde el año 1953 a la actualidad.

Como una primera aproximación semi-cuantitativa a la interpretación de los contenidos de tritio en las aguas subterráneas se ha sugerido la siguiente relación:

- Aguas sin tritio (0 UT). Se trata de aguas que carecen de un componente de recarga reciente, y por tanto con una edad superior a los cien años. La ausencia de tritio se observa en acuíferos profundos confinados, con edades del agua

subterránea de varios miles de años y perfectamente aislados de acuíferos someros y de fuentes de contaminación.

- Aguas con valores de tritio inferior al de la precipitación actual. Ya que las aguas de lluvia de los últimos 40 años han presentado contenidos de tritio superiores a 5 UT (aun corrigiendo por desintegración radiactiva), se desprende que estas aguas son relativamente recientes, pero con una edad superior a 50 años, o bien se trata de una mezcla entre aguas más o menos recientes y aguas con contenido muy bajo o nulo de tritio. Estos valores se observan en sistemas donde se extrae agua de varios horizontes geológicos, cuyas aguas pueden tener tiempos de residencia muy variables.
- Aguas con valores de tritio entre 5 y 7 UT. Son los valores que se observan hoy en día en las precipitaciones sobre la Península Ibérica, y corresponde por tanto, en la mayoría de los casos, a aguas subterráneas muy recientes 3-5 años. Valores de esta magnitud deben encontrarse en embalses cuyas aguas procedan de lluvias recientes. Sin embargo se han encontrado pequeños embalses que recogen, en su mayor parte, descargas de aguas subterráneas cuyo contenido de tritio es inferior al de las lluvias actuales.
- Aguas con valores de tritio entre 7 y  $\gg$  20 UT. Los contenidos de tritio superiores a los de las lluvias actuales corresponden de forma inequívoca a las precipitaciones de las últimas cuatro décadas. Una interpretación más precisa de la edad de las aguas exige evaluar el tipo de flujo que domina en el sistema a ser estudiado. Tres modelos principales y sus posibles combinaciones han sido incluidos en modelos matemáticos que determinan parámetros hidráulicos del sistema (tiempo de residencia, coeficientes de dispersión, velocidad del flujo, etc.). Los tres tipos de flujo son: pistón, exponencial o de mezcla completa y dispersivo. El valor máximo que se puede encontrar hoy en día depende del modelo empleado; valores del orden de 15-20 UT se obtienen con el modelo exponencial, y algo mayores en el caso del modelo tipo pistón.
- Aguas con valores de tritio superiores a  $\gg$  20 UT. Corresponde a tritio artificial derivado de algún tipo de contaminación donde hubo lixiviado de algún residuo con alto contenido de tritio. Estos valores tan sólo se observan en las proximidades de basureros o zonas de residuos industriales.

### 7.3.6.1. Unidades y escalas

Los contenidos de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  se expresan como desviación en tanto por mil respecto a un patrón internacional,

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{patrón}}} - 1 \right) \cdot 1000 \quad [‰]$$

donde  $R_{\text{muestra}}$  y  $R_{\text{patrón}}$  indican la relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  o  $^2\text{H}/^1\text{H}$  en cada muestra. Valores positivos indican mayor proporción de los isótopos pesados en la muestra que la observada en el patrón y viceversa. El patrón respecto al que se expresan los contenidos en hidrología es el agua de mar (conocido por sus siglas en inglés V-SMOW; Vienna Standard Mean Oceanic Water), ya que representa más del 98% del agua presente en la superficie terrestre.

A escala global, la relación entre los contenidos de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  de las aguas meteóricas no sometidas a evaporación se ajusta de forma aceptable a la relación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

la cual se denomina Línea Mundial de las Aguas Meteóricas. Localmente pueden existir pequeñas diferencias, que se investigan a partir del análisis del agua de lluvia colectadas durante un tiempo o bien a partir del análisis de agua de manantiales y pozos someros. Puntos situados por encima de dicha línea en un diagrama  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ , suelen observarse en zonas donde el vapor que produjo las lluvias, deriva de mares con circulación restringida con el océano, como el Mar Mediterráneo. Valores situados por debajo de la línea suelen corresponder a aguas sometidas a evaporación (lagos, embalses, humedales), o bien a aguas subterráneas no evaporadas mezcladas con aguas de estos cuerpos superficiales.

La similitud de valores en un diagrama  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$  suele indicar aguas con un origen similar, es decir que proceden de una misma zona de recarga. Aquellos puntos que se apartan del grupo principal o que se alinean a lo largo de una posible línea de mezcla, indica que existen al menos dos tipos de agua desde el punto de vista de su procedencia (recarga de ríos o lagos, intrusión de agua de mar o de una salmuera, conexión con un acuífero más profundo, etc.).

Las concentraciones de tritio en hidrología se expresan como Unidades de tritio (UT); una UT equivale a un átomo de tritio por cada  $10^{18}$  átomos de  $^1\text{H}$ , valor que equivale a  $0,118 \text{ Bq} \times \text{L}^{-1}$ . Su periodo de semidesintegración es de 12,43 años. Existe un equilibrio de forma natural entre el tritio que se produce en la alta atmósfera y su desintegración en la hidrosfera. Si se considera su periodo de semidesintegración, el tritio natural sólo puede detectarse en aguas que han estado aisladas de la atmósfera por un periodo máximo de 100 años. En ciertos casos, la presencia de tritio en aguas antiguas ha sido utilizada como indicador de mezcla con aguas de recarga reciente.

## **7.6.2. Métodos de medida de isótopos en la precipitación**

En estos estudios se usaron los isótopos ambientales oxígeno-18 y deuterio, isótopos estables del oxígeno y hidrógeno respectivamente. Estos isótopos son parte de la molécula de agua, luego son trazadores ideales para estudiar el comportamiento del agua dentro del ciclo hidrológico.

## **7.3.7. Físico - Química de la precipitación**

### **7.3.7.1. pH**

El principio básico de la medida electrométrica del pH se fundamenta en el registro potenciométrico de la actividad de los iones hidrógeno por el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo combinado. La fuerza electromotriz (fem) producida por el sistema electroquímico varía linealmente con el pH y puede verificarse por la obtención de una gráfica de pH vs. fem para diferentes soluciones de pH conocido. El pH de la muestra se determina por interpolación.

*El instrumento de medida del pH* está constituido por un potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un mecanismo compensador de temperatura; cuando se sumergen los electrodos en la solución problema se completa el circuito. Muchos medidores de pH pueden realizar lecturas en escalas de pH o de milivoltios.

### 7.3.7.2. Conductividad

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos son buenas conductoras.

Para la determinación de la conductividad la medida física hecha en el laboratorio es la resistencia, en ohmios o megaohmios. La conductividad es el inverso de la resistencia específica, y se expresa en micromho por centímetro ( $\mu\text{mho/cm}$ ) o milisiemens por metro (mS/m) en el Sistema Internacional de Unidades.

### 7.3.7.3. Nitratos

Para la medición de los nitratos se emplea la técnica de monitoreo espectrofotométrico ultravioleta (UV) que mide la absorbancia del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a 220 nm. La técnica de monitoreo espectrofotométrico ultravioleta de  $\text{NO}_3^-$  obedece la ley de Beer. Para las mediciones se emplea un *Espectrofotómetro*, para usar a 220 nm con celda de cuarzo de 1 cm de longitud de paso óptico. La señal se mide en absorbancia que posteriormente es traducida en mg/L.

### 7.3.8. Red de observación

#### 7.3.8.1. Red de observación del IDEAM

##### *Radiación Solar Global*

Instrumentos :           ACG = Actinógrafo

PIR = Piranómetro

#### **Area Operativa 01: Antioquia - Chocó**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
2308522	San Carlos	San Carlos	Antioquia	06 09 N 75 00 W	1132	ACG
2308504	La Selva	Río Negro	Antioquia	06 08 N 78 23 W	2090	ACG
2701507	Apto Olaya Herrera	Medellín	Antioquia	06 13 N 75 36 W	1490	ACG
2625504	Cacaoteras	Caucasia	Antioquia	07 59 N 75 07 W	55	ACG

**Area Operativa 02: Atlántico - Bolivar - Sucre - Córdoba**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
2903512	El Limón	Manatí	Atlántico	10 25 N 75 04 W	7	ACG
2502510	Apto Baracoa	Magangué	Bolívar	09 16 N 74 49 W	18	ACG
2502527	Unisucre	Sampes	Sucre	09 12 N 75 23 W	160	ACG
1307505	Unicordoba	Montería	Córdoba	08 48 N 75 52 W	15	ACG
1401502	Apto Rafael Nuñez	Cartagena	Bolívar	10 27 N 75 31 W	2	ACG

**Area Operativa 03: Meta - Llanos Orientales**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
3503502	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	04 10 N 73 37 W	423	ACG
3401501	Gaviotas	San J. Ocuté	Vichada	04 33 N 70 56 W	170	ACG
3801503	Pto Carreño	Pto Carreño	Vichada	06 11 N 76 29 W	50	ACG

**Area Operativa 04: Huila - Caquetá**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
4603501	Maguaré	El Doncello	Caquetá	01 37 N 75 08 W	270	ACG
2110505	Los rosales	Campo Alegre	Huila	02 37 N 75 25 W	553	ACG
2111502	Apto Benito Salas	Neiva	Huila	02 58 N 75 18 W	443	ACG
2101503	Parque Arq.	San Agustín	Huila	01 51 N 76 18 W	1800	ACG
2109502	Hidrobetania	Palermo	Huila	02 45 N 75 24 W	500	ACG

**Area Operativa 05: Magdalena - Cesar - La Guajira**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
2906503	Prado Sevilla	Ciénaga	Magdalena	10 46 N 74 10 W	18	ACG
2802507	Gja. Motilonia	Agustín Codazzi	Cesar	10 00 N 73 15 W	180	ACG
1506505	Apto. A. Padilla	Riohacha	La Guajira	11 32 N 72 56 W	4	ACG
1508502	Nazareth	Uribia	La Guajira	12 11 N 71 17 W	85	ACG
1501505	Apto Santa Marta	Santa Marta	Magdalena	11 08 N 74 14 W	4	ACG



**Area Operativa 06: Boyacá - Casanare**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
2402503	La Sierra	Duitama	Boyacá	05 58 N 73 10 W	2700	ACG
2401530	Villa de Leyva	Villa de Leyva	Boyacá	05 39 N 73 32 W	2215	ACG
2403513	UPTC	Tunja	Boyacá	05 34 N 73 22 W	2690	ACG
2403512	Surbatá	Duitama	Boyacá	05 49 N 73 04 W	2485	ACG

**Area Operativa 07: Nariño - Cauca - Putumayo**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
5205501	Apto San Luis	Ipiales	Nariño	00 49 N 77 38 W	2961	ACG
5204501	Obonuco	Pasto	Nariño	01 11 N 77 18 W	2710	ACG
5103502	CCCP	Tumaco	Nariño	01 51 N 78 41 W	1	ACG

**Area Operativa 08: Santanderes - Arauca**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
1601501	Apto Camilo Daza	Cúcuta	N. Santander	07 56 N 72 31 W	250	ACG
3705501	Apto Arauca	Arauca	Arauca	07 04 N 70 44 W	128	ACG
1605504	Abrego	Abrego	N. Santander	08 05 N 73 14 W	1430	ACG
1602504	Cínera	Cúcuta	N. Santander	08 09 N 72 29 W	100	ACG
1602503	Salazar	Salazar	N. Santander	07 47 N 72 49 W	860	ACG
2319513	Apto Palo Negro	Lebrija	Santander	07 06 N 73 12 W	1189	ACG
2402502	El Cucharero	Pinchote	Santander	06 31 N 73 13 W	985	ACG
2318501	Villa Leiva	Sabana de Torres	Santander	07 26 N 73 30 W	328	ACG

**Area Operativa 09: Valle - Caldas - Quindío - Risaralda**

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
2605507	Univalle	Cali	Valle	03 24 N 76 32 W	970	ACG
2607508	Cenicaña	Florida	valle	03 23 N 76 19 W	1050	ACG
2609523	El Vínculo	Buga	Valle	03 49 N 76 19 W	979	ACG

2607505	Ingenio Manuelita	Palmira	Valle	03 34 N 76 17 W	1020	ACG
2613504	Apto Matecaña	Pereira	Risaralda	04 49 N 75 44 W	1342	PIR
5311502	Colpuertos	Buenaventura	Valle	05 53 N 77 04 W	10	ACG

### Area Operativa 10: Tolima

Código	Estación	Municipio	Depto.	Coord.	Elev. Mts	Instr.
2118502	Nataima	Espinal	Tolima	04 12 N 74 56 W	431	ACG
2124504	Apto. Perales	Ibagué	Tolima	04 26 N 75 09 W	928	ACG

### Area Operativa 11: Cundinamarca - Leticia - San Andrés

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR
4801501	Apto. Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	04 09 SUR 69 57 W	84	ACG
2120598	Providencia	Tenjo	Cundinamarca	04 48 N 74 12 W	2560	ACG
2401512	Isla Santuario	Fúquene	Cundinamarca	05 28 N 73 44 W	2580	ACG
219512	Valsalice	Fusagasugá	Cundinamarca	04 23 N 74 24 W	1460	ACG
2120613	Radio Sonda (CNRS)	Bogotá	Cundinamarca	04 42 N 74 09 W	2546	PIR.

### Estaciones Automáticas Vía Satélite

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO	COORD.	ELEV. Mts	INSTR.
01	CNRS	Santafé de Bogotá	Cund.	04 42 N 74 09 W	2546	PIR _ PAR
02	Gaviotas	San J. Ocuté	Vichada	04 33 N 70 55 W	171	PIR – PAR
03	Mitú	Mitú	Vaupés	01 16 N 70 14 W	207	PIR – PAR
04	San José del Guav.	San José del G.	Guaviare	02 35 N 72 38 W	165	PIR – PAR
05	Pto. Inírida	Pto. Inírida	Inírida	03 50 N 67 55 W	100	PIR – PAR
06	Macagual	Florencia	Caquetá	01 31 N 75 36 W	280	PIR – PAR
07	San V. del	San V. del Cag.	Caquetá	02 09 N 74 48 W	300	PIR –

	Caguán					PAR
08	Gorgona	Isla Gorgona	Isla Gorgona	03 02 N 78 09 W	10	PIR – PAR
09	Malpelo	Isla Malpelo	Isla Malpelo	03 38 N 81 35 W	150	PIR – PAR
10	Serranilla	Isla Serranilla	Isla Serranilla	16 75 N 80 00 W	5	PIR

### Estaciones Automáticas Sinópticas

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts	INSTR .
11	Apto. J. M. Córdoba	Rionegro	Antioquia	06 08 N 75 26 W	2140	PIR – PAR
12	Apto Palonegro	Lebrija	Santander	07 06 N 73 12 W	1189	PIR – PAR
13	Apto A. Bonilla	Palmira	Valle	03 33 N 76 23 W	961	PIR – PAR
14	Apto Cortissoz	Soledad	Atlántico	10 53 N 74 47 W	14	PIR – PAR
15	Apto Rafael Nuñez	Cartagena	Bolívar	10 27 N 70 31 W	02	PIR – PAR
16	Apto San Luis	Ipiales	Nariño	00 49 N 77 38 W	2961	PIR – PAR
17	Apto V. Cobo	Leticia	Amazonas	04 09 Sur 69 57 W	84	PIR – PAR
18	Apto A. Padilla	Riohacha	Guajira	11 32 N 72 56 W	04	PIR – PAR
19	Apto Rojas P.	San Andrés Islas	San Andrés Islas	12 35 N 81 43 W	01	PIR- PAR

### Radiación Ultravioleta

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts
2120613	Radio Sonda (CNRS)	Bogotá	Cundinamarca	04 42 N 74 09 W	2546
1506505	Apto A. Padilla	Riohacha	La Guajira	11 32 N 72 56 W	04
	Pasto	Pasto	Nariño	01 11 N 77 18 W	2580
1701501	Apto Rojas P.	San Andrés Islas	San Andrés Islas	12 35 N 81 43 W	01

4801501	Apto V. Cobo	Leticia	Amazonas	04 09 Sur 69 57 W	84
---------	--------------	---------	----------	-------------------	----

### *Ozonosonda*

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts
2120613	Radio Sonda (CNRS)	Bogotá	Cundinamarca	04 42 N 74 09 W	2546

### *Isótopos en la precipitación*

CODIGO	ESTACION	MUNICIPIO	DEPTO.	COORD.	ELEV. Mts
2120613	Radio Sonda (CNRS)	Bogotá	Cundinamarca	04 42 N 74 09 W	2546
2904502	Apto Cortissoz	Soledad	Atlántico	10 53 N 74 47 W	14

### *Química de la lluvia*

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Elevacionm .s.n.m.
Sede IDEAM	Barranquilla	Atlántico	10,967 °N	74,767 °W	12
Lab. IDEAM	Bogotá	Cundinamarca	4,700 °N	74,150 °W	2546
Sede IDEAM	Bucaramanga	Santander	7,177 °N	73,117 °W	1025
Sede IDEAM	Cali	Valle del Cauca	3,483 °N	76,533 °W	970
Apto. Camilo Daza	Cúcuta	Norte de Santander	7,933 °N	72,517 °W	250
Apto. Palonegro	Lebrija	Santander	7,133 °N	73,183 °W	1189
Interlaken	Ibagué	Tolima	4,433 °N	75,233 °W	1210
Apto. Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	4,150 °N	69,950 °W	84
Sede IDEAM	Medellín	Antioquia	6,250 °N	75,567 °W	1549
Apto. Benito Salas	Neiva	Huila	2,967 °N	75,300 °W	439
Apto. Puerto Carreño	Puerto Carreño	Vichada	6,167 °N	67,500 °W	55
Apto. Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,533 °N	72,933 °W	4
Apto. Ernesto Cortissoz	Soledad	Atlántico	10,883 °N	74,583 °W	14
Unillanos	Villavicencio	Meta	4,117 °N	73,633 °W	340

### **7.3.8.2. Red DAMA**

No.1 Univers. El bosque	No.2 MMA	No.3 Sony music	No.4 Olaya	No.5 Univ. Nación.	No.6 Carrefour	No.7 Cazucá
PM-10	PM-10	PM-10	PM-10		PM-10	PM-10
	<del>CO</del>	O <sub>3</sub>	<del>CO</del>	O <sub>3</sub>		O <sub>3</sub>
	CO	CO	CO			CO
SO <sub>2</sub>	<del>SO<sub>2</sub></del>	SO <sub>2</sub>	<del>SO<sub>2</sub></del>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
NO		NO		NO	NO	NO
NO <sub>2</sub>	<del>NO<sub>2</sub></del>	NO <sub>2</sub>	<del>NO<sub>2</sub></del>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
NOX		NOX		NOX	NOX	NOX
	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>				

	NMCH	NMCH				
VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV
					TEMP	
PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PREC	PRE
DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
	BEN TO FOR		BEN TO FOR			

No.8 Escu. Ingen.	No.9 Centralmezclas	No.10 U. Sto. Tomás	No.11 corpas	No.12 CADE energía	No.13 merck	No.14 Hiland. Fontib.
		PM-10	PM-10	PM-10	PM-10	PM-10
wsx	wsx					
wsy	wsy				O <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>
wsz	wsz		CO		CO	CO
		SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
		NO	NO	NO	NO	NO
		NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
		NOX	NOX	NOX	NOX	NOX
VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV
TD20	TD20		TEMP		TEMP	TEMP
TD8	TD8					
TD2	TD2					
HUM	HUM					
PRES	PRES					
PREC	PREC	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI
DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
AZ	AZ					
EL	EL					
RADS	RADS					

PM-10                      Analizador de partículas  
 CH<sub>4</sub>, NMCH<sub>4</sub>            Analizador de metano y compuestos diferentes al metano  
 BEN, TO, FOR            Analizador de benceno, tolueno y formaldehído  
 VV, DV                    Velocidad y dirección del viento  
 T, TD20, TD8, TD2    Temperatura y temperatura a tres niveles  
 RAS                        Radiación solar incidente  
 Nota: Las casillas sombreadas son los gases que analiza el sensor OPSIS

## 8. SISTEMA DE INFORMACIÓN

### 8.1. Radiación solar

Las medidas sobre valores diarios, se disponen desde el inicio de las mediciones en 1981 para cada una de las siguientes estaciones:

*Estación                      Municipio                      Depto.*

San Carlos	San Carlos	Antioquia
La Selva	Río Negro	Antioquia
Apto Olaya Herrera	Medellín	Antioquia
Cacaoteras	Caucasia	Antioquia
El Limón	Manatí	Atlántico
Apto Baracoa	Magangué	Bolívar
Unisucre	Sampes	Sucre
Unicordoba	Montería	Córdoba
Apto Rafael Nuñez	Cartagena	Bolívar
Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta
Gaviotas	San J. Ocuté	Vichada
Pto Carreño	Pto Carreño	Vichada
Maguaré	El Doncello	Caquetá
Los rosales	Campo Alegre	Huila
Apto Benito Salas	Neiva	Huila
Parque Arq.	San Agustín	Huila
Hidrobotania	Palermo	Huila
Prado Sevilla	Cienaga	Magdalena
Gja. Motilonia	Agustín Codazzi	Cesar
Apto. A. Padilla	Riohacha	Guajira
Nazareth	Uribia	Guajira
Apto Santa Marta	Santa Marta	Magdalena
La Sierra	Duitama	Boyacá
Villa de Leyva	Villa de Leyva	Boyacá
UPTC	Tunja	Boyacá
Surbatá	Duitama	Boyacá
Apto San Luis	Ipiales	Nariño
Obonuco	Pasto	Nariño
CCCP	Tumaco	Nariño
Apto Camilo Daza	Cúcuta	N. Santander
Apto Arauca	Arauca	Arauca
Abrego	Abrego	N. Santander
Cínera	Cúcuta	N. Santander
Salazar	Salazar	N. Santander
Apto Palo Negro	Lebrija	Santander
El Cucharó	Pinchote	Santander
Villa Leiva	Sabana de Torres	Santander
Univalle	Cali	Valle
Cenicaña	Florida	valle
El Vínculo	Buga	Valle
Ingenio Manuelita	Palmira	Valle
Apto Matecaña	Pereira	Risaralda
Colpuertos	Buenaventura	Valle
Nataima	Espinal	Tolima
Apto. Perales	Ibagué	Tolima
Apto. Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas
Providencia	Tenjo	Cundinamarca
Isla Santuario	Fúquene	Cundinamarca
Valsalice	Fusagasugá	Cundinamarca
Radio Sonda (CNRS)	Bogotá	Cundinamarca

Gaviotas	San J. Ocuné	Vichada
Mitú	Mitú	Vaupés
San José del Guav.	San José del G.	Guaviare
Pto. Inírida	Pto. Inírida	Inírida
Macagual	Florencia	Caquetá
San V. del Caguán	San V. del Cag.	Caquetá
Gorgona	Isla Gorgona	Isla Gorgona
Malpelo	Isla Malpelo	Isla Malpelo
Serranilla	Isla Serranilla	Isla Serranilla
Apto. J. M. Córdoba	Rionegro	Antioquia
Apto Palonegro	Lebrija	Santander
Apto A. Bonilla	Palmira	Valle
Apto Cortissoz	Soledad	Atlántico
Apto Rafael Nuñez	Cartagena	Bolívar
Apto San Luis	Ipiales	Nariño
Apto V. Cobo	Leticia	Amazonas
Apto A. Padilla	Riohacha	Guajira
Apto Rojas P.	San Andrés Islas	San Andrés Islas

## 8.2. Radiación ultravioleta

Las medidas sobre valores máximos, integrales horarios y totales diarios, se disponen desde el inicio de las mediciones en 1998 para cada una de las siguientes estaciones y variables:

<i>Estaciones</i>	<i>Variables</i>
Bogotá	UV-B 305 nm
Pasto	UV-B 320 nm
Leticia	UV-A 340 nm
Riohacha	UV-A 380 nm
San Andrés Indices	UV
	Radiación integral PAR
	UV-B Integrada 290-320 nm
	UV-A Integrada 320-380 nm

## 8.3. Ozono

### 8.3.1. Perfiles de ozono

Las medidas de ozono para diferentes niveles de presión e información complementaria, se disponen, una o dos veces al mes, desde el inicio de las mediciones en 1999 para cada una de las siguientes estaciones y variables:

<i>Estación</i>	<i>Variable</i>
Bogotá	Presión

Ozono  
 Altura geopotencial  
 Temperatura  
 Temperatura virtual  
 Humedad Relativa  
 Punto de rocío  
 Dirección del viento  
 Velocidad del viento  
 Tasa de ascenso  
 Tasa L (gradiente de temp.)

### 8.3.2. Ozono total

Las medidas de para la columna total de ozono, se disponen para observaciones in situ efectuadas una o dos veces al mes y en datos diarios y mensuales en forma reticular.

#### *In situ:*

<i>Estación</i>	<i>Variable</i>	<i>Periodo</i>
Bogotá	Ozono Integrado	1999 a la fecha

#### *Reticular*

Información reticular diaria, de datos TOMS, para grillas espaciales de 1°X1.25° latitud/longitud, a partir de noviembre de 1978, global o nacional.

### 8.4. Isótopos en la precipitación

Las medidas sobre valores isotópicos, se disponen para muestras mensuales de las siguientes estaciones, variables y periodos:

<i>Estaciones</i>	<i>Variables</i>	<i>Periodo</i>
Barranquilla	O18 H2 H3 H3_ERR	1971 - 1989
Bogotá	O18 H2 H3 H3_ERR	1971 - 1998 2000 a la fecha

### 8.5. Química de la lluvia

Para el seguimiento de la lluvia ácida y su comportamiento químico se efectúan análisis de pH, conductividad y concentración de nitratos en las siguientes estaciones a partir de 1998.



<i>Estación</i>	<i>Departamento</i>
Barranquilla	Atlántico
Bogotá	Cundinamarca
Bucaramanga	Santander
Cali	Valle del Cauca
Cúcuta	Norte de Santander
Lebrija	Santander
Ibagué	Tolima
Leticia	Amazonas
Medellín	Antioquia
Neiva	Huila
Puerto Carreño	Vichada
Riohacha	Guajira
Soledad	Atlántico
Villavicencio	Meta

### **8.6. Contaminación atmosférica**

Las medidas sobre valores de contaminación atmosférica y observaciones complementarias, se disponen para las siguientes estaciones, variables y periodos:

<i>Estaciones</i>	<i>Variables</i>	<i>Periodo</i>
U. El Bosque	PM-10	Agosto-97 a la fecha
Es.de Ingeniería	03	
Min. Ambiente	CO	
Central de mezclas	SO2	
Sony music	NO	
U. Santo Tomás	NO2	
Hospital Olaya	NOX	
Corpas	CH4	
U. Nacional	NMCH	
Cade Energía	BEN	
Carrefour	TO	
Merck	FOR	
Cazucá	VV	
Hilandería-Fontibón	TD20	
	TD8	
	TD2	
	HUM	
	PRES	
	PREC	
	DV	
	AZ	
	EL	
	RADS	

## **9. INVESTIGACIÓN**

### **9.1. Investigación Básica**

El programa de investigación básica promueve los estudios dirigidos a mejorar la comprensión de los procesos atmosféricos, en particular los referentes a radiación, aerosoles, ozono troposférico y estratosférico, así mismo, a comprender la física y la química de la atmósfera y los ciclos de los gases de efecto invernadero y otros constituyentes atmosféricos.

Desarrollar y aplicar técnicas para el seguimiento y la predicción de componentes atmosféricos en diferentes resoluciones de tiempo y espacio.

#### **9.1.1. Radiación**

(pendiente)

#### **9.1.2. Ozono Estratosférico**

El conocimiento de la cantidad y distribución del ozono en la troposfera y estratosfera, así como de sus variaciones temporales, es importante debido a que el ozono juega un papel determinante en los seres vivos y medio ambiente de la Tierra.

En particular el ozono, a través de la absorción y emisión de la radiación solar y terrestre, contribuye significativamente a la estructura de la temperatura y el forzamiento radiativo del sistema estratosfera-tropósfera. La cantidad total de la columna de ozono en la atmósfera es el principal factor determinante de las cantidades de radiación ultravioleta que alcanza la superficie de la Tierra, radiación que puede producir daños biológicos. Igualmente es fundamental por los procesos fotoquímicos que se dan en la troposfera.

El conocimiento de la distribución del ozono también es muy importante para la meteorología operativa, no solo porque contribuye en el balance radiativo del sistema Tierra-Atmósfera, sino también sirven de trazadores del movimiento. Los datos de ozono en la estratosfera y alrededor de la tropopausa son asimilados por los modelos numéricos para ayudar a complementar los movimientos atmosféricos y las características de la región de la tropopausa.

El balance de radiación y por consiguiente la variabilidad climática son muy sensibles a las variaciones de las concentraciones de ozono con la altura, por ello la resolución vertical del ozono es muy importante, especialmente en la alta tropósfera y baja estratosfera, donde sufre variaciones significativas.

Las cantidades de ozono cerca de la tropopausa varían significativamente con la estructura de la atmósfera y además, combinados con la nubosidad y los aerosoles, se usan para pronosticar la radiación ultravioleta que alcanza el suelo.

El ozono también es un parámetro de calidad del aire en la baja troposfera.

## Medidas de satélite disponibles

Las mediciones de ozono a partir de espectrómetros portados por satélites, son usuales hoy en día, además de permitir una visión global de la distribución de la columna de ozono, se obtienen información diaria. Estas mediciones fueron posibles desde finales del año 1978, fecha en la cual entró en operación el satélite Nimbus-7, cuya misión fue observar la Tierra. Este satélite estaba dotado de tres instrumentos para la medida del ozono: el Espectrómetro Cartográfico Total de Ozono (Total Ozone Mapping Spectrometer - TOMS) para la distribución global del ozono total, el Detector de Ramales Infrarrojos Estratosféricos (Limb Infrared Monitor de la Stratosphere - LIMS) y el Medidor de Dispersión Solar Ultravioleta (Solar Backscatter Ultraviolet - SBUV) para la medida de perfiles verticales de ozono. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites, como el Meteor-3, lanzado en 1991 y el Earth Probe en 1996, el cual aun se encuentra en operación. En la tabla, se listan las principales medidas satelitales.

<b>INSTRUMENTOS SATELITALES PARA LA MEDIDA DEL OZONO</b>			
<i>Instrumento</i>	<i>Plataforma</i>	<i>Cobertura latitudinal</i>	<i>Periodo</i>
HALOE	UARS	80°N a 80°S	1991 a la fecha
LIMS	Nimbus-7	84°N a 64°S	1978-1979
MILS	UARS	80°N a 80°S	1991 a la fecha
SAGE I	AEM-2	80°N a 80°S	1979-1981
SAGE II	ERBS	80°N a 80°S	1984 a la fecha
SBUV	Nimbus-7	80°N a 80°S	1978-1987
SBUV/2	NOAA-11 NOAA-9	80°N a 80°S	1988 a la fecha 1985-1990
SME	SME	85°N a 85°S	1982-1986
TOMS	Nimbus-7 Meteor-3	90°N a 90°S	1978-1993 1991 a la fecha
GOES	ERS-2	90°N a 90°S	1995 a la fecha
TOMS	ADEOS	90°N a 90°S	1996 a la fecha
TOMS	Earth Probe	90°N a 90°S	1996 a la fecha

Con la información procedente de instrumentos de satélite TOMS, procesados y archivados por la NASA, ha sido posible la obtención de la información de ozono total para puntos reticulares en Colombia y con métodos de interpolación calcular datos de ozono total para diferentes sitios de Colombia.

## Variabilidad del ozono

El ozono varía en escalas de tiempo y espacio. Grandes áreas de la Tierra sufren fuertes variaciones como parte normal del comportamiento del ozono en la atmósfera, especialmente en las zonas polares, que durante la primavera presenta un fuerte debilitamiento. Tales fluctuaciones se originan, generalmente, por modificaciones en la forma de interacción entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores radiativos forzantes, por lo tanto los estudios de la variabilidad del ozono se refieren a las fluctuaciones observadas durante períodos de tiempo relativamente cortos.

Para fines analíticos, las fluctuaciones pueden ser definidas como cambios en la distribución estadística usual utilizada para describir el estado medio del ozono. Los valores medios pueden experimentar tendencias, saltos bruscos, aumentos o disminuciones en la variabilidad o aún una combinación de tendencias y cambios en la variabilidad. El grado de magnitud de la variabilidad puede describirse por la diferencia presentada entre las estadísticas a largo plazo de un elemento climático y las obtenidas para un período de menor longitud. Se entiende como largo plazo un período suficientemente extenso como para que en él estén incluidas todas las características de los regímenes del ozono, que están en función del tiempo y que pueden presentar variaciones cíclicas en intervalos de tiempo más o menos largos. En la práctica se ha tomado el promedio de 1979-2000.

### **Escalas de la variabilidad**

Las siguientes fluctuaciones temporales son consideradas de gran importancia para el comportamiento y modulación de los procesos atmosféricos:

*Estacional* - A esta fase corresponde la fluctuación de los procesos atmosféricos a escala mensual. La determinación del ciclo anual es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas, así como cantidades altas de radiación solar a lo largo del año. La migración de la Zona de Confluencia Intertropical - ZCIT, es considerada como una de las más importantes fluctuaciones climáticas de la escala estacional.

*Intraestacional* - Este tipo de variabilidad es menos notorio y ha sido de las menos estudiadas en nuestro medio. Existen evidencias que dentro de las estaciones se presentan oscilaciones que determinan las condiciones de tiempo y por lo tanto los niveles de ozono total, durante decenas de días o de uno a dos meses. La mayoría de las veces estas oscilaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días. Ésta ha sido detectada en la actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental y en la precipitación de esta región y de la América Tropical. Esta oscilación se asocia con las ondas de Madden-Julían, descubiertas en 1971 en el campo de la presión tropical.

*Interanual* - A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en el comportamiento atmosférico de año en año. Normalmente percibimos que la cantidad de ozono total en un determinado lugar, no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación, tales como la oscilación Cuasibienal y El Niño - La Niña - Oscilación del Sur, entre otras.

*Interdecadal* - En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Ésta es una de las razones por las cuales este tipo de variabilidad pasa

desapercibida para el común de la gente. No obstante, estas oscilaciones de largo plazo están influyendo notablemente en las actividades de la sociedad en ciclos interdecadales y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables atmosféricas, dentro de esta categoría se puede resaltar el ciclo solar.

El grado de variabilidad climática puede describirse por las diferencias entre las estadísticas a largo plazo de elementos meteorológicos calculados para diferentes períodos, entre ellas, las más comunes son:

*Anomalía:* Desviación del valor de un elemento climático respecto del valor normal. Diferencia entre el valor de un elemento climático en un lugar determinado y el valor medio de dicho elemento promediado por la latitud de ese lugar.

*Anomalía estandarizada(tipificada):* Desviación del valor de un elemento climático respecto del valor normal dividido por la desviación estándar.

*Anomalía normalizadas:* Desviación del valor de un elemento climático respecto al valor mínimo dividido por la diferencia entre el valor máximo y el mínimo (rango).

*Fluctuación climática:* Inconstancia climática consistente en cualquier forma de cambio sistemático, regular o irregular, con excepción de la tendencia y la discontinuidad. Se caracteriza por al menos dos máximos (o dos mínimos) y un mínimo (o un máximo), inclusive los valores medidos al comienzo y al final del registro.

*Oscilación:* Fluctuaciones en la que la variable tiende a cambiar progresiva y suavemente entre máximos y mínimos sucesivos.

*Periodicidad:* Ritmo en el que el intervalo de tiempo entre máximos y mínimos sucesivos es constante durante todo el período de registro.

*Tendencia:* Cambio caracterizado por un aumento (o una disminución) paulatina de los valores medios durante el período de registro; no se limita a un cambio lineal con el tiempo, sino que se caracteriza por un solo máximo y un solo mínimo al comienzo y al final del registro.

### **9.1.2. Lluvia ácida**

La lluvia ácida se refiere a la precipitación en forma de lluvia, nieve o niebla que contiene un exceso de ácidos debido a la contaminación atmosférica. La lluvia ácida también se puede referir a partículas sólidas que son ácidas. La acidez se mide en función del pH en una escala logarítmica de 1,0 a 14,0. Un pH de 1,0 indica alta acidez, mientras que un pH de 14,0 indica alta alcalinidad; un pH de 7,0 indica una solución neutral. La precipitación que cae por una atmósfera "limpia" es normalmente algo ácida, con un pH de aproximadamente 5,6. Sin embargo, la lluvia ácida puede tener valores de pH por debajo de 4,0. La lluvia ácida es importante debido a los efectos potencialmente nocivos que puede tener sobre el agua, vida acuática, vida silvestre y materiales artificiales.

La contaminación causada por el hombre es una de las causas primarias de la lluvia ácida. Los óxidos de azufre y de nitrógeno derivados de la quema de combustibles fósiles se mezclan con el agua en la atmósfera y producen la lluvia ácida.

La investigación estaría orientada a los efectos de la deposición y el transporte de lluvia ácida.

**(pendiente)**

## **9.2. Investigación Aplicada**

En esta área se desarrollan estudios y aplicaciones sobre el comportamiento fisicoquímico de la atmósfera con el propósito de aportar soluciones para mejorar la calidad y la utilización de los recursos atmosféricos, mediante estudios, investigaciones y modelamiento sobre dispersión, transporte, transformación y deposición de constituyentes y contaminantes atmosféricos sobre el suelo en diferentes escalas temporales y espaciales.

### **9.2.1 Modelos para calidad del aire**

Los centros urbanos fueron las primeras localidades donde la pobre calidad del aire se volvió un aspecto importante para la gente. Ejemplos son los bien documentados casos de problemas de calidad del aire en Londres, Tokio y Los Angeles. La calidad del aire está típicamente evaluada basándose en la degradación de visibilidad así como en algunas mediciones directas e indirectas. El smog fotoquímico y su componente representativo el ozono se volvieron importantes en los años 70, y desde entonces se ha estado modelando el proceso no-lineal para la formación del ozono. Esto ha dado origen al control de emisiones de sus precursores. Otros aspectos importantes de la fotoquímica del smog son la física de la atmósfera, las corrientes atmosféricas locales y regionales, las partículas suspendidas y las fracciones de tamaño relevantes. Los avances se han logrado a través de la observación, medición, análisis de series de tiempo, experimentos en cámaras fotoquímicas, la modelación y la simulación.

La evolución de los modelos de formación de ozono/smog ha dependido en la capacidad de cómputo, la hidrodinámica, la meteorología, y el desarrollo de modelos fotoquímicos, así como de la adquisición y estimación de datos. Diez grandes estudios acerca de la dinámica del ozono han producido las siguientes conclusiones:

- Los problemas de ozono son regionales.
- Los vientos de la parte alta de la atmósfera juegan un papel importante.
- Las fuentes biogénicas y los emisores de COV's son importantes.
- Hay grandes incertidumbres en los inventarios de emisiones.
- Condiciones de recirculación en la atmósfera son una causa de altas concentraciones.
- La razón COV's/NOx es muy variable y complica las metodologías de control.

Hay básicamente dos tipos de estudios que han sido aplicados al problema de ozono/smog:

- 1- cuando el estudio es de relevancia política, responde a preguntas específicas, y produce artículos científicos; y
- 2- los apoyados por legisladores para toma de decisiones y obtención de datos, que son de períodos cortos y utilizan poca información que es ampliamente accesible.

La modelación de la calidad del aire es útil para desarrollar y ejecutar soluciones políticamente aceptables, para comunicar resultados de planes, para evaluar medidas de control, para estimar exposición y riesgo en los humanos, y para predecir calidad del aire. En la gestión de calidad del aire un sistema de modelación es utilizado para evaluar planes de acción.

Los componentes de un estudio para gestión de la calidad del aire y los requerimientos para un modelo de calidad del aire requieren de un modelo químico y uno meteorológico acoplados, capacidad de anidamiento y la incorporación de un componente predictivo. Un modelo de este tipo puede estar basado en el Modelo MM5, que se encuentra en operación en el IDEAM. El MM5 está diseñado para simular la circulación atmosférica sobre terrenos complejos y procesos en pequeña escala. Este modelo puede ser acoplado a un modelo químico y de transporte así como las emisiones biogénicas y la fotoquímica, de manera que este conjunto de modelos que permita la descripción avanzada de modelos dinámicos, considerando la química de la fase gaseosa con énfasis en los COV's biogénicos. En conclusión, los componentes del modelo permitirán hacer una descripción de las emisiones, transformaciones físicas y químicas y deposición de las sustancias transportadas por los sistemas meteorológicos a escalas local y regional.

El Sistema de Modelado para Contaminación de tercera generación (Models-3) suministrado por la EPA, tiene las características descritas. Este modelo está diseñado para la simulación de la calidad del aire, desde la escala urbana hasta la regional, para el ozono troposférico, la deposición ácida, visibilidad y particulado fino. Sistemas similares pueden ser desarrollados con The Multiscale Air Quality Simulation Platform (MAQSIP) suministrado por MCNC-USA, el SARMAP Air Quality Model de California Air Resources Board, el HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) de la NOAA.

### **9.2.2 Modelo de Dispersión de Contaminantes por Fuentes Móviles**

El modelo implementado es un modelo tipo gaussiano estacionario que requiere de información de entrada: el estado físico de la atmósfera en la Capa Límite Planetaria y especialmente en la Capa Superficial y la emisión promedio horaria que se emite en cada una de las distintas vías de Bogotá.

El estado físico de la atmósfera se obtiene a través de un modelo micro – meteorológico, el cual requiere como datos horarios de entrada la:

- Nubosidad en octas de cobertura nubosa
- Temperatura del aire
- Dirección y Velocidad del viento

Como resultados de salida, el modelo suministra una estimación de la Altura de Capa de Mezcla y de la Capa superficial a partir de tres aspectos básicos: el balance energético superficial, el cual a su vez es determinado por la radiación global, la radiación neta, el flujo de calor sensible, el flujo de calor latente y el flujo de calor en el suelo; los parámetros turbulentos como la longitud de Monin – Obukhov, la temperatura de escala y la velocidad de fricción para estimar la capa superficial; y los cuales en un futuro, se convertirán en información fundamental para la implementación de modelos de dispersión de mayor complejidad como tipo lagrangiano y euleriano; y la estabilidad de Pasquill – Guifford, la cual es una medida de estabilidad en modelos de ingeniería y que es un resultado característico y no cuantitativo de la estabilidad de la atmósfera basado en las medidas de velocidad el viento, la radiación neta y radiación global.

En la actualidad, para estimar las emisiones, se están utilizándolas relaciones matemáticas de la Agencia Europea Ambiental (EEA); sin embargo, para estas estimaciones, se podrían explorar otras metodologías tales como las utilizadas en la EPA con modelos como el MOBILE y explorar el estado de avance del tema en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

Para estimar las emisiones, el modelo de la EEA y denominado COPERT II, requiere de la siguiente información de entrada:

- Promedio de vehículos en las vías discriminados por tipo de vehículo, es decir, en automóviles, buses, camiones a gasolina y vehículos diesel.
- Promedio de velocidad de los distintos tipo de vehículos
- Sin embargo, igualmente podría mejorarse el modelo incluyendo edad de los vehículos e introduciendo otros tipos de automotores.

Una vez obtenido los resultados tanto del modelo micro – meteorológico como del modelo de emisiones; sus resultados serán los datos de entrada para el modelo de dispersión desarrollado por el IDEAM, que básicamente consta de las siguientes variables:

- Dirección y velocidad del viento
- Temperatura del aire
- Altura de capa de mezcla
- Estabilidad de Pasquill – Guifford
- Georreferenciación de las vías
- Número de carriles en cada vía
- Ancho de carril de cada vía
- Altura de emisión
- Emisiones estimadas



Y que como resultado, suministra la concentración espacial de gases contaminantes sobre las diferentes avenidas de la ciudad.

## 10. APLICACIONES

### 10.1. Calidad del aire

Calidad del aire se define como el aire respirable al nivel de la tropósfera, sin contaminación.

La norma nacional de calidad del aire, o nivel de inmisión, es establecida para todo el territorio, en condiciones de referencia, por el Ministerio del Medio Ambiente. La norma local de calidad del aire, o nivel local de inmisión, podrá ser más restrictiva que la norma nacional y será fijada por las autoridades ambientales competentes, teniendo en cuenta la variación local de presión y temperatura, respecto de las condiciones de referencia de la norma nacional. Las condiciones de fondo que afecten la calidad del aire en un determinado lugar, tales como las meteorológicas y las topográficas, serán tenidas en cuenta cuando se fijen normas locales de calidad del aire.

La norma de calidad del aire, o nivel de inmisión, será fijada para períodos de exposición anual, diario y horario.

La norma de calidad anual, o nivel de inmisión anual, se expresará tomando como base el promedio aritmético diario en un año de concentración de gases, y el promedio geométrico diario en un año de concentración de partículas totales en suspensión. La norma de calidad diaria, o nivel de inmisión diario, se expresará tomando como base el valor de concentración de gases y partículas en 24 horas. La norma de calidad horaria, o nivel de inmisión por hora, se expresará con base en el valor de concentración de gases en una hora.

Se considerará Nivel Normal de concentración de contaminantes en un lugar dado, el grado de concentración de contaminantes que no exceda los máximos establecidos para el Nivel de Inmisión o Norma de calidad del aire. El Nivel Normal será variable según las condiciones de referencia del lugar.

El Nivel Normal será el grado deseable de calidad atmosférica y se tendrá como nivel de referencia para la adopción de medidas de reducción, corrección o mitigación de los impactos ambientales ocasionados por los fenómenos de contaminación atmosférica.

En la actualidad, la legislación vigente a nivel nacional relacionada con Normas de Calidad del Aire se halla en el Decreto 948 de 1995 y el 002 de 1982. Especialmente este último es el que contiene los valores de concentración máxima permisible de los principales contaminantes en la atmósfera y cuyos valores se relacionan en la siguiente tabla. En esta tabla también se relacionan las normas de otras entidades como la EPA, la WHO y las del Reino Unido.

Normas de Calidad del Aire

CONTAMINANTE	PERIODO	NORMA	UNIDAD	FUENTE	COMENTARIOS
--------------	---------	-------	--------	--------	-------------

<i>Normas principales</i>					
PARTÍCULAS, MP-10	ANUAL	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	24 HORAS	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Dec.02.82	Promedio geométrico, pero para todo el rango de tamaño de partículas
		150 50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA UK	Concentración promedia horaria en 24 horas
PARTÍCULAS, MP-2.5	ANUAL	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	24 HORAS	65	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	Concentración promedia horaria en 24 horas
OXIDOS DE AZUFRE, $\text{SO}_x$ Como Dióxido de azufre	ANUAL	38	ppb	Dec.02.82	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
		100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Dec.02.82	
		30	ppb	EPA	Concentración promedia horaria en 24 horas
		80	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	
	24 HORAS	153	ppb	Dec.02.82	Concentración promedia horaria en 3 horas
		400	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Dec.02.82	
140		ppb	EPA		
3 HORAS	365	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	Concentración promedia horaria en 15 minutos	
	574	ppb	Dec.02.82		
	1500	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Dec.02.82		
	500	ppb	EPA		
15 MINUTOS	1300	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA		
	100	ppb	UK		
OXIDOS DE NITROGENO, $\text{NO}_x$ Como dióxido de nitrógeno	ANUAL	53	ppb	Dec.02.82	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
		21	ppb	UK	
		53	ppb	EPA	Concentración promedia horaria
		100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	
	1 HORA	107	ppb	WHO	
150		ppb	UK		
MONOXIDO DE CARBONO, $\text{CO}$	8 HORAS	13	ppm	Dec.02.82	Concentración promedia horaria en 8 horas
		10	ppm	UK	
		9	ppm	EPA	Concentración promedia horaria
		10	$\text{mg}/\text{m}^3$	EPA	
	1 HORA	44	ppm	Dec.02.82	
		35	ppm	EPA	
40		$\text{mg}/\text{m}^3$	EPA		
OXIDANTES FOTOQUIMICOS, $\text{O}_3$	1 HORA	87	ppb	Dec.02.82	Concentración promedia horaria
		120	ppb	EPA	
		235	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	
	8 HORAS	61	ppb	WHO	Concentración promedia en 8 horas
		50	ppb	UK	
		80	ppb	EPA	
<i>Otros Contaminantes</i>					
Benceno	ANUAL	5	ppb	UK	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
1,3-Butadieno	ANUAL	1	ppb	UK	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
Plomo	ANUAL	0,5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	UK	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	Trimestre	1,5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	EPA	Promedio trimestral

EPA: Environmental Protection Agency, USA. Fuente: [www.epa.gov/airs/criteria.html](http://www.epa.gov/airs/criteria.html)

Dec.02-82: Normas de Colombia sobre emisiones atmosféricas.

WHO: World Health Organization.

UK: Normas de calidad del aire adoptadas por el Reino Unido en Julio de 1997.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ : microgramos de contaminante por metro cúbico de aire, ppb: partes por billón en volumen, ppm: partes por millón en volumen.

Rangos de Calidad del Aire en el Reino Unido	Norma		Información		Alerta	
	Bajo	moderado			Alto	Muy alto
Contaminante Dióxido de azufre (ppb, promedios en 15 minutos)	Menor que 100	100 - 199			200 a 399	400 o más
Ozono (ppb)	Menor que 50 ppb promedio en 8 horas)	50 - 89 promedio horario			90 -179 promedio horario	180 o más promedio horario
Monóxido de Carbono (ppb, promedio horario en 8 horas)	Menor de 10	10 -14			15 - 19	20 o más
Dióxido de nitrógeno (ppb, promedio horario)	Menor de 150	150 - 299			300 - 399	400 o más
Partículas Finas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedia horaria en 24 horas)	Menor de 50	50 - 74			75 - 99	100 o más

Estas normas de calidad de aire de los principales contaminantes atmosféricos se constituyen en los indicadores cuantitativos que permiten, por una parte, el diseño de los procesos y/o equipos de abatimiento, la posterior fiscalización, y por otra parte, la determinación de niveles de calidad de aire en áreas geográficas específicas.

El programa de calidad del aire comprende las actividades relacionadas con la protección y mejoramiento de la calidad del aire y para ello requiere:

- Revisión y preparación de los criterios de salud ambiental y el establecimiento de normas de calidad del aire.
- Revisión e institución de normas para la emisión de contaminantes de fuentes específicas.
- Implementación y operación de sistemas de control.
- Medición de la calidad del aire y estimación de las condiciones futuras. La medición se lleva a cabo mediante el monitoreo atmosférico y las estimaciones a través del cálculo de la proyección del crecimiento de la población, industria, transporte, economía y modelos de dispersión.
- Estimación de los niveles existentes de emisión de las fuentes fijas y móviles, y proyección de los futuros niveles de emisión. Se basa en los inventarios de emisiones de fuentes puntuales y regionales.
- Determinación del grado de mejoría requerido para cumplir con las normas de calidad del aire. Se compara el nivel actual y futuro de la calidad del aire; la reducción necesaria para cumplir con las normas se estima mediante modelos.
- Desarrollo de planes de contingencia para episodios atmosféricos. Las condiciones meteorológicas adversas pueden provocar situaciones que requieren programas de urgencia.
- Desarrollo de planes a largo plazo para mantener la calidad del aire después de haber cumplido las normas de calidad del aire. Se considera el crecimiento demográfico e industrial, el cálculo de emisiones esperadas, el desarrollo de procedimientos para instalar emisiones autorizadas que satisfagan las demandas futuras y para continuar el cumplimiento de las normas de calidad del aire.

- Ejecución de programas para evitar el deterioro significativo de la calidad del aire. Se refiere principalmente a regiones en donde el aire es más limpio de lo establecido en las normas nacionales y a regiones prioritarias en donde la población y el desarrollo industrial son inexistentes o mínimos.

## **10.2 Contaminación atmosférica**

El modelamiento de la dispersión de contaminantes es una técnica para calcular concentraciones de contaminantes (análisis de calidad del aire) resultantes de las fuentes emisoras que descargan emisiones tales como gases o partículas a la atmósfera. Los modelos pueden simular situaciones simples como una única fuente puntual, con un solo receptor y condiciones constantes, hasta situaciones complejas de varias fuentes, con varios receptores y variaciones de las condiciones atmosféricas, así como otras condiciones particulares.

Aunque son muchos los usos de los modelos de dispersión, se destacan la aplicación para:

- Determinar áreas de influencia de fuentes contaminantes.
- Determinar el impacto en la calidad del aire de obras civiles actuales o de futura construcción (vías, parqueaderos, viaductos, etc.), impacto por fuentes industriales, fabricas, etc., sobre un área determinada.
- Implementar programas regulatorios locales contra la contaminación, leyes o reglas gubernamentales.
- Evaluar el estado de polución del aire urbano o rural.
- Predecir concentraciones de contaminación de aire en un tiempo futuro en vías y otro tipo de obra civil que incluya tránsito de vehículos, ofreciendo la ventaja de poder estimar futuros factores de emisión en obras que aun no se construyen y que podrían servir como guía de modificaciones en los diseños para evitar un alto impacto negativo en la calidad del aire de la zona. Este mismo uso anterior es aplicado a zonas industriales y fabricas actuales o futuras.
- Análisis de los efectos de descargas o escapes accidentales de gases tóxicos.
- Evaluar los sectores productivos en cuanto a su participación en el deterioro de la calidad del aire y la posterior implementación de medidas de mitigación.

## **11. SERVICIO DE INFORMACIÓN**

### **11.1 Calidad del aire**

- Normas de calidad del aire para proteger la salud publica, teniendo en cuenta poblaciones sensibles de salud, como los niños, los ancianos, los asmáticos, etc.
- Normas de calidad del aire para proteger el bienestar publico, para evitar daños en los animales, cosechas, vegetacion y edificios.
- Normas nacionales para la emisión de contaminantes peligrosos del aire.
- Monitoreo y diagnósticos de calidad del aire
- Informes, avisos y alertas de calidad del aire
- Educación ambiental.

## **ANEXO A**

Micrometre at STP    1  $\mu\text{m}$  at STP    = 0.1 DU  
=  $2.687 \cdot 10^{19}$  molecules  $\text{m}^{-2}$   
=  $2.687 \cdot 10^{15}$  molecules  $\text{cm}^{-2}$   
= 1 part per million metre (= 1.0 ppmm at STP)

Dobson unit            1 DU                    = 1 milliatmosphere centimetre (matm cm)  
=  $10^{-5}$  m of ozone at STP

**TABLE 16.A.1**  
**Quantities specifying local ozone, units of the International System, and vertical integration**

Quantity by	Density			Concentration relative to local air [mixing ratio]		Partial pressure
	Number density	Density	Relative to STP [differentiated total]	By mass	By volume	
	$\text{m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-3}$	/[STP]	/	/	Pa
	$n$	$\rho$	$x$	$m$	$v$	$P$
Number density	$///$	$\frac{\rho^0 M}{L}$	$\frac{n \cdot L}{n \cdot L}$	$\frac{M \cdot T^*}{L \cdot P^*}$	$\frac{n \cdot T^*}{L \cdot P^*}$	$\frac{p^0}{n \cdot L} \cdot T^*$
Density	$\frac{L}{\rho \cdot M}$	$///$	$\frac{1}{\rho \cdot M}$	$\frac{1 \cdot T^*}{\rho \cdot P^*}$	$\frac{1 \cdot T^*}{\rho \cdot M \cdot P^*}$	$\frac{p^0}{\rho \cdot M} \cdot T^*$
Density relative to STP	$x \cdot L$	$x \cdot \rho^0 M$	$///$	$\frac{T^*}{x \cdot M \cdot P^*}$	$\frac{T^*}{x \cdot P^*}$	$x \cdot p^0 \cdot T^*$
Mixing ratio by mass	$\frac{L \cdot P}{m \cdot M \cdot T^*}$	$\frac{P^*}{m \cdot \rho^0 \cdot T^*}$	$\frac{1 \cdot P^*}{m \cdot M \cdot T^*}$	$///$	$\frac{1}{m \cdot M}$	$\frac{p^0}{m \cdot M} \cdot P^*$
Mixing ratio by volume	$\frac{P^*}{v \cdot L \cdot T^*}$	$\frac{P^*}{v \cdot \rho^0 M \cdot T^*}$	$\frac{P^*}{v \cdot T^*}$	$v \cdot M$	$///$	$v \cdot p^0 \cdot P^*$
Partial pressure	$\frac{L \cdot 1}{p \cdot P^0 \cdot T^*}$	$\frac{\rho^0 M \cdot 1}{p \cdot \rho^0 \cdot T^*}$	$\frac{1 \cdot 1}{p \cdot P^0 \cdot T^*}$	$\frac{M \cdot 1}{p \cdot P^0 \cdot P^*}$	$\frac{1 \cdot 1}{p \cdot P^0 \cdot P^*}$	$///$
Typical concentration at 25 km	$4.97 \cdot 10^{18}$	$3.96 \cdot 10^{-7}$	$1.85 \cdot 10^{-7}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$6.03 \cdot 10^{-6}$	$1.51 \cdot 10^{-2}$
Vertical integration ( $z$ in metres)	$\int n \cdot dz = L \cdot x$	$\int \rho \cdot dz = \rho^0 M \cdot x$	$\int x \cdot dz = x$	$\int m \cdot dP = -Mg \cdot x$	$\int v \cdot dP = -g \cdot x$	$\int p \cdot d(\ln P) = -g \cdot x$

$P^* = P/P^0, T^* = T/T^0$       Normalized local temperature and pressure

$P^0, T^0$       Standard pressure and temperature (STP)      1.013 25 · 10<sup>5</sup> Pa, 273.15 K  
 $\rho^0$       Density of air at STP      1.293 kg m<sup>-3</sup>  
 $L$       Loschmidt number      2.687 · 10<sup>25</sup> m<sup>-3</sup>  
 $g$       Gravity acceleration      9.807 m s<sup>-2</sup>  
 $M$       Molecular ratio: ozone/air      1.657  
 $x$       Total ozone      unit m [at STP]  
 $P, T$       Local air pressure, temperature      units Pa, K

Fuente: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation - OMM

TABLE 16.A.2  
Commonly used units for local ozone and their conversion

Unit	Density			Mixing ratios		Pressure (hPa)
	( $10^{11}$ mol cm $^{-3}$ )	( $\mu$ g m $^{-3}$ )	(DU km $^{-1}$ )	( $\mu$ g g $^{-1}$ )	(ppmv)	
10 $^{11}$ mol cm $^{-3}$ [10 $^{17}$ mol m $^{-3}$ ]	—	7.97	0.371	0.022 9 $\frac{T}{P}$	0.013 8 $\frac{T}{P}$	0.013 8 T
1 $\mu$ g m $^{-3}$ [10 $^{-9}$ kg m $^{-3}$ ]	0.125	—	0.046 7	0.002 87 $\frac{T}{P}$	0.001 73 $\frac{T}{P}$	0.001 73 T
1 DU km $^{-1}$	2.69	21.4	—	0.061 4 $\frac{T}{P}$	0.037 0 $\frac{T}{P}$	0.037 0 T
1 $\mu$ g g $^{-1}$ [10 $^{-6}$ by mass]	43.7 $\frac{P}{T}$	348 $\frac{P}{T}$	16.3 $\frac{P}{T}$	—	0.603	0.603 P
1 ppmv [10 $^{-6}$ by volume]	72.4 $\frac{P}{T}$	578 $\frac{P}{T}$	27.0 $\frac{P}{T}$	1.657	—	P
1 hPa [10 $^{-4}$ Pa]	72.4 $\frac{1}{T}$	578 $\frac{1}{T}$	27.0 $\frac{1}{T}$	1.657 $\frac{1}{T}$	$\frac{1}{P}$	—

NOTE:

Pressure (*P*) in hectopascal.

Temperature (*T*) in kelvin.

Numbers in square brackets give the equivalent value in units of the International System.

Fuente: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation - OMM

## ANEXO B

### RED DE CALIDAD DEL AIRE DEL DAMA

Respecto al seguimiento de la calidad del aire las estaciones de monitoreo tienen dos tipos de equipos denominados genéricamente como:

- Analizador DASIBI
- Sensores OPSIS

Algunas estaciones también cuentan con equipos meteorológicos (ver figura No. 2) que miden la velocidad y dirección del viento, temperaturas a tres niveles (2, 8 y 20 metros), presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar incidente.



Figura No. 2 Estación de monitoreo de la calidad del aire - Universidad El Bosque

#### 1.1 Analizador DASIBI

Elaborados por Dasibi Environmental Corp. La cual es una empresa Norteamericana dedicada a la fabricación y diseño de equipos basados fundamentalmente en sistemas de monitoreo continuo ambiental y analizadores individuales de gases.

La principal característica es la versatilidad y modularidad permitiendo utilizar el mismo equipo ya sea como parte de un sistema o como un analizador individual.





**Figura No. 3 Rack de analizadores sistema DASIBI - Universidad El Bosque**

En general utilizan métodos estándar aprobados bajo normas EPA, tales como: absorciometría (en ultravioleta e infrarrojo), luminiscencia química, fluorescencia ultravioleta (UVF), correlación de filtros NDIR (instrumentos infrarrojos no dispersivos) y la gravimetría.



**Figura No. 4 Rack de analizadores sistema DASIBI - Universidad Santo Tomas**

En la Tabla No. 3 se presentan los diferentes gases que son analizados por este equipo y la técnica respectiva utilizada.

**Tabla No. 3. Gases analizados y contemplados en las Normas**

<b>Equipo analizador</b>	<b>Técnica</b>	<b>Fabricación</b>
Ozono	Absorción UV	DASIBI
Monóxido de carbono	Absorción IR - filtros NDIR	DASIBI
Dióxido de azufre	Método colorimétrico	DASIBI
Oxidos de nitrógeno	Luminiscencia química	DASIBI
PM-10,	Gravimetría	Rupprecht and Patashnick

Como puede verse este equipo analiza todos los gases que están contemplados en la Norma Colombiana como son: PM-10, ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno (NO, NOx, NO<sub>2</sub>) y además metano y compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano como puede verse en la Tabla No. 4.

## 1.2 Analizador DOAS

Son elaborados por OPSIS AB, la cual es una empresa dedicada a la fabricación y diseño de equipos e instrumentos para monitoreo ambiental basados en la tecnología DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy).

Su permanencia y afianzamiento en el mercado data desde el año 1986 y el objetivo es proveer a los usuarios un medio de alta precisión para las determinaciones de concentraciones de gases en áreas urbanas y rurales, aeropuertos e industrias.



**Figura No. 5 Sensor OPSIS - Estación Hospital Olaya**

Los equipos que se encuentran funcionando en la ciudad de Bogotá se basan en el método de absorción óptica diferencial según los principios de Beer-Lambert y aprobados bajo normas EPA. Estos equipos miden específicamente, ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y además benceno, tolueno y formaldehído como puede verse en la Tabla No. 4.

Esta clase de equipo se encuentran únicamente en la estación del Ministerio del Medio Ambiente y en la del Hospital Olaya.

Tabla No. 4. Estaciones y sensores de la red de calidad del aire

	No.1 Univers . El bosque	No.2 MMA	No.3 Sony music	No.4 Olaya	No.5 Univ. Nació n.	No.6 Carrefo ur	No.7 Cazuc á	No.8 Escu. Ingen.	No.9 Centr almecz clas	No.10 U. Sto. Tomá s	No.11 corpas	No.12 CADE energí a	No.13 merck	No.14 Hilan d. Fontib .
1	PM-10	PM-10	PM-10	PM-10		PM-10	PM-10			PM-10	PM-10	PM-10	PM-10	PM-10
2								wsx	wsx					
3		<del>O<sub>3</sub></del>	O <sub>3</sub>	<del>O<sub>3</sub></del>	O <sub>3</sub>		O <sub>3</sub>	wsy	wsy				O <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>
4		CO	CO	CO			CO	wsz	wsz		CO		CO	CO
5	SO <sub>2</sub>	<del>SO<sub>2</sub></del>	SO <sub>2</sub>	<del>SO<sub>2</sub></del>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>			SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
6	NO		NO		NO	NO	NO			NO	NO	NO	NO	NO
7	NO <sub>2</sub>	<del>NO<sub>2</sub></del>	NO <sub>2</sub>	<del>NO<sub>2</sub></del>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>			NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
8	NOX		NOX		NOX	NOX	NOX			NOX	NOX	NOX	NOX	NOX
9		CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>											
10		NMCH	NMCH											
11	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV	VV
12						TEMP		TD20	TD20		TEMP		TEMP	TEMP
13								TD8	TD8					
14								TD2	TD2					
15								HUM	HUM					
16								PRES	PRES					
17	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PREC	PRE	PREC	PREC	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI	PRECI
18	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
19								AZ	AZ					
20		<del>BEN</del>		<del>BEN</del>				EL	EL					
21		<del>TO</del>		<del>TO</del>				RADS	RADS					
22		<del>FOR</del>		<del>FOR</del>										

PM-10

CH<sub>4</sub>, NMCH<sub>4</sub>

BEN, TO, FOR

VV, DV

T, TD20, TD8, TD2

RAS

Nota: Las casillas sombreadas son los gases que analiza el sensor OPSIS

Analizador de partículas

Analizador de metano y compuestos diferentes al metano

Analizador de benceno, tolueno y formaldehído

Velocidad y dirección del viento

Temperatura y temperatura a tres niveles

Radiación solar incidente



Figura No. 6 Gas de calibración y analizador OPSIS - Estación Hospital Olaya

### 1.3 Estaciones meteorológicas

Entre las estaciones que se relacionaron anteriormente hay dos que son meramente meteorológicas (Ver Tabla No. 4), las cuales se encuentra en la Escuela de Ingeniería y en la Central de Mezclas y como se menciono anteriormente miden únicamente la velocidad y dirección del viento, temperaturas a tres niveles (2, 8 y 20 metros), presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar incidente (Ver figura 7).



**Figura No. 7. Estación Meteorológica - Estación Esc. Colombiana de Ingeniería**

Para la medición de la dirección del viento se emplean veletas tal como puede apreciarse en al figura No. 5. Igualmente puede apreciarse que para la medición de la velocidad del viento se emplean anemómetros rotatorios de cazoletas.

En la medición de la temperatura se emplean termómetros ubicados a diferentes alturas. La presión atmosférica se mide con barómetros y la humedad relativa con un psicrómetro. Finalmente, la radiación solar incidente es medida con un pirheliómetro



**Figura No. 8. Estación Meteorológica - gabinete analizador- Estación Esc. Col. de Ingeniería**

## **1.4. Métodos de Medición**

En esta sección se presentan los diferentes principios utilizados por los equipos de medición de Calidad del aire del DAMA, iniciando por una descripción de las técnicas utilizadas en el equipo DASIBI para posteriormente hablar del principio de Beer - Lambert empleado en el equipo DOAS. Lo anterior, son técnicas relacionadas con concentraciones de la calidad del aire.

### **1.4.1 Técnicas empleadas en el equipo DASIBI**

Como se comentó anteriormente (ver Tabla No.3) las técnicas empleadas en los diferentes módulos muestrales para la cuantificación de las concentraciones de los principales gases son: la fluorescencia Ultravioleta UV (para el SO<sub>2</sub>), la absorción Ultravioleta UV (para el O<sub>3</sub>), luminiscencia química (para el NO<sub>2</sub>), instrumentos infrarrojos no dispersivos NDIR- absorción infrarroja (para el CO) y la gravimetría (para el material particulado).

#### **1.4.1.1 Instrumentos infrarrojos no dispersivos NDIR (para el CO y el O<sub>3</sub>)**

Se pueden utilizar fenómenos físicos en lugar de características químicas para inferir la concentración de contaminantes gaseosos del aire. Un ejemplo, es el dispositivo infrarrojo no dispersivo utilizado para medir los gases que absorben las radiaciones infrarrojas de gases como el monóxido de carbono. En este dispositivo se utilizan como autodetectoras las especies por medir. El método de medición se basa en el principio de la absorción selectiva. Una determinada longitud de onda de energía infrarroja, específica a un gas dado, será absorbida por dicho gas, mientras que se transmitirán otras longitudes de onda. La banda de absorción del CO se halla entre 4,5 y 5  $\mu\text{m}$ .

El detector consiste de dos cámaras inferiores como se muestra en la figura No. 9 que tienen volúmenes iguales y que están separadas por un diafragma metálico flexible y un botón metálico estacionario. El botón y el diafragma metálicos forman un capacitor. Las dos cámaras contienen cantidades iguales del gas que interesa medir. Dos fuentes infrarrojas idénticas dirigen la radiación a través de las dos celdas ubicadas en el centro. Una de las celdas está llena de un gas inerte, por lo general nitrógeno. En la otra celda, llamada celda de muestra, fluye el gas que se quiere analizar. Cuando está presente la especie gaseosa que interesa, absorbe la radiación infrarroja en una cantidad directamente proporcional a su concentración molecular en la muestra. No ocurre ninguna absorción infrarroja en la celda de referencia. Después de pasar por las celdas, el monóxido absorbe radiación en las cámaras inferiores. Esta absorción de la energía radiante hace que el gas que está en la cámara de referencia se caliente a una temperatura más alta que la del gas que está en la cámara de muestra. Como las dos cámaras detectoras están selladas, la presión aumentará más en la cámara de referencia y el diafragma flexionará. La desviación resultante es directamente proporcional a la concentración de la especie que interesa.

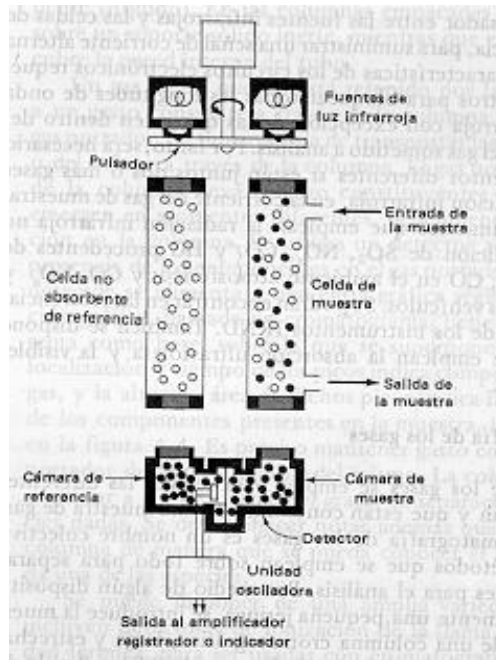


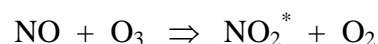
Figura No. 9. Dispositivo infrarrojo no dispersivo

Se emplean filtros para bloquear todas las longitudes de onda de la radiación infrarroja con excepción de las que estén dentro del rango de absorción del gas sometido al análisis. Se dispone de instrumentos que emplean la radiación infrarroja no dispersiva en la medición de: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e hidrocarburos de fuentes estacionarias; CO como concentración atmosférica; y CO, NO<sub>x</sub> y HC en el escape de los vehículos.

El uso de los filtros, arriba mencionados, hace que esta técnica sea conocida en los equipos de muestreo del DAMA para el CO como correlación de filtros NDIR. Esta técnica es utilizada igualmente para la determinación de la concentración de el ozono pero empleando la absorción selectiva de la radiación ultravioleta.

#### 1.4.1.2 Método de quimiluminiscencia (para el NO<sub>2</sub>)

Los analizadores de luminiscencia química se emplean para medir las cantidades de los óxidos de nitrógeno u oxidantes, medidos como ozono. Cuando el NO reacciona con el ozono, se produce una cierta cantidad de especies excitadas de NO<sub>2</sub>, las que luego pasan al estado básico por la emisión de energía de radiación. La energía radiante es medida por un tubo fotomultiplicador cuya salida eléctrica es amplificada y alimentada a dispositivos adecuados de lectura directa. Las reacciones químicas son:

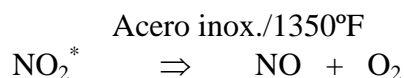


Luego:



El tubo fotomultiplicador recibe la radiación ultravioleta. La intensidad de la radiación es proporcional a la cantidad original de NO que está presente en la muestra del gas.

Cuando el NO<sub>2</sub>, así como el NO, está presente en la muestra de gas, éste se hace pasar por un tubo caliente de acero inoxidable, antes de introducirlo en la cámara de reacción quimiluminiscente. La reacción química es:



Por tanto, cuando la muestra de gas contiene tanto NO como NO<sub>2</sub>, es necesario un proceso de dos etapas. Primero se hace pasar el gas por el convertidor de acero inoxidable y luego se le hace reaccionar con el ozono en la cámara quimiluminiscente a fin de obtener el valor de NO. En segundo lugar, se pasa el gas sin modificarlo para obtener nuevamente el valor de NO. La cantidad de NO<sub>2</sub> en la muestra de gas se determina luego por diferencia obteniendo su cantidad como NO.

#### **1.4.1.3 Método colorimétrico (para el SO<sub>2</sub>)**

Los equipos de muestreo que utilizan esta técnica para la medición de concentraciones de gases en el aire operan bajo el siguiente principio: solución en un medio acuoso del gas que se ha de determinar; reacción con un reactivo que forma un color; y medición del color formado por medios fotoeléctricos. Dichos analizadores se utilizan para medir las concentraciones atmosféricas de SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y oxidantes totales; emisiones de NO<sub>x</sub> de fuentes estacionarias; y emisiones de CO de vehículos. En estos instrumentos es posible que sus mediciones se afecten por sustancias interferentes que se encuentran en el aire contaminado.

El procedimiento recomendado para la medición del SO<sub>2</sub> es la técnica de West-Gaeke y se llama genéricamente como el método colorimétrico de la pararrosalina o fluorescencia UV. La prueba implica la absorción del dióxido de azufre en una solución diluida de tetracloromercurato a fin de formar el ión de diclorosulfitomercurato. Una reacción de este ion y pararrosanilina decorada lleva a la formación del ácido metilsulfónico de la pararrosanilina de color rojo púrpura. La intensidad del color, medida a 0,56 μm, es proporcional a la concentración de SO<sub>2</sub>. La técnica es aplicable al rango de concentración entre 0,002 y 5 ppm. Este método es específico para el SO<sub>2</sub> y las sales de sulfitos. Sin embargo, la presencia del dióxido de nitrógeno y el ozono puede reducir el valor verdadero de la lectura.

#### **1.4.1.4 Método gravimétrico (para el material particulado)**

La mayor parte de los dispositivos empleados en el muestreo del material particulado son meramente colectores. El análisis de partículas (ejemplo: el diámetro) y la determinación de su cantidad se deberán de efectuar por separado.

Los mecanismos básicos empleados en la colección de estas partículas son del mismo tipo que los usados en grandes dispositivos de control de partículas. Quizá el filtro constituye el colector de usos más generalizado. El método es barato y simple pero es afectado por la dirección del viento.

El filtro que se utiliza con mayor frecuencia es el que hace pasar partículas con tamaños inferiores a las 10 micras y cuya cantidad se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo anterior, debido a que las partículas por debajo de este tamaño pueden afectar la salud humana al ingresar al tracto respiratorio. Los daños a los órganos respiratorios pueden presentarse directamente, ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas entre 0,01 y 0,1  $\mu\text{m}$  que penetran a las cavidades pulmonares se depositarán allí.

En general, las partículas arrastradas por el aire varían su tamaño desde 0,001 a 500  $\mu\text{m}$ , con la mayor parte de las partículas presentes en la atmósfera entre 0,1 a 10  $\mu\text{m}$ .

Por estas dos razones, afectación a la salud y gran participación, la cuantificación del tamaño de las partículas se realiza para aquellas que pasen el filtro equivalente a un tamaño de 10 $\mu\text{m}$ .

Las partículas con un tamaño menor a 0,1  $\mu\text{m}$  tienen comportamientos similares al de las moléculas y están caracterizados por grandes movimientos aleatorios causados por colisiones con las moléculas de gas. Las partículas entre 1 y 20  $\mu\text{m}$ , tienden a seguir el movimiento del gas por el que son llevadas. Las partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$  poseen velocidades de asentamiento significativas.

#### **1.4.2 Técnica empleada en el equipo DOAS**

La técnica empleada en este equipo se enmarca dentro de los métodos cuantitativos colorimétricos. Como se comentó en la sección 4.1.3, se debe formar un compuesto con color característico y en cantidades directamente proporcionales a la concentración de la sustancia a ser medida. Las soluciones del complejo o compuesto colorado deben obedecer a las leyes de Beer y Lambert.

##### **1.4.2.1 Ley de Lambert**

La ley de Lambert relaciona la absorción de la luz a la profundidad o espesor del líquido coloreado. Esta Ley expresa que una capa de igual espesor absorberá una fracción igual de luz que atravesase a través de esta. Así, cuando un rayo monocromático de luz pasa a través de un medio absorbente su intensidad decrece exponencial con el incremento de la longitud del medio. Por lo tanto:

$$T = (I/I_0) = 10^{-k'L}$$

Ó

$$A = \log (I_0/I) = k'L$$

Donde:

- Io: intensidad de la luz incidente
- I: intensidad de la luz emergente
- L: longitud de la capa absorbente
- k': constante para la solución particular
- T: transmitancia de la solución
- A: absorbancia, o densidad óptica de la solución



No se han conocido excepciones a esta ley. Es pertinente el conocimiento de esta ley cuando la profundidad o espesor de muestras coloreadas es variado para decrecer un color a un nivel en el rango de una serie de estándares preparados o en un equipo de espectrofotometría.

#### 1.4.2.1 Ley de Beer

La ley de Beer está relacionada con la absorción de la luz en relación a la concentración de una solución. Esta ley expresa que la intensidad de un rayo de luz monocromático decrece exponencialmente con el incremento de la concentración del medio absorbente,

$$T = (I/I_0) = 10^{-k''C}$$

Ó

$$A = \log (I_0/I) = k''C$$

Donde:

$k''$ : constante para la solución particular  
C: concentración de la solución

La mejor vía para determinar si un compuesto o complejo coloreado obedece la Ley de Beer, es preparar una serie de muestras en el rango deseado de concentración y someterlas luego a una prueba sobre un colorímetro fotoeléctrico o espectofotómetro. Si las observaciones de la gráfica del porcentaje de luz transmitida dan una línea recta sobre una gráfica semilogarítmica se considera que el material cumple la ley de Beer.

Por combinación de las dos leyes de absorción se obtiene la ley de Lambert-Beer:

$$T = (I/I_0) = 10^{-kCL}$$

Ó

$$A = \log (I_0/I) = kCL$$

Desde esta Ley se obtiene que si un rayo de luz de la misma intensidad entra a dos soluciones diferentes y ajustes en la profundidad son hechos, tal que, los rayos emergentes son de la misma intensidad, la transmisión será la misma y:

$$C_1L_1 = C_2L_2$$

La anterior ecuación indica que si la profundidad de una muestra es variada tal que la intensidad del color iguala a la de un estándar, entonces la concentración de la muestra es relacionada a la concentración estándar por la relación de sus profundidades.