

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA

INSTITUTO DE METEOROLOGIA

CARLOS M. LOPEZ CABRERA

FACTORES METEOROLOGICOS DE LA CONTAMINACION REGIONAL
DEL AIRE EN CUBA

Especialidad 01.04.12 - Geofísica

Tutor: Candidato en Ciencias
Físico-Matemáticas
R. Alvarez Morales

RESUMEN

TESIS PARA LA OBTENCION DEL GRADO CIENTIFICO DE
CANDIDATO A DOCTOR EN CIENCIAS FISICO-MATEMATICAS

Ciudad Habana - 1984

CARACTERISTICAS GENERALES DEL TRABAJO

Actualidad del Tema. El Tema de esta Tesis está dedicado a uno de los problemas más actuales de nuestra época: La protección del medio ambiente, como condición esencial de la vida y la actividad de la sociedad humana.

En este complejo problema de la protección y mejoramiento del medio ambiente natural del hombre, la lucha contra la contaminación atmosférica se sitúa en primer plano internacionalmente por sus enormes repercusiones económicas y sociales.

Esta temática está vinculada con el plan de actividades científicas principales de la Academia de Ciencias de Cuba y la investigación desarrollada se ha ejecutado dentro del marco del Problema Principal de Investigación Fundamental 311 de éste organismo. Se vincula también con la Resolución del VIII Pleno del Comité Central del Partido Comunista de Cuba referente a la necesidad de continuar el esfuerzo por el mejoramiento y la protección del medio ambiente como parte de los lineamientos trazados al respecto en el I y el II Congresos del PCC.

Objetivo del trabajo. El objetivo de la Tesis es el estudio de los factores meteorológicos que intervienen en el proceso de transmisión (fuente - receptor) de los contaminantes del aire a nivel regional en Cuba.

En la figura 1 se presenta el esquema general seguido para abordar el tema de la Tesis. En el mismo aparece encerrado en líneas discontinuas la parte del sistema donde las investigaciones meteorológicas desempeñan el papel decisivo y cuyos componentes fueron agrupados por el autor bajo el concepto de transmisión desde la fuente emisora hasta el receptor donde se producen los efectos.

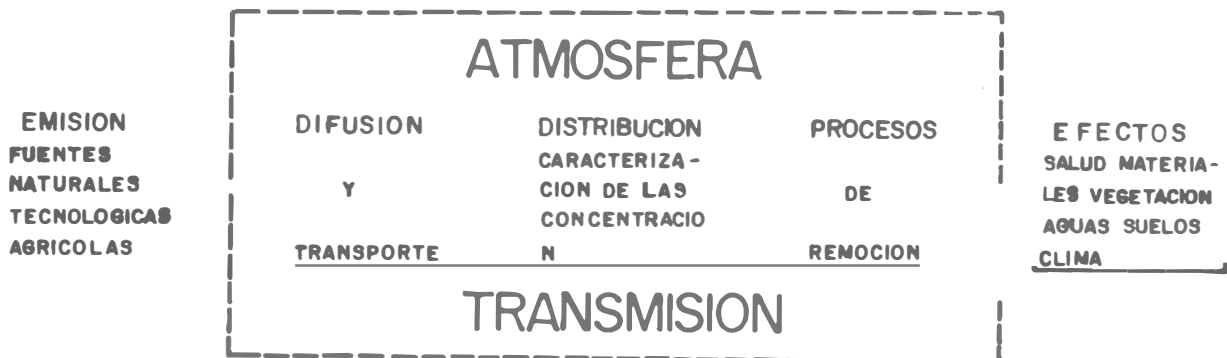


Figura 1

El conocimiento del proceso de transmisión es fundamental para la evaluación objetiva del estado actual de la contaminación

atmosférica a nivel regional en Cuba y para la organización sobre bases científicas de la toma de medidas necesarias tendentes a garantizar una composición atmosférica que no provoque efectos nocivos sobre el medio ambiente y que colaboren a la armonización de los desarrollos agrícola, industrial y urbano que experimenta prácticamente todo el territorio del país el cual, como es conocido, es de reducida extensión y con alta densidad de población.

Problemas principales investigados. Dentro del trabajo de la Tesis se abordan los siguientes problemas principales:

I. Estudio para las condiciones del clima tropical húmedo de Cuba de aquellos elementos y factores meteorológicos necesarios para la aplicación de los tres sistemas teóricos básicos utilizados en el estudio de la difusión y transporte de contaminantes en la atmósfera. Se caracterizó el coeficiente de turbulencia, el coeficiente de intercambio, el flujo de calor en la atmósfera, el coeficiente integral de la difusión turbulenta, la rapidez de fricción del viento, las categorías de estabilidad atmosférica, las funciones de dispersión, las alturas de mezclamiento, la rapidez de transporte del viento, la contaminación potencial de la atmósfera, las condiciones de estancamiento y la ocurrencia de episodios potenciales de contaminación. También se determinó el valor del coeficiente A en la metodología soviética para el pronóstico de la contaminación atmosférica producida por fuentes industriales, la cual ha tenido amplia utilización en Cuba en los últimos años.

II. En relación con la distribución de la contaminación se determinaron las concentraciones típicas para el nivel regional en Cuba. Se estudió la composición química de la lluvia en diferentes regiones para los elementos comprendidos en el programa de la Red Mundial de Medición de la Contaminación General del aire (BAPMON) de la OMM y que son: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+ , pH y electroconductividad, adicionándose a estas el I_2 . Fueron estudiados también los aerosoles atmosféricos determinándose su composición y heterogeneidad química para los elementos citados anteriormente incluyéndose también los metales pesados (Ni, Pb, Cu, Zn, Cr, V, Co, Ti, Mo, Sn, Mn, Sr, Ba). Se investigó además para cada región, los aportes que se reciben de cada elemento provenientes desde emisiones marinas y no marinas y se precisaron las zonas con atmósferas más limpias tomando como base la mineralización total de las lluvias.

III. En relación con la remoción de los contaminantes desde la atmósfera se acometió la valoración de la deposición hacia la superficie de la tierra de éstos por los variados procesos con

que terminan sus ciclos de vida atmosférica. En este aspecto se investigaron los siguientes procesos de remoción húmeda: remoción por lluvia, remoción por niebla y remoción por rocío; así como los procesos de remoción seca que son: remoción por sedimentación y remoción por impactación. Se expone también la concepción del autor para la evaluación de la remoción integral y se propone un sistema simplificado para los estudios experimentales en relación con este campo.

Métodos de la investigación. Para poder resolver los problemas planteados en esta Tesis, hubo necesidad de desarrollar un amplio trabajo experimental en diferentes regiones de Cuba debido a la carencia de información requerida para abordar la mayoría de los tópicos incluidos en el tema.

Se utilizó una gran variedad de equipos meteorológicos, de análisis químico y de muestreo de contaminantes, y además se hicieron experimentos especiales de comprobación de métodos para analizar sus comportamientos en las condiciones de Cuba.

En sentido general, en la ejecución de los experimentos y en el análisis químico, el procesamiento de datos, el control de la calidad, y el análisis y presentación de los resultados se siguieron los métodos más recientes utilizados al respecto en la Red Mundial de Medición de la Contaminación General del Aire (BAPMON) de la OMM con el objetivo de poder comparar nuestros resultados con los obtenidos para el nivel regional en otros países. No obstante haber dado prioridad a la utilización de métodos unificados internacionalmente, la Tesis contiene también un grupo de sistemas y métodos de muestreo propuestos por el autor, entre ellos dos patentes de invención desarrolladas como coautor.

Para los tópicos que requirieron el empleo de la computación fué utilizada la computadora EC - 1022 del Centro de Cálculo de la Academia de Ciencias de Cuba.

Novedad científica obtenida en los resultados de la Tesis. La mayoría de los resultados de esta Tesis, además de constituir novedad científica para Cuba, pueden considerarse novedosos para la zona tropical pues los estudios y resultados existentes en este campo proceden en lo fundamental de investigaciones realizadas en latitudes medias.

Significado práctico. Los resultados de este trabajo tienen significado de importancia científico-práctica. En relación con las actividades de protección del medio ambiente puede utilizarse en el trabajo operativo del Instituto de Meteorología de la ACC, de la Dirección Nacional para la Protección del Medio

Ambiente y los Recursos Naturales (DIMARNA), MinSap, y otras instituciones del país.

Por su importancia para la preparación de pronósticos de la contaminación y para la evaluación del nivel regional de contaminación del aire en Cuba pueden ser utilizados también por el Instituto de Planificación Física y otros organismos vinculados a esta actividad para la perspectiva de ubicación de nuevas fuentes de contaminación atmosférica o remodelación de las existentes. En este campo, por ejemplo, la utilización de un grupo de coeficientes obtenidos para Cuba permite obtener ahorros económicos significativos al efectuarse cálculos optimizados de instalaciones y obras asociadas a fuentes industriales emisoras de contaminantes, entre ellas el cálculo de la altura de las chimeneas.

Aparte del interés directo para la protección del medio ambiente, los resultados pueden ser utilizados en otras actividades. Por ejemplo, es conocido que el suelo actúa como un sumidero muy eficaz para la eliminación de muchos contaminantes de la atmósfera, sin embargo, la mayoría de ellos son de hecho sustancias nutrientes para las plantas y animales. La lluvia es uno de los mecanismos importantes para la reposición de elementos al suelo. Sobre este aspecto, de interés para la agricultura, ofrecemos resultados para diferentes regiones de Cuba de las contribuciones que reciben vía la lluvia de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, azufre, sodio y cloro. Además se analiza la acidez de las lluvias, fenómeno al cual se asocian un conjunto de efectos nocivos para el medio ambiente, entre ellos el aumento de la lixiviación de importantes nutrientes de las plantas influyendo sobre el rendimiento de éstas. Las contribuciones de éstos y otros elementos vía la lluvia presentan también interés para la hidrología, siendo de importancia para la evaluación de la agresividad corrosiva de nuestra atmósfera los resultados obtenidos acerca de las concentraciones de cloruros y sulfatos. Esta tarea, fundamental para las actividades de protección de los materiales contra la corrosión, reviste un enorme interés científico y económico.

La ejecución de trabajos en este campo, en la zona tropical, resultan fundamentales para la comprensión de los estudios que en escala global vienen realizándose en los últimos años acerca de la contaminación atmosférica, pero que sólo han podido ejecutarse con intensidad en latitudes medias.

Estructura y volumen del trabajo. La Tesis está compuesta por: introducción, tres capítulos, conclusiones y literatura utilizada. El contenido del trabajo incluye 180 páginas -de ellas 100 de texto y el resto con dibujos, tablas y la bibliografía incluyendo esta última 164 citas. El trabajo contiene 40 tablas y 68 figuras.

CONTENIDO PRINCIPAL DEL TRABAJO

La Introducción contiene la fundamentación de la actualidad del tema de la Tesis, se precisa el objetivo del trabajo desarrollado y el contenido de cada capítulo.

En el Primer Capítulo se presenta un resumen abreviado de la literatura sobre el tema de la investigación. En la primera parte se analizan los aspectos fundamentales de la difusión y transporte de contaminantes en la atmósfera, así como los sistemas teóricos básicos utilizados para su modelación:

a) La teoría de transporte-gradiente, basada en la hipótesis de la longitud de mezclado, donde los flujos turbulentos de concentración del contaminante C se suponen proporcionales al gradiente medio de C, es decir

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = S + \frac{\partial k_x}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial k_y}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial k_z}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z}$$

donde S representa las fuentes internas o sumideros y k_x, k_y, k_z son los coeficientes de turbulencia en las direcciones x, y, z respectivamente.

b) La teoría de la similitud, donde se plantea que el cambio del desplazamiento vertical promedio (\bar{Z}) de un conjunto de partículas después que cada una ha recorrido un espacio en un tiempo dado puede representarse en la forma:

$$\frac{d\bar{Z}}{dt} = bu_* \bar{\Psi}(\bar{Z}/L)$$

donde b es constante = 0,4; $\bar{\Psi}$ es la función de Monin-Obujov; u_* la rapidez de fricción y L la longitud de Monin-Obujov expresada por

$$L = \frac{-\rho C_p T u_*^3}{\mathcal{K} g H_0}$$

donde C_p es el calor específico del aire a presión constante, \mathcal{K} es la constante de Von Karman, g la aceleración de la gravedad, T la temperatura absoluta del aire y H_0 el flujo vertical de calor transportado por turbulencia.

También entre las bases físicas del tratamiento de la similitud se plantea que el cambio del correspondiente desplazamiento horizontal medio X es proporcional a la rapidez media del viento en el nivel relacionado con \bar{Z} , es decir

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{u}(c\bar{Z}) \quad \text{donde } c = e^{-\gamma} = 0,56 \quad (\gamma \text{ es la const. de Euler})$$

c) La teoría estadística, que presenta como base teórica la suposición de que la distribución de un penacho de material inerte que se difunde al ser emitido desde una fuente puntual instantánea es normal o gaussiana.

En este caso la concentración media del contaminante en el aire \bar{C} puede obtenerse integrando sobre emisiones instantáneas gaussianas desde la fuente, emitidas en diferentes tiempos, resultando:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]}{2\sigma_z^2} + \frac{\exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]}{2\sigma_z^2} \right\} \right]$$

donde Q es la emisión de la fuente ($g.s^{-1}$), u la rapidez del viento a la altura H ($m.s^{-1}$), y la distancia lateral desde el eje central de la emisión, Z(m) altura sobre el terreno (m), H la altura efectiva de la emisión (m) y σ_y , σ_z los parámetros de dispersión lateral y vertical (m).

Se exponen los criterios del autor acerca de los aciertos y deficiencias de estas teorías y se precisan los aspectos a resolver -elementos y factores meteorológicos que había que precisar en las condiciones de Cuba- para su aplicación.

Se analizan modelos de pronóstico y los problemas asociados con la dispersión de contaminantes a nivel regional. Se hace especial énfasis en los aspectos de la contaminación potencial, las condiciones de estancamiento y la ocurrencia potencial de episodios de contaminación.

En la segunda parte del capítulo se analiza otro aspecto básico del proceso de transmisión, que es el de la distribución de la contaminación y la caracterización de las concentraciones típicas para el nivel regional en Cuba. Se precisan las dificultades que necesitan ser resueltas para diseñar un sistema de observaciones que permita evaluar las concentraciones de contaminantes típicas de cada nivel asociado con las diferentes escalas espaciales de los procesos meteorológicos. Se examina el concepto de contaminación de fondo de la atmósfera y las recomendaciones internacionales para abordar su estudio. Se exponen los resultados más importantes obtenidos internacionalmente en la caracterización de las concentraciones de los elementos comprendidos en el programa de la Red Mundial de Medición de la Contaminación del Aire (BAPMoN) de la OMM, y que fueron los elementos estudiados en esta Tesis. Se ofrecen datos históricos obtenidos para estos elementos en diversas regiones del mundo.

En la tercera parte del capítulo se analiza el último aspecto básico del proceso de transmisión y que es el de la remoción de los contaminantes desde la atmósfera. Se analizan los aspectos fundamentales de la remoción húmeda (por lluvia, por niebla y por rocío) y la remoción seca (por sedimentación y por impactación). Se expresan los resultados reportados por la literatura sobre el tema en diferentes regiones del mundo, fundamentalmente el de remoción por lluvia que ha sido el más estudiado.

En el Segundo Capítulo se detalla el sistema de muestreo de la contaminación regional del aire utilizado en la Tesis, así como los métodos y equipos usados tanto para las mediciones meteorológicas como para las determinaciones químicas. Se exponen también las ecuaciones aplicadas para los cálculos de las diferentes magnitudes estudiadas.

En la primera parte del capítulo se exponen las características de las 14 estaciones regionales cuya información es utilizada en la Tesis, las cuales se encuentran distribuidas en todo el territorio nacional, y el programa de observaciones desarrollado.

Se presentan los aspectos relativos a la determinación del coeficiente de turbulencia. Para el desarrollo de este tópico se efectuaron mediciones experimentales entre 1979 y 1982 en 7 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones geográficas del país. Como aspecto de interés se desarrollaron mediciones experimentales en dos estaciones situadas en regiones montañosas las cuales a pesar de no cumplir todas las exigencias para este tipo de estudio, dada la extraordinaria complejidad del proceso de turbulencia en las montañas, aportaron información comparativa importante. Este trabajo experimental se realizó en dos etapas: la primera de ellas dirigida a evaluar diferentes métodos experimentales en las condiciones climáticas de Cuba con el fin de seleccionar uno de éstos para su extensión posterior al resto de las estaciones en la segunda etapa. La comparación simultánea de los cinco métodos seleccionados se efectuó realizando mediciones trihorarias durante un año en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas.

Las ecuaciones básicas utilizadas para el cálculo de k_1 (m^2/s) con los diferentes métodos fueron:

$$a) \quad k_1 = 0,104 \Delta u \{1 + 1,38 [\Delta t / (\Delta u^2)]\} Z'$$

$$k_1 = 0,104 \Delta u m Z' \quad (\text{Método de la difusión turbulenta})$$

donde m es un factor que depende de la diferencia de la rapidez del viento y la diferencia de la temperatura del aire entre los niveles 0,5 y 2,0 m mediante el número de Richardson de la siguiente forma:

$$\text{Para } Ri < 0 \quad m = 1 + 2,6|Ri| + [(1 + 2,6|Ri|)^2 - 1]^{1/2}$$

$$Ri > 0 \quad m = 1 + 10,3|Ri| - [(1 + 10,3|Ri|)^2 - 1]^{1/2}$$

$$b) \quad k_1 = u_1 (0,16 \varepsilon Z_0^{2\varepsilon} Z_1^w) / (1 - \varepsilon)^2 (Z_1^\varepsilon - Z_0^\varepsilon) \quad (\text{Método de Laightman})$$

donde Z_0 es el parámetro de rugosidad (m) y ε el parámetro de estabilidad. 0 también:

$$c) \quad k_1 = [0,16 u_1 / \ln(1/Z_{00})] [1 + 7,5(\Delta t / u_1^2)]$$

donde u_1 es la rapidez del viento a la altura $Z_1 = 1$ m, Z_{00} es el parámetro de rugosidad para condiciones de equilibrio (m) y

$$\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}$$

$$d) \quad k_1 = 0,744 \mathcal{N}_q u_1 \quad (\text{Método de la similitud})$$

donde \mathcal{N}_q es una función que depende de la rapidez del viento a la altura de 1 m y el gradiente de temperatura del aire en la capa de 0,5 a 2,0 m y u_1 es la rapidez del viento a la altura $Z' = 1$ m.

e) $k_1 = 0,74 \left[\frac{(B-P)}{(\Delta t + 1,56\Delta e)} \right]$ (Método del balance de calor)

donde B es el balance de radiación (cal/cm²min), P la corriente de calor en el suelo (cal/cm²min) y Δt y Δe son las diferencias de temperatura del aire y tensión de vapor de agua entre los niveles 0,5 y 2,0 m.

Para la extensión de la segunda etapa -extensión de las mediciones experimentales en diferentes regiones geográficas de Cuba- se escogió el método señalado en a), con el cual se obtuvieron resultados satisfactorios en la etapa comparativa. La propagación del error para este método arrojó un valor del 3%.

Para el cálculo de k_z a diferentes alturas utilizamos un modelo de dos capas donde u y k_z vienen dados por

$$u = u_1 \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_1/Z_0)} \quad k_z = \nu + k_1 Z/Z_1 \quad Z \leq h$$
$$k_z = \nu + k_1 h/Z_1 \quad Z > h \quad h = 100 \text{ m}$$

donde ν es el coeficiente de difusión molecular.

Este modelo significa que con el aumento de la altura, las dimensiones de los vórtices que condicionan el intercambio turbulento crecen en la capa superficial ($Z \leq h$) y varían relativamente poco cuando $Z > h$ adoptando ciertos valores característicos. Estas consideraciones facilitan el tratamiento de la difusión de contaminantes en la atmósfera en los trabajos prácticos. Se considera que para el cálculo de los niveles superficiales de concentración de contaminantes no es necesario prestar atención a la distribución detallada de k_z a grandes alturas.

También en esta parte exponemos los pasos dados para el cálculo del coeficiente A en las metodologías de cálculo soviéticas CH-369-67 y CH-369-74 de amplia aceptación y utilización en Cuba y otros países socialistas en los últimos años. Las fórmulas básicas de esas metodologías provienen de una aproximación numérica de la solución de la ecuación diferencial parcial básica de la teoría de transporte-gradiente y en las mismas el cálculo de la concentración máxima que ocurre a una cierta distancia de una fuente de contaminación tiene la forma siguiente:

$$C_M = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} \quad (\text{emisiones calientes}) \quad C_M = \frac{AMFnk}{H^{4/3}} \quad (\text{emisiones frías})$$

La selección adecuada del coeficiente A se convirtió en dificultad principal para la aplicación en nuestro país de las citadas metodologías.

Se presentan los aspectos relativos al cálculo del coeficiente integral de la difusión turbulenta, importante para la aplicación de la teoría de la similitud a la difusión de contaminantes. Como es conocido este coeficiente surge de la relación entre el flujo turbulento de calor (H_0) y la diferencia de temperaturas entre la superficie de la tierra (T_0) y la atmósfera (T).

$H_0 = -\rho C_p D(T_0 - T)$ donde D (cm.s) es el coeficiente integral de la difusión turbulenta. Para su cálculo utilizamos la ecuación

$$D_{0-2} = 0,39 \cdot 10^{-2} u_1 (1 + 0,06y)$$

(aplicada a la capa entre 0 y 2 m)

donde u_1 es la rapidez del viento a la altura $Z' = 1$ m y

$$y = (T_0 - T_{2,0})/u_1^2$$

Se exponen los aspectos relativos al cálculo del flujo turbulento de calor H_0 (cal/cm²min). En nuestro trabajo, además de la ecuación para H_0 descrita anteriormente con la utilización del coeficiente D , con el objetivo de comparar los resultados, adicionamos también el cálculo de esta magnitud por los siguientes métodos:

a) $H_0 = 1,35k_1 \Delta T/Z'$ (Método de la difusión turbulenta)

donde k_1 es el coeficiente de turbulencia (m²s⁻¹) y ΔT la diferencia de la temperatura del aire entre los niveles 0,5 y 2,0 m.

b) $H_0 = -V_q \Delta T$ (Método de la similitud)

donde V_q y ΔT mantienen los significados vistos anteriormente.

c) $H_0 = (B-P)\Delta T/(\Delta T + 1,56\Delta e)$ (Método del balance de calor)

donde los términos mantienen los significados vistos anteriormente.

El trabajo experimental para la evaluación de esta magnitud también fue desarrollado en dos etapas, la primera de ellas dirigida a comparar los cuatro métodos citados. La segunda etapa -extensión de las mediciones a siete regiones diferentes del país- se desarrolló utilizando el método de la difusión turbulenta. Este trabajo fué ejecutado en el período 1979-1982.

La evaluación de esta magnitud es fundamental para la aplicación en Cuba de la teoría de la similitud a la difusión de contaminantes en la atmósfera.

La rapidez de fricción del viento u_* (m/s), aspecto también esencial para la aplicación de la teoría de la similitud, fue calculada por la ecuación:

$$u_* = \frac{K u}{\ln(Z/Z_0) - \phi(Ri)} \quad (\text{Método de Panofky})$$

donde K es la constante de Von Karman y ϕ es una función universal dependiente del número de Richardson.

Esta magnitud también fue evaluada para siete regiones diferentes de Cuba.

El estudio de la estabilidad atmosférica fue llevado a cabo por tres métodos simultáneos con el propósito de garantizar mejor calidad en la clasificación de las observaciones efectuadas. Estos métodos se basan en:

a) Clasificación de las categorías de estabilidad en función de

la rapidez del viento a 10 m de altura y de la radiación neta. Para obtener el índice de radiación neta, se estima el grado de insolación a partir de la altura solar y las condiciones existentes de nubosidad en tipo cantidad y altura.

b) Clasificación de las categorías de estabilidad a partir del cálculo de la desviación estándar de la dirección horizontal del viento (σ_θ), la que obtuvimos a partir de mediciones de la dirección horizontal del viento en periodos de 30 minutos. Para esto utilizamos:

$$\sigma_\theta \approx R(\theta)/6 \approx (\theta_{\max} - \theta_{\min})/6$$

Utilizando los datos de σ_θ puede calcularse también σ_y mediante

$$\sigma_\theta \approx \sigma_y/x$$

σ_y es otro de los elementos necesarios a calcular para la aplicación de la teoría estadística.

c) Clasificación de las categorías de estabilidad mediante la determinación del parámetro de estratificación μ_0 que caracteriza el nivel de turbulencia. Para el cálculo del parámetro μ_0 utilizamos los resultados de las mediciones de gradiente de rapidez del viento y temperatura del aire entre los niveles 0,5 y 2,0 m.

Con estos métodos construimos las rosas de estabilidad características de estaciones ubicadas en tres regiones diferentes de Cuba (costa Norte, costa Sur y Centro del país). También efectuamos un análisis de las características de las categorías de estabilidad por rumbos del viento.

A continuación exponemos los métodos que utilizamos para el estudio de las variables necesarias para el modelado de la difusión de contaminantes a nivel regional.

Cálculo de la altura de mezclamiento. La altura de mezclamiento en horas de la mañana la calculamos como la altura sobre el terreno donde la adiabática seca extendida desde la temperatura mínima en superficie más 3°C intercepta el perfil vertical de temperatura observado a las 0700 (hora local). La altura de mezclamiento en horas de la tarde fue calculada en la misma forma salvo que en lugar de utilizar la temperatura mínima corregida se utilizó solamente la temperatura máxima. Este método comprende alturas de mezclamiento diarias que no estuvieron asociadas con la ocurrencia de precipitaciones.

Cálculo de la rapidez de transporte del viento. Esta se computó para la mañana como el promedio aritmético de rapidez observada en la superficie desde las 0200 hasta las 0600 horas (local) y dentro de la capa de mezclamiento para la mañana. Para la tarde se utilizó un sistema similar pero con los datos de sondeo de las 1900 horas (local) y el promedio de rapidez del viento en superficie desde las 1200 hasta las 1600 horas (local).

Evaluación de la contaminación potencial de la atmósfera. Una aproximación cuantitativa al potencial meteorológico de la contaminación del aire puede lograrse utilizando la altura de mezclamiento H (m) y la rapidez de transporte del viento u (m/s) como las variables independientes de un simple "modelo de cajas" que da la concentración promedio normalizada \bar{X}/\bar{Q} ($s \cdot m^{-1}$) sobre un área de dimensión lineal C (m) -en nuestro caso utilizamos C = 100 km-.

$$\bar{X}/\bar{Q} = 3,994(C/u)^{0,115} \text{ para } C/u \leq 0,471H^{1,13}$$

$$\bar{X}/\bar{Q} = 3,613H^{0,13} + \frac{C}{2Hu} - \frac{0,088uH^{1,26}}{C} \text{ para } C/u \geq 0,471H^{1,13}$$

Condiciones de estancamiento y episodios potenciales de contaminación. Estos casos los clasificamos según el valor de la altura de mezclamiento, la rapidez de transporte del viento y la persistencia de las condiciones meteorológicas. En este trabajo hemos considerado solamente los casos en que la situación se mantuvo por dos o más días consecutivos sin precipitación.

En la segunda parte del capítulo exponemos los métodos de análisis químico utilizados en la Tesis para la caracterización de las concentraciones de los diferentes elementos contaminantes estudiados. Entre ellos destacaremos los siguientes:

pH: para medir esta magnitud utilizamos electrodos de cristal en combinación con el potencial de referencia proporcionado por un electrodo de calomel saturado. Los electrodos se calibraron con soluciones buffer de un valor conocido de pH. El método tiene una sensibilidad de 0,05 unidades de pH y una precisión del 1%.

Electroconductividad: el método utilizado refleja la concentración general del electrolito contenido en la muestra. Para la medición utilizamos un conductímetro con sensibilidad de 0,1 $\mu s/cm$ y una precisión del 1%.

Método utilizado para la determinación de Yodo en las precipitaciones atmosféricas. Se empleó la celda electroquímica y el procedimiento para la determinación de microcantidades de Yodo en soluciones acuosas que presentamos como coautor y que ha recibido certificado de Patente de Invención. La sensibilidad de este procedimiento es de 0,05 mg/l y permite reducir el tiempo de la medición en un 15-20% y eleva la exactitud casi al doble en relación con los métodos conocidos hasta el presente.

Aerosoles atmosféricos. El muestreo fue efectuado con la técnica de filtrado, de forma trihoraria y con filtros AFA--XP-18 de procedencia soviética, recomendados para efectuar la determinación posterior de la composición química de las muestras. Utilizamos un volumen de filtrado de 2 m³ de aire durante 30 minutos a 1,5 m de altura. Posteriormente se procedió al análisis químico de los filtros siguiendo las técnicas establecidas, empleando también la técnica de espectrografía para otros elemen-

tos estudiados.

En la tercera parte del capítulo exponemos los métodos utilizados para el estudio de los procesos de remoción de contaminantes desde la atmósfera como última fase del proceso de transmisión. Para este estudio expresamos la remoción total R_T (Kg/ha.mes) como:

$$R_T = R_h + R_s + R_{rq}$$

donde R_h es la remoción húmeda, R_s la remoción seca y R_{rq} la remoción por reacciones químicas.

Remoción húmeda. Se representó para las condiciones de Cuba como

$$R_h = R_{ll} + R_n + R_r$$

donde R_{ll} es la remoción por lluvia, R_n la remoción por niebla y R_r la remoción por rocío.

El cálculo de la remoción por lluvia se efectuó mediante la relación simple entre la cantidad de lluvia caída durante el periodo de muestreo (mm/mes) y la concentración del elemento en la lluvia C (mg/l). Para la toma de muestras de lluvia se diseñaron y construyeron colectores especiales de material plástico-polietileno y acrílico.

Como para las nieblas el mecanismo básico de remoción consiste en la impactación de las gotas de niebla en obstáculos de la superficie su sistema de muestreo es el mismo que diseñamos para la evaluación del proceso general de impactación.

Para la toma de muestras de rocío se diseñó y construyó un colector de los materiales citados que se mantenía tapado hasta las horas de la noche con el objeto de atenuar los aportes de la deposición gravitacional sobre las muestras. Como el colector permite conocer la cantidad de rocío formado por unidad de área, y determinamos la composición química de éste, podemos calcular la remoción por rocío para los diferentes elementos estudiados.

Remoción seca. El estudio de la remoción seca de partículas R_s (Kg/ha.mes) puede representarse por:

$$R_s = R_{sed} + R_i$$

donde R_{sed} es la remoción por sedimentación y R_i la remoción por impactación.

Considerando las múltiples dificultades para estimar la remoción seca de partículas por sedimentación, preparamos un sistema para su valoración por tres vías diferentes. La primera comprendió el diseño de un colector para la toma conjunta de las deposiciones por lluvia y por sedimentación, confeccionados con los materiales citados y predotado de un sistema de pantalla para la protección contra la turbulencia. El valor R_{sed} para los elementos químicos estudiados se obtiene por:

$$R_{sed} = R_{ll+sed} - R_{ll}$$

Este colector se mantenía destapado para los periodos con o sin

lluvia por espacio de un mes. Cada vez que llovió se recogieron las muestras que fueron almacenadas y conservadas de forma que su composición química se afectara lo menos posible.

Otro de los métodos que se utilizaron para evaluar R_{sed} , consistió en la exposición de filtros colocados horizontalmente en un dispositivo diseñado al efecto. Estos filtros tienen una superficie de captación de 400 cm^2 y fueron sometidos posteriormente al análisis químico -después de una exposición de cuatro horas.

También se estimó R_{sed} aplicando la teoría de la difusión turbulenta, a valores de concentración de los elementos en suspensión en el aire. En este caso, el flujo vertical F de un elemento contaminante dado hacia o desde una superficie homogénea puede expresarse como:

$$F = - k \frac{\Delta C}{\Delta Z}$$

donde k es el coeficiente de turbulencia ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y $\Delta C / \Delta Z$ es el gradiente vertical de concentración del elemento contaminante dado.

Para evaluar la remoción seca de partículas por impactación, preparamos un sistema de exposición de filtros el cual consta de una veleta que permite que la superficie del filtro permanezca todo el tiempo orientada perpendicularmente a la dirección desde donde sopla el viento. Los filtros consisten en una rejilla de celdas de PVC que después de un tiempo de exposición de cuatro horas es enjuagada con agua destilada, procediéndose después al análisis químico de la muestra. Ya que conocemos el área expuesta a la impactación y el periodo de exposición podemos calcular, a partir de los valores de concentración obtenidos para los iones en estudio, la masa que se impacta por área y por tiempo.

Método utilizado para la valoración de la remoción total de los elementos contaminantes estudiados. En este sentido, además de la suma de las diferentes componentes de la remoción, desarrollamos, como método simplificado auxiliar, muestreos de lluvia bajo la cubierta de árboles, sistema que consideramos puede constituir una forma operativa fácil para estimar valores cercanos a la remoción total. Los árboles y la cubierta vegetal en su conjunto actúan como filtros naturales de la atmósfera. En los mismos ocurre continuamente la deposición y la impactación de partículas -incluyendo las de niebla-, así como diversos intercambios con los gases atmosféricos. Reciben también los aportes de la composición química de las lluvias y sobre sus hojas se forma el rocío. Una muestra de lluvia tomada bajo la cubierta de árboles contiene contribuciones de elementos químicos provenientes de todas esas componentes de la remoción.

En el Tercer Capítulo exponemos los resultados obtenidos en la valoración de los factores meteorológicos que intervienen en el proceso de transmisión de los contaminantes atmosféricos a nivel regional en Cuba. El mismo está dividido en tres partes, dedicada cada una a las componentes del proceso de transmisión.

En la primera parte del capítulo aparecen los resultados obtenidos en relación con la difusión de contaminantes en la atmósfera. Para posibilitar la aplicación de la teoría del transporte gradiente determinamos experimentalmente las características del coeficiente de turbulencia en siete regiones diferentes de Cuba durante tres años con observaciones trihorarias.

La comparación de los resultados de las mediciones efectuadas demostró que los valores medios por hora y el valor medio para el período diurno completo pueden considerarse heterogéneos para las regiones estudiadas. En éstas pudo establecerse el régimen de variación diaria con valores medios máximos entre las 1200 y las 1400 horas (local) en el intervalo desde los 0,11 hasta los $0,20 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

El análisis de las distribuciones de frecuencia refleja que en todos los puntos los valores están por debajo del valor $0,32 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ en más del 94% de los casos y por debajo del valor $0,20 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ en más del 70% de los casos. Se verificó que las regiones con mayores complejidades orográficas -Pinares de Mayarí, Topes de Collantes y en menor grado La Palma- presentaron valores mayores en la marcha diaria del valor de k , que otras regiones con menos irregularidades orográficas.

No se encontraron variaciones definidas del coeficiente de turbulencia en relación con otras condiciones geográficas importantes, entre ellas el cambio de la latitud y el cambio de la distancia en relación con la costa.

Los datos obtenidos verifican la relación del aumento de k_1 (m^2s^{-1}) con el incremento de la rapidez del viento. Los valores obtenidos para k_2 a la altura de 100 m desde la superficie variaron entre 3 y $19 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ en dependencia de la hora del día y la región de medición.

Se elaboró una clasificación de la estabilidad atmosférica en función del coeficiente de turbulencia k_1 (m^2s^{-1}) donde se propone clasificar las condiciones atmosféricas inestables para valores de k_1 mayores o iguales que $0,10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y las condiciones estables para valores inferiores al citado.

En relación con la determinación experimental del coeficiente A , en las ecuaciones de pronóstico de la contaminación atmosférica de la metodología soviética CH - 369 - 74, proponemos la utilización para las zonas llanas de Cuba o con una topografía de poca complejidad y altura un valor $A = 200$ -o si se desea mayor seguridad a $A = 210$ ($\text{s}^{2/3} \text{ mg. grad}^{1/3}/\text{g}$)- en sustitución de

$A = 240$, valor utilizado hasta el momento con mayor frecuencia en Cuba. El nuevo valor obtenido permite optimizar un conjunto de cálculos necesarios para la ubicación o ampliación de industrias, aspecto que trae aparejado la obtención de considerables ahorros económicos.

Para posibilitar la aplicación de la teoría de la similitud a la difusión de contaminantes determinamos experimentalmente las características del coeficiente integral de la difusión turbulenta. Los resultados arrojan un valor medio cercano a $0,93 \text{ cm/s}$, aunque en general este coeficiente manifiesta un ciclo de variación para el periodo diurno con valores medios entre $0,40 \text{ cm/s}$ para las 0700 horas y $1,25 \text{ cm/s}$ para las 1400 horas (local). Se verificó la disminución del valor de este coeficiente en presencia de inversiones de temperatura en comparación con su magnitud bajo condiciones superadiabáticas. Se obtuvo también una dependencia del coeficiente D de la rapidez del viento algo mayor que la reportada en la bibliografía para mediciones sobre tierra.

También en relación con la aplicación de la teoría de la similitud determinamos experimentalmente las características del flujo turbulento de calor H_0 ($\text{cal/cm}^2\text{min}$) en siete regiones diferentes de Cuba durante tres años con observaciones trihorarias. Los valores medios encontrados oscilaron entre $0,03$ y $0,29 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ reflejando la existencia de un ciclo diario de variación. La comparación de los valores medios obtenidos para las diferentes regiones demostró que éstos pueden considerarse homogéneos para el período diurno en su conjunto, así como para las 1000, 1600 y 1900 horas (local). Para las 0700 y las 1300 horas los valores medios obtenidos pueden considerarse heterogéneos. El análisis de las distribuciones de frecuencia permitió establecer, en general, que los valores están por debajo de $0,20 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ en más del 70% de los casos.

En las regiones con mayores irregularidades orográficas -Topes de Collantes, La Palma, Pinares de Mayarí- se encontró que los valores bajos del flujo de calor ocurren con menos frecuencia y que en las regiones llanas ocurren con mayor frecuencia los valores altos. Además, las estaciones situadas en las regiones llanas presentaron curvas de distribución de los valores prácticamente similares.

En relación con la determinación de la rapidez de fricción del viento u_* (m/s) obtuvimos los valores medios de la marcha diaria en las diferentes regiones, los cuales oscilaron entre $0,13$ y $0,41 \text{ m/s}$ para las diferentes horas del día. Los valores máximos ocurrieron en horas después del mediodía. Resulta interesante el resultado obtenido en relación a que el ordenamiento -de mayor a menor- de las estaciones según los valores medios

y el valor del percentil 90 es el mismo que el obtenido para el coeficiente de turbulencia. Es decir, las estaciones con mayor valor de la rapidez de fricción presentan también mayores valores del coeficiente de turbulencia.

Para aplicar la teoría estadística a la difusión de contaminantes en la atmósfera se estudió el comportamiento de la estabilidad atmosférica ya que, conociéndola, pueden obtenerse los valores de las funciones de dispersión, elemento básico a determinar para la aplicación de los modelos gaussianos. En este aspecto se calcularon las rosas de estabilidad para tres estaciones situadas en diferentes regiones de Cuba (costa Norte, costa Sur y Centro del país): Casablanca, Cienfuegos y Camagüey, calculándose también para estos lugares las alturas de mezclado H (m). Los valores obtenidos oscilaron entre 20 y 1900 m para la mañana y entre 100 y 3000 m para la tarde. El análisis de varianza demostró que los valores medios obtenidos pueden considerarse heterogéneos, tanto para la mañana como para la tarde y que el ordenamiento de los valores fué el siguiente:

Para la mañana: Casablanca > Camagüey > Cienfuegos

Para la tarde: Casablanca > Cienfuegos > Camagüey.

Para la mañana, encontramos un elevado porcentaje de ocurrencias en la capa 0-500 m de altura y específicamente en Cienfuegos y en Camagüey este máximo aparece en la capa 0-250 m. Para la tarde Casablanca y Cienfuegos presentan un comportamiento parecido con máximos para la capa 1250-1750 m. Camagüey presenta el máximo hacia la parte inferior de ese intervalo.

También se determinaron las características de la rapidez del viento en las regiones citadas. Estos valores se encuentran entre 1,0 y 28,0 m/s para la mañana, y para la tarde Juraguá manifestó valores entre 2,0 y 35,0 m/s. El análisis de varianza demostró que los valores medios para la mañana pueden considerarse heterogéneos con el siguiente ordenamiento:

Casablanca > Camagüey > Cienfuegos

Para la mañana los máximos fueron obtenidos en el intervalo entre 0 y 4 m/s para Cienfuegos y Camagüey y en el intervalo 4-8 m/s para Casablanca. Para la tarde, en Cienfuegos, el máximo se desplaza hasta el intervalo de valores de 8-12 m/s.

En el estudio de las características de la contaminación potencial de la atmósfera en tres regiones diferentes de Cuba (costa Norte, costa Sur y Centro del país) obtuvimos que los valores de la concentración promedio normalizada \bar{X}/\bar{Q} (s/m) oscilaron entre 9 y 580 s/m para la mañana. La comparación de los valores medios obtenidos demostró que éstos pueden considerarse homogéneos entre Casablanca y Cienfuegos y heterogéneos entre estos dos puntos y Camagüey. En general los valores se ordenaron así:

Casablanca > Cienfuegos > Camagüey

Estos valores se corresponden con los reportados para el SW de los Estados Unidos y algunas regiones centrales de ese país. Sin embargo, son superiores a valores reportados para regiones mas cercanas a Cuba, como la Florida.

Para la mañana, en las tres regiones analizadas, se apreció un elevado porcentaje de ocurrencias en el intervalo 0-100 s/m con los máximos en el intervalo 0-50 s/m. En general los valores altos de X/Q en horas de la mañana no se mantuvieron hasta la tarde, disminuyendo así las condiciones peligrosas de contaminación potencial. Para Cienfuegos obtuvimos el menor valor medio del coeficiente de ventilación V (m^2s^{-1}) para la mañana entre las tres regiones analizadas.

Esta situación debe tomarse en cuenta en relación con la reducción de emisiones en esa región durante la ocurrencia de valores altos de X/Q con el fin de evitar la ocurrencia de posibles episodios reales de contaminación.

La frecuencia absoluta simple de episodios potenciales de contaminación que calculamos pueden considerarse pequeñas en las tres regiones estudiadas en relación con otros países. No obstante, deben ser pronosticadas estas situaciones para que puedan tomarse medidas oportunas y minimizar sus efectos nocivos.

En la segunda parte del Capítulo abordamos los aspectos relativos a la distribución de contaminación. El estudio de la composición química de muestras sumarias mensuales de lluvia arrojó el resultado que puede verse en la Tabla 1.

Se demostró la conveniencia de utilizar la varianza para valorar la heterogeneidad química de los aerosoles en sustitución del coeficiente de heterogeneidad. Utilizando la varianza se obtuvieron resultados coincidentes con los procesos físicos esperados, entre ellos que los aerosoles del período seco del año (Noviembre-Abril) poseen mayor heterogeneidad química que los del período húmedo (Mayo-Octubre), que en los aerosoles marinos la heterogeneidad química disminuye al aumentar la distancia desde la costa al punto de colección, y que los aerosoles rurales son más homogéneos que los urbanos. Se encontró también que el contenido promedio de la mayoría de los metales pesados oscila entre 0,1 y 10 μg en 1 gramo de muestra de aerosoles sedimentables.

En la tercera parte del Capítulo abordamos los aspectos relativos a la remoción de los contaminantes desde la atmósfera. En las Tablas 2 y 3 se exponen los principales resultados obtenidos.

El estudio de la remoción total arrojó lo siguiente:

Se obtuvieron valores medios cercanos por las dos vías de cálculo utilizadas (excepto para el SO_4^{-2} y el Cl^-) y el ordenamiento para los aniones fué similar



Para los cationes fué similar para los dos primeros elementos, pero presentó cambios a partir de éstos:

Remoción Total (suma) $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$

Remoción Total (árbol) $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{+2}$

El análisis de los datos de O_3 obtenidos en la estación Casablanca durante 1978-1979 mostró valores medios máximos en el mes de marzo con $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos en julio con $14,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En general, se observaron valores altos para los meses en que ocurre la llegada de frentes fríos al territorio de Cuba. Se considera que en la ocurrencia de los valores altos de concentraciones de O_3 observados, el papel fundamental lo desempeña el intercambio intenso entre la estratósfera y la troposfera que provocan diferentes sistemas sinópticos. Estos valores elevados pueden resultar nocivos para un conjunto de cultivos de interés para el país.

RESULTADOS GENERALES PRINCIPALES:

1. Se investigaron y determinaron experimentalmente las características del coeficiente de turbulencia atmosférico k_1 (m^2s^{-1}).
2. Se elaboró una clasificación de estabilidad en función del valor del coeficiente de turbulencia.
3. Se determinó experimentalmente el valor del coeficiente A en las ecuaciones de pronóstico de la contaminación atmosférica de metodología soviética CH - 369 - 74.
4. Se investigaron y determinaron experimentalmente las características del coeficiente integral de la difusión turbulenta D (cm/s).
5. Se investigaron y determinaron experimentalmente las características del flujo turbulento de calor en la atmósfera H_0 (cal/cm².min).
6. Se calculó el valor de la rapidez de fricción, u_* (m/s), y se precisaron sus características principales.
7. Se estudió el comportamiento de la estabilidad atmosférica y se construyeron las rosas de estabilidad para diferentes categorías.
8. Se calcularon los valores de la altura de mezclamiento H (m) y se determinaron sus características principales.
9. Se calcularon los valores de la rapidez de transporte del viento u (m/s) y se investigaron sus rasgos fundamentales.
10. Se investigaron y determinaron las características de la contaminación potencial de la atmósfera y se calculó la frecuencia de episodios potenciales de contaminación.
11. Se estudió la composición química de muestras sumarias mensuales de lluvia para los elementos Cl^- , SO_4^{-2} , NO_3^- , K^+ , Na^+ , Mg^{+2} , HCO_3^- , Ca^{+2} , NH_4^+ , pH, I_2 y electroconductividad, precisándose su distribución y características principales.
12. Se determinaron las regiones con atmósfera más limpia en base a la mineralización total de las precipitaciones.
13. Se investigaron las contribuciones a la composición química de las lluvias desde fuentes marinas y no marinas, construyéndose mapas para cada elemento.
14. Se investigó y determinó la composición química de los aerosoles atmosféricos.
15. Se presentó un nuevo método para valorar la heterogeneidad química de los aerosoles atmosféricos y se precisaron las características de esta importante propiedad.
16. Se investigó el contenido de metales pesados en los aerosoles atmosféricos determinándose sus rasgos asociados con diferentes condiciones meteorológicas.
17. Se estudió el proceso de remoción por rocío y se precisó su contribución a la remoción total.
18. Se investigaron las características de la remoción por lluvia

y se determinaron sus valores (Kg/ha.mes) para los contaminantes Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , K^+ , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y NH_4^+ .

19. Se investigó la remoción seca de partículas por sedimentación y se calcularon sus aportes a la remoción total.

20. Se investigó la remoción seca de partículas por impactación obteniéndose valores característicos de este proceso para diferentes elementos de interés.

21. Se investigó y determinó experimentalmente la remoción de contaminantes desde la atmósfera durante la ocurrencia de nieblas.

22. Se obtuvieron valores de la remoción total para un grupo de elementos de interés. Se presentó un método operativo fácil para obtener estimados de la remoción total.

23. Se diseñaron y utilizaron varias instalaciones de muestreo de contaminantes que son de fácil aplicación en las investigaciones sobre este campo. Entre los métodos de muestreo y análisis utilizados, dos de ellos recibieron patente de invención.

El contenido principal de la disertación se incluye en los trabajos:

1. López, C.M. 1978 "Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en la Ciudad de la Habana. Informe Científico Técnico No. 46. Academia de Ciencias de Cuba. 16 pp.
2. López, C.M. 1982 "Determinación del coeficiente de turbulencia en la capa superficial de la atmósfera mediante diferentes métodos experimentales". Ciencias de la Tierra y el Espacio. No. 5. Academia de Ciencias de Cuba. pp 105-112.
3. López, C.M. 1984 "Determinaciones, en condiciones de clima tropical húmedo, de algunos parámetros importantes para el estudio del proceso de transmisión de los contaminantes del aire en centros urbanos". Conferencia Técnica sobre Climatología Urbana de la OMM. Ciudad México. 26-30 de Nov. (en prensa).
4. López, CM; Cuesta, O. 1979 "La contaminación atmosférica en la Ciudad de la Habana mediante algunos índices. Publicación interna, Instituto de Meteorología. 13 pp.
5. López, C.M.; Ananías, G.; Cuesta, O. 1980 "Determinación del coeficiente integral de la difusión y el flujo turbulento de calor por mediciones de gradiente. Presentado en la IV Jornada Científica del InsMet, Academia de Ciencias de Cuba. 1980.
6. López, C.M.; Paz, L.; Isaeva, G.; Svistov, P.F. "Heterogeneidad química de los aerosoles en Cuba" Presentado en la V Jornada Científica del InsMet. ACC. 1982.
7. López, C.M.; Cuesta, O.; González, M.; Nieto, L. "Consideraciones sobre la remoción de contaminantes desde la atmósfera a nivel regional en Cuba. Presentado en la IV Conferencia Científica de Ciencias Naturales. Univeridad Habana. 1984.

8. López, C.M.; Cuesta, O.; Valdés, L. "Determinación experimental del Coeficiente A en la ecuación de pronóstico de la contaminación atmosférica para las condiciones tropicales de Cuba". Presentado en la IV Conferencia Científica de Ciencias Naturales Universidad de la Habana. 1984.
9. López, C.M.; Ananías, G.; Vega, R.; Azcuy, G. 1984 "Características de la composición química de la lluvia a nivel regional en Cuba". Academia de Ciencias de Cuba (en prensa).
10. Svistov, P.F.; López, C.M.; Ramírez, J. 1980 "Un nuevo método para medir ozono en el aire" (en ruso). Patente de invención No. 741552. Comité Estatal de Invenciones y Descubrimientos. URSS.
11. Ramírez, J.; López, C.M.; Svistov, P.F. 1982 "Celda electroquímica para la determinación de microcantidades de Yodo en soluciones". Patente de Invención No. 3546002/25 (000957).Cuba.
12. Fernández, P.V.; López, C.M.; Ramírez, J.; Svistov, P.F. "Resultados de las investigaciones químico-atmosféricas en Cuba" (en ruso). Publicado en el libro: Resultados de investigaciones sobre contaminación atmosférica en los países miembros del CAME. 1980.
13. Azcuy, G.; López, C.M.; "Acidez y electroconductividad en muestras individuales de lluvia y su relación con los factores meteorológicos". Presentado en la IV Conferencia Científica de Ciencias Naturales. Universidad de la Habana. 1984.

ANEXO

Figura 2. Ubicación de las estaciones donde se ejecutaron los trabajos experimentales para la Tesis.

