

20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA



"ESTUDIO DE LA RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B" EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO".

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIADO EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A :

ANA ELIA HERNANDEZ ORDOÑEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. MAURO VALDES BARRON

MEXICO, D. F.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES RODOLFO Y ANITA, POR EL APOYO CONSTANTE E INAGOTABLE QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO.

A MIS HERMANOS POR LOS BUENOS MOMENTOS QUE HEMOS TENIDO.

A MIS HIJOS ANA CARLA, DANIEL Y ALONSO POR TODO SU AMOR.

A MAURO POR SU PACIENCIA Y DEDICACION EN LA DIRECCION DE ESTA TESIS.

A TODO EL PERSONAL DEL OBSERVATORIO DE RADIACION SOLAR POR EL APOYO EN LAS MÚLTIPLES ETAPAS DE ESTA TESIS.

A CARMEN DOMINGUEZ COLIN POR SER UNA GRAN Y BUENA AMIGA.

A MIS AMIGAS KARINA Y SHERIDAN POR CREER EN MI.

A MIS BUENOS AMIGOS JUAN CARLOS Y MARIO POR SUS CONSEJOS Y COMENTARIOS.

AL INGENIERO. JESUS MARTINEZ GUERRERO POR SUS SABIOS CONSEJOS.

A JUAN CARLOS PELAEZ POR SUS ATINADOS COMENTARIOS.

A LETICIA VALDES Y ROSITA BARRON POR TODA LA AYUDA.

EN GENERAL A TODOS LOS QUE DE ALGUNA U OTRA MANERA ME AYUDARON PARA CUMPLIR CON ESTA META.

INDICE

INTRODUCCION.

CAPITULO I. CARACTERIZACION DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO	1
La Zona Metropolitana de la Ciudad de México	2
La contaminación atmosférica en la ZMCM	4
La Radiación Solar	7
La Radiación Solar Ultravioleta	9
CAPITULO II. PRINCIPIOS FISICOS DE LA RADIACION SOLAR	27
El modelo	30
Radiación Difusa	35
Los parámetros del modelo matemático	43
Los datos	43
CAPITULO III. PRESENTACION DE LA INFORMACION	49
CAPITULO IV. ANALISIS DE LA INFORMACION	60
Distribución Espacial de la Radiación Solar Ultravioleta	63
Distribución Temporal de la Radiación Solar Ultravioleta	68
CONCLUSIONES.	80

BIBLIOGRAFIA.

Introducción.

La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), representa el mayor desafío que enfrentan sus más de 20 millones de habitantes; su cotidiana convivencia con un ambiente urbano excesivamente modificado y agudizado por todos los procesos de industrialización que se llevan a cabo en la Cuenca de México, por un parque vehicular estimado en más de 3 millones de vehículos y un constante deterioro de las áreas verdes entre otros, hacen de esta ciudad un inmejorable laboratorio para el estudio de procesos físicos, sociales y las interacciones que se dan entre ellos, haciendo necesarios análisis más específicos sobre algunos problemas; con este marco de referencia, y la metodología que utiliza la climatología urbana, surge este trabajo, como estudio de caso.

El grave deterioro que aqueja la ZMCM en lo que se refiere a contaminación atmosférica, no es ajeno a los procesos que ocurren en otras atmósferas urbanas, pero si lo suficientemente preocupante por las consecuencias que acarrea en la población que se ubica en ella.

La radiación solar es la energía que impulsa todos los procesos fotoquímicos que ocurren en la atmósfera; la generación de ciertos gases en superficie como el ozono es posible gracias a la incidencia de la radiación solar, en especial la radiación solar ultravioleta sobre los compuestos orgánicos volátiles y el monóxido de carbono. Este compuesto considerado como contaminante secundario, al igual que la radiación solar, se encuentra monitoreado en la actualidad por distintas instituciones nacionales e internacionales.

El mayor número de investigaciones sobre radiación solar y los diferentes componentes de este parámetro meteorológico (radiación solar global, difusa, directa, ultravioleta en sus bandas "A" y "B", mediciones espectrales y radiación de onda larga) se llevan a cabo en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, considerado como Centro Regional Radiométrico de la Región IV (AR-IV) por la Organización Meteorológica Mundial.

Este trabajo es parte de los resultados de un proyecto de investigación denominado "La radiación solar ultravioleta en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México" y tiene como

objetivo principal: conocer el régimen en superficie de radiación solar ultravioleta en la banda "B", que llega a la ZMCM; los objetivos particulares son: evaluar la atenuación de la radiación solar ultravioleta en la banda "B", que llega a la ZMCM y relacionar las concentraciones de los diferentes contaminantes que mide la RAMA, con los diferentes niveles de radiación solar ultravioleta en superficie, para determinar si existe relación directa entre ambos. Este trabajo se enfoca hacia el espectro ultravioleta "B" de la radiación, debido a que este espectro es el que tiene mayor interacción con los fenómenos biológicos en general, y porque se han comprobado algunas afectaciones en la salud de las personas, como el cáncer de piel, las llamadas cataratas en los ojos también daños en las plantas y en los sistemas acuáticos. Es importante señalar que la radiación solar ultravioleta en la banda "B", es benéfica y necesaria tanto para el humano como para los demás organismos en dosis adecuadas.

En el primer capítulo de este trabajo se hace una descripción de la situación geográfica de la ZMCM, explicando a grandes rasgos las causas que han llevado a la ciudad a ser una de las más contaminadas en el mundo y explicando los procesos

fotoquímicos que tienen efecto en la atmósfera de la Ciudad de México, se habla también de las diversas alteraciones que provoca la contaminación en los elementos del clima, en referencia directa a las alteraciones que sufre el flujo de radiación solar. Se mencionan los estudios que se han realizado en este tema en particular y en los que nos hemos basado para profundizar en su conocimiento, así como se explica brevemente la importancia de este tipo de estudios para conocer mejor la dinámica atmosférica de la ciudad y así contribuir a que los estudios futuros de climatología cuenten con información más detallada.

En el segundo capítulo se hace una descripción de los principios físicos de la radiación solar y de la manera de calcular la energía que se transfiere en la atmósfera cuando un haz de radiación solar la atraviesa; una forma de realizar dichos cálculos es a través de la solución de la ecuación general de transferencia de radiación que se utiliza de manera sistematizada como base de modelos matemáticos que permiten simular lo que ocurre en la realidad. Se presenta también en este capítulo la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos, y parte importante de ésta es el empleo de un modelo parametrizado para calcular el flujo

de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, en una atmósfera turbia (contaminada) y en una atmósfera limpia. También con datos medidos en superficie, se comparan dos estaciones de medición, una en Ciudad Universitaria y otra estación situada en el Cerro de San Miguel, muy importantes ya que estos dos sitios cuentan con características diferentes, la primera situada en el campus universitario, dentro de la ZMCM a 2240 msnm y la segunda a 3808 msnm en la parte más alta de un bosque a 5 km de los límites de la Ciudad de México.

La obtención de los datos para la realización de este trabajo, se hizo en el Observatorio de Radiación de la UNAM, así como también en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) perteneciente al Gobierno del Distrito Federal, que cuenta con sensores de radiación solar ultravioleta, lo que permitió hacer una distribución espacial y temporal de la radiación.

En el tercer capítulo se presentan de manera gráfica los datos, tanto de radiación solar ultravioleta, como de ozono(superficial), que evidencian una alteración en el flujo de radiación solar ultravioleta en superficie, y que se puede

cuantificar con los resultados del modelo, tanto para Ciudad Universitaria, como para San Miguel, reforzando la hipótesis de una atenuación importante del flujo radiacional en superficie debido a la capa de contaminantes existentes en la atmósfera de la ZMCM.

En el cuarto capítulo, se pone de manifiesto que la atenuación del flujo radiacional que llega a la superficie en la ZMCM es significativo, y se explica el comportamiento espacial de la radiación solar ultravioleta "B", haciendo énfasis en el alto grado de relación con la distribución del ozono superficial, éste como consecuencia del comportamiento de los flujos de viento en superficie en la ZMCM; se analizan dos mapas representativos uno de la estación fría y seca y otro de la estación cálida y lluviosa, al mismo tiempo se habla del comportamiento temporal de la radiación, haciendo una descripción de la marcha de éste parámetro a lo largo de los meses del año.

Se presenta también un apartado con las conclusiones obtenidas del análisis tanto de gráficos como de los mapas estacionales, logrando en primera instancia cumplir los objetivos propuestos para este trabajo, al establecer el

comportamiento espacio-temporal de la radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, y de manera significativa corroborar las causas de la atenuación del flujo radiacional en superficie, así como cuantificar la atenuación de este importante parámetro, quedando como una tarea pendiente el análisis del comportamiento de otros contaminantes que se encuentran en la atmósfera urbana.

Por último se anexa la bibliografía consultada para la realización del presente trabajo de tesis.

CAPITULO I.

CARACTERIZACION DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), al igual que otras grandes ciudades del mundo, enfrenta una serie de problemas ambientales que afectan gravemente el suelo, el agua y el aire. La mayoría de los ríos existentes en la Cuenca de México, se encuentran entubados y contaminados con aguas residuales algunos desde su nacimiento; el suelo del área que ocupa la ZMCM esta en su totalidad cubierto por pavimento y edificaciones, disminuyendo considerablemente sus características de infiltración, drenado y sobre todo la cualidad de soporte de cobertura vegetal, agudizando el impacto de la industria y parque vehicular en la atmósfera.

En particular la contaminación atmosférica en la ZMCM representa el problema ambiental más grave al que se enfrenta a corto plazo, porque provoca daños en la salud de la población y deterioro en la calidad de vida de ésta, pero lo más significativo es que afecta por igual a los más de 20 millones de habitantes que viven en esta ciudad. Al mismo tiempo la circulación atmosférica de la ciudad no es un elemento favorable, ya que las montañas que existen alrededor

de ella y el tejido urbano impiden que haya una libre circulación de los vientos que limpie la ciudad de los contaminantes atmosféricos; aunado a esto se encuentra la presencia de inversiones térmicas que coinciden con la época seca del año y que es favorecida por la presencia de frentes fríos que provocan descenso en la temperatura de la capa superficial de aire, lo que impide la dispersión de los contaminantes y en consecuencia la concentración de éstos, otro factor que contribuye a la generación y concentración de contaminantes atmosféricos es la altitud en la que se localiza la ciudad ya que por la deficiencia de oxígeno los procesos de combustión son incompletos, generando gran cantidad de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), y de Oxidos de Nitrógeno (NO_x).

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se localiza en la porción suroeste de una cuenca cerrada con coordenadas extremas de $19^{\circ}10'$ y $19^{\circ} 40'$ de latitud Norte con $98^{\circ}50'y$ $99^{\circ}20'$ de longitud Oeste, con una elevación promedio de 2240 msnm y esta constituida propiamente por la Ciudad de México y municipios pertenecientes al Estado de México que se encuentran conurbados: Tlalnepantla, Ecatepec, Naucalpan,

Huixquilucan, Atizapán de Zaragoza, Nezahualcoyotl, Ixtapaluca, Chalco, Tultitlán, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Coacalco, Chicoloapan, Chimalhuacan, La Paz, Nicolás Romero, y Tecámac. (Mapa No. 1.1).

La altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra la ZMCM, es un factor geográfico determinante en la climatología del lugar, ya que aun al encontrarse dentro de la zona intertropical, el clima predominante es el templado con lluvias en verano (Cw) hacia el Noroeste, Oeste, Centro y Suroeste de la misma, mientras que en el Norte, Noreste, Este y Sureste el predominante es el semiseco (BS), como se puede apreciar en el Mapa No. 1.2 (Hernández, 1994).

La contaminación atmosférica, no solamente provoca malestares físicos a la población, sino es también considerada como uno más de los efectos de la urbanización que en conjunto con las características topográficas de la ciudad, son capaces de provocar alteraciones menos perceptibles para los habitantes, pero con repercusiones de igual o mayor magnitud que las provocadas en la salud, como son: alteración en los elementos climáticos, es decir: la isla de calor, la isla de lluvia, las inversiones térmicas y la atenuación del flujo de radiación solar que llega a la superficie.

La contaminación atmosférica de la ZMCM.

La contaminación atmosférica de la ZMCM es producto de la creciente urbanización y del incorrecto control de las diversas fuentes de emisión (Tolvaneras, vehículos de combustión interna y fuentes fijas, es decir instalaciones fabriles).

Las tolvaneras ocurren en la época de secas, cuando las áreas rurales que rodean a la ciudad (norte, oriente y sur), tienen escasa vegetación. Una fuente importante de polvo, es el área del lago de Texcoco, al noreste. Se conoce además que los vientos fuertes están asociados con la época de secas, debido a invasiones de aire polar que se presentan en esta época y se desplazan por la altiplanicie (Bravo, 1987).

Por otra parte, para darnos una idea de la cantidad de vehículos de combustión interna que existen en la ZMCM, el 32 % del total de los automóviles de la República Mexicana se concentran en el D. F.. El parque vehicular se ha incrementado en forma considerable, esto es más notorio cuando comparamos las cifras de vehículos existentes en 1940

(93,632 unidades) y en 1999 (3,000,000. unidades), provocando que el gran consumo de combustibles por parte de estos vehículos, constituyan la principal fuente de emisiones de contaminantes de la ZMCM.

También en la ZMCM existen 4,623 establecimientos industriales según el Inventario de Emisiones DDF-SERMANAP (1997), los cuales inyectan contaminantes a la atmósfera urbana (Instalaciones fabriles, refinerías, plantas termoeléctricas, fundiciones, calderas, plantas de proceso, etc.), de estas, alrededor de 70 son responsables del 85% de las emisiones. Estas industrias emiten a la atmósfera en forma de contaminantes atmosféricos principalmente bióxido de Azufre, el cual constituye aproximadamente el 45% del total de las emisiones. Otras sustancias emitidas por este tipo de fuente son: partículas suspendidas o aerosólicas (16%), óxidos de nitrógeno (10%), monóxido de carbono (13%) e hidrocarburos (16%) del total de las emisiones. (Bravo, 1987)

Pero un problema aun más grave que la presencia de todos estos contaminantes en la atmósfera de la ZMCM, es la frecuencia y la duración de los altos niveles de contaminación, especialmente el ozono, el cual es considerado como un contaminante secundario, es decir no es emitido

directamente por fuentes específicas sino que se forma por reacciones fotoquímicas entre los COV (compuestos orgánicos volátiles) y el monóxido de carbono; dichas reacciones son estimuladas por la radiación solar en determinadas longitudes de onda del espectro ultravioleta. Figura No. 1.1.

Como ya se mencionó, la contaminación ambiental es la causante en gran medida de las alteraciones en el comportamiento de algunos parámetros meteorológicos, los cuales a lo largo del tiempo, inciden en procesos que ocasionan variaciones climáticas; el más grave de estos procesos, es el relacionado con la alteración del balance energético. Es en las zonas urbanas, donde deben buscarse las alteraciones más notables, ya que en ellas se encuentran las fuentes más importantes de "gases invernadero", a los que se une la presencia de grandes cantidades de partículas aerosólicas en la atmósfera, la falta de áreas verdes, la generación de calor por actividades humanas y la concentración de grandes estructuras que alteran las corrientes de vientos locales y sobre todo, el balance térmico, es decir modifican los flujos de energía (radiación solar), que llegan a la superficie y su distribución posterior en forma de onda larga.

La Radiación Solar.

La radiación solar es un parámetro meteorológico que recientemente (10 años), ha tomado un papel relevante en la opinión pública, debido a las recientes investigaciones en procesos fotoquímicos, como es la formación de ozono troposférico a partir de los COV y el Monóxido de Carbono que al interaccionar con la componente ultravioleta en su banda "A", inicia el proceso de formación de ozono; en la climatología se conoce que el incremento de gases de invernadero y partículas suspendidas, ocasiona que la radiación solar sea absorbida por este tipo de contaminantes modificando los flujos de energía en superficie ocasionando variaciones climáticas; daños a la salud humana, que se relaciona con algunas enfermedades como es el caso del cáncer en la piel y de las llamadas "cataratas" en los ojos, atribuidas al componente ultravioleta de la radiación solar, particularmente en la banda "B", si los periodos de exposición son grandes.

La radiación solar es energía radiante que se propaga en forma de ondas electromagnéticas que emite el sol, es la fuente primordial de luz, energía y temperatura del planeta,

responde a todos los procesos de vida, tanto animal como vegetal y la fuerza impulsora de todos los procesos de interacción entre la atmósfera el continente y los océanos.

El espectro solar puede dividirse en tres grandes intervalos: el ultravioleta (0.290 a 0.390 μm), el visible (0.390 a 0.770 μm), y el cercano infrarrojo (0.770 a 3.50 μm); los cuales continen el 9%, 40% y 51% respectivamente de la energía total. Tabla No. 1.1 y Figura No. 1.1

TABLA NO. 1.1. DIVISION APROXIMADA DEL ESPECTRO SOLAR, POR COLORES.

COLOR	λ (μm)	
VIOLETA	0.390-0.455	
AZUL	> 0.455-0.492	
VERDE	> 0.492-0.577	
AMARILLO	> 0.577-0.597	
NARANJA	> 0.597-0.622	
ROJO	> 0.622-0.770	
		Energía (%)
ULTRAVIOLETA	< 0.4	9%
VISIBLE	0.390-0.770	40%
INFRAROJO	> 2.4	51%

Modificada de: An introduction to solar radiation. Muhammad Iqbal. 1983. Academic Press, Inc. New York.

La Radiación Solar Ultravioleta.

Para el caso específico de la radiación solar ultravioleta (objeto de estudio de este trabajo), el espectro se divide en ultravioleta cercano (0.4 a 0.3 μm), ultravioleta medio (<0.3 a 0.2 μm), ultravioleta lejano (<0.2 a 0.1 μm) y ultravioleta extremo (< 0.1 μm).

Otra clasificación de la radiación solar ultravioleta basada en los efectos biológicos que causa es la siguiente:

- Ultravioleta banda "C" con longitudes de onda menor a 0.280 μm .
- Ultravioleta banda "B" de 0.280 a 0.315 μm .
- Ultravioleta banda "A" de 0.315 a 0.4 μm .

Esta última clasificación es la que se empleará en este trabajo debido principalmente a que el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica (IGf) de la UNAM, y la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), cuentan con una red de sensores en la ZMCM, que miden específicamente en estas

longitudes de onda (Biómetros marca Solar Light modelo 501 A versión 3).

La potencia efectiva de la radiación solar ultravioleta penetrante en las partes bajas de la atmósfera se encuentra en los $0.295 \mu\text{m}$, es decir, que en esta longitud de onda se tiene la máxima respuesta eritematosa (que causa enrojecimiento de las células superficiales de la piel), y corresponde a la radiación solar ultravioleta en la banda "B" (UVB), Paltridge y Barton (1978).

Del flujo total de radiación incidente en el tope de la atmósfera las longitudes menores de $.295 \mu\text{m}$, son absorbidas por los gases atmosféricos, principalmente por la banda de absorción de ozono de Hartley, (longitudes mayores de $0.220-0.295 \mu\text{m}$), y por la banda de Huggins (longitudes de onda de 0.300 a $0.360 \mu\text{m}$), parte de esta radiación es reflejada hacia el espacio y una pequeña parte llega a la superficie terrestre.

Existen diferentes flujos de radiación solar, el flujo directo que es el que llega al punto en la dirección sol-observador, la radiación solar difusa que es dispersada por gases, partículas y nubes hacia el punto de observación y la

radiación solar reflejada que regresa hacia las capas superiores de la atmósfera después de reflejarse en las nubes y en la superficie terrestre.

En la bibliografía internacional existen investigaciones que muestran, como parte de sus resultados, una atenuación en el flujo de radiación solar, un ejemplo es la ciudad de Ibadán en Nigeria donde del total incidente de radiación total global se reporta una disminución del 12.5 al 22% entre la rural y la incidente en el centro de la ciudad. Esta situación se atribuye a los efectos crecientes de la dispersión y absorción de contaminantes atmosféricos hacia el centro de la ciudad. También en la ciudad de Delhi en la India existen diferencias en la cantidad de radiación de onda corta entre la zona urbana y rural aunque en menor cantidad. Ello puede atribuirse a que los niveles de contaminación son comparativamente más elevados en las ciudades. Landsberg, (1981).

Al referirnos a la atenuación del flujo de radiación solar es muy importante explicar que la atenuación no se distribuye uniformemente en todo el espectro solar. Las longitudes de onda corta son las más afectadas, particularmente el espectro ultravioleta sufre mayor pérdida en comparación con el

infrarrojo. Se ha observado en varias ciudades industriales, que en época invernal toda la energía de radiación de longitudes de onda menores o iguales a $0.4 \mu\text{m}$ es completamente absorbida. Taesler, (1984).

La disminución y hasta la pérdida de radiación ultravioleta que llega a la superficie se ha observado frecuentemente en algunas otras ciudades, en Leincester, Inglaterra en la banda de $.300 \mu\text{m}$ se registró un 30 % de atenuación; en la cuenca de los Angeles mediciones en días individuales indicaron pérdida en la irradiancia ultravioleta del 50% y para un periodo de mediciones más largo de agosto a noviembre de 1973, un promedio de reducción del 11% en el aeropuerto internacional de Los Angeles y del 20% en El Monte (una segunda estación dentro de la cuenca de los Angeles), (Peterson et al, 1978).

En la actualidad existen estudios para conocer el régimen de Radiación Solar en sus diferentes componentes: Radiación solar difusa, directa y la suma de estas dos la radiación solar global así como los estudios encaminados a evaluar la disponibilidad de radiación solar en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Jauregui E., (1978), Muhlia y Chavez, (1980), Galindo I., y Valdés M., (1992), Valdés M., Muhlia A., Pineda B., (1998), Morales D., Et al , (1997). También se

han aplicado modelos estadísticos para describir el comportamiento de la radiación solar, en la Ciudad de México, en la estación solarimétrica de Orizabita, Hidalgo, así como también la descripción de la función de distribución solar y el comportamiento aleatorio de la insolación. Bravo, J.L, Muhlia A., Leyva A., Mota A. (1990).

Diversos trabajos demuestran que la cantidad de radiación solar ultravioleta que llega a las capas bajas de la atmósfera se ve disminuida debido a las reacciones fotoquímicas que se dan en presencia de ciertos contaminantes muy específicos, como son: partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono, ozono etc. Jauregui, (1984). Pineda y Valdés (1998) reportan como parte de su investigación un aumento en la turbiedad atmosférica y una disminución en el régimen de radiación solar directa en la Ciudad Universitaria, sin poder precisar si la energía perdida por el haz llega en forma de radiación solar difusa, o si se absorbe o refleja por los sistemas que se mencionan como modificadores del flujo de radiación (ozono estratosférico, gases uniformemente diluidos, vapor de agua, aire y partículas suspendidas).

Respecto de las investigaciones realizadas acerca del comportamiento de la componente ultravioleta de la radiación solar en México, Galindo y colaboradores (1995), reportan después de medir la radiación UV en longitudes de onda de 295-385 nm, una disminución en el flujo de radiación debido a la formación de partículas que absorben y reflejan a ésta, es decir, que atribuyen la disminución de UV en superficie a la formación de smog fotoquímico.

Este estudio demuestra también después de comparar la radiación ultravioleta medida en Ciudad Universitaria y en la Ciudad de Colima, que el flujo de radiación ultravioleta se reduce en un 31% en Ciudad Universitaria aún con la consideración de que debido a la altitud de la Ciudad de México, ésta debería ser 25% más que en la ciudad de Colima, es decir que la radiación solar ultravioleta en estas longitudes de onda se ha atenuado alrededor de un 50% en la ZMCM.

La importancia del estudio de la radiación solar en general y de la radiación ultravioleta en particular, se debe a que la radiación ultravioleta es la parte del espectro electromagnético que propicia los procesos biológicos del planeta. (Actividad fotosintética en las plantas, fijación de

minerales en los huesos humanos, actividad productiva en los ecosistemas acuáticos, etc).

Los efectos biológicos de la radiación solar ultravioleta han sido estudiados extensamente y aplicados en diversos aspectos de la salud humana como en el tratamiento de la tuberculosis, la cicatrización de heridas; pero la aplicación más conocida es la prevención y cura del raquitismo carencial (padeamiento que se da en los organismos en crecimiento que consiste en trastornos en el adecuado depósito de sales de calcio en los huesos). También se dan aplicaciones en la industria y en la salud pública y se basan en la capacidad de la radiación ultravioleta para destruir virus y bacterias; la principal utilización es en el control de las bacterias en las plantas tratadoras de agua y en la pasteurización de la leche.

El efecto más conocido que produce la radiación solar ultravioleta en el ser humano es el eritema (enrojecimiento de las células superficiales de la piel), otro efecto de la exposición a la radiación ultravioleta es el bronceado (producción del pigmento conocido como melanina y migración de este a capas bajas de la piel), y es la forma inteligente

en que el cuerpo humano se protege de la Radiación Solar Ultravioleta.

Las unidades que recomienda la OMM (desde 1981) para expresar la irradiancia y la irradiación son las del Sistema Internacional, esto es, si la energía radiante se da en Joules (J) o en sus múltiplos, el tiempo en Segundos o sus múltiplos y el área en metros cuadrados o en sus submúltiplos, entonces se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Irradiancia} &= \text{J/s/m}^2 = \text{W/m}^2 \quad (1\text{W} = 1\text{J/s}) \\ [\text{Irradiación}] &= \text{J/m}^2 \end{aligned}$$

Para la radiación solar ultravioleta, y por razones médicas se emplean las unidades llamadas MED (Minimum Erythema Dose), o MED/hora; es necesario mencionar que los instrumentos que se usan para medir la radiación solar ultravioleta y específicamente la ultravioleta banda "B", tienen como característica principal la de tener una respuesta espectral similar a la acción efectiva espectral para producir el Eritema, la llamada "Erythema Sensitivity Spectrum" (McKinlay and Diffey, 1987), cuyos valores para

cada longitud de onda de la radiación representan la efectividad de su acción para "quemar", por lo tanto lo que mide el radiómetro es la suma sobre todas las longitudes de onda (integral) de la irradiancia espectral (irradiancia por unidad de longitud de onda $W/cm^2/nm$) multiplicada por su efectividad espectral para "quemar", a esta integral se le llama Potencia Efectiva Eritemagénica.

Una irradiancia de 1 MED/hora = $0.0583 W/m^2$ según Parrish (1982), equivalencia aceptada por la OMS y la OMM, si esta irradiancia se aplica a una piel de tipo II (el tipo de piel se clasifica del I al VI) durante una hora, esto da como resultado una irradiación biológicamente efectiva (o simplemente dosis efectiva) de 1 MED y cuya equivalencia en joules sobre metro cuadrado es:

$$1 \text{ MED} = 210 \text{ J/m}^2.$$

La dosis biológicamente efectiva se calcula integrando la irradiancia biológicamente efectiva (o potencia efectiva) sobre el periodo de tiempo de exposición.

Una fórmula general para calcular estas dosis efectivas, en MED's, es:

Dosis efectiva (MED) = (Potencia Efectiva, en MED/hora) x
(Tiempo, en horas).

Por iniciativa de la OMM conjuntamente con la UNEP y la OMS, desde 1994 a través de la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante, se dieron a la tarea de crear un índice ultravioleta basado en los siguientes criterios:

- Utilizar el espectro de acción efectiva de la CIE (Commission Internationale d'Eclairage, 1987) normalizado a 1 para la longitud de onda de 297nm (McKinlay and Diffey, 1987);
- Se requiere que al menos se reporten valores de la irradiancia efectiva a medio día solar local (a la hora de la culminación);
- El Índice UV (IUV) se estimará multiplicando el valor de la irradiancia efectiva, en W/m^2 por 40.0, y se propone que el valor de la irradiancia efectiva sea el valor máximo del día, obtenido del promedio de mediciones realizadas en periodos de 10 a 30 minutos, bajo condiciones de variabilidad mínima durante 10 minutos; pero esto no quiere decir que el IUV no

puede calcularse para cualesquier otro valor de la irradiancia efectiva (de preferencia).

De acuerdo a esta definición, resulta que si el IUV es 1, este tiene una equivalencia de 1/40.0 de W/m^2 , es decir:

$$0.025 W/m^2 = 1IUV \text{ (el IUV es 1) si la irradiancia efectiva de } 0.025 w/m^2$$

Existe también una equivalencia entre el MED/hora y los IUV, de la siguiente manera:

Sí,

$$1MED/Hora = 0.0583 W/m^2,$$

entonces,

$$0.0583 W/m^2 = 0.025 W/m^2 \times 2.332 = 2.332 IUVs$$

Dicho de otra forma: Si la razón a la que llega la radiación UVB es R, dada en MED/hora, entonces el IUV se calculará como sigue:

$$IUV = R \times 2.332$$

Por ejemplo, si $R = 5$ MED/hora, entonces el índice UV será,

$$IUV = 5 \times 2.332 = 11.66$$

Y si lo redondeamos al entero más próximo, este índice es,

$$IUV = 12$$

Otra precaución que se debe tomar al exponerse a cierta dosis efectiva de radiación ultravioleta "B", es estimar el tiempo de exposición mínima antes de llegar a efectos en la piel no deseables. Estos tiempos se pueden estimar como sigue:

Sí,

$$\text{Dosis efectiva} = R \times T_e$$

en donde, R es la irradiancia (razón a la que está llegando la energía radiante) y T_e es el tiempo de exposición, de la expresión anterior se tiene que,

$$T_e = (\text{dosis efectiva}) / R$$

Como hemos visto para el caso de la radiación solar ultravioleta banda "B", lo más conveniente es usar los MED's

y los MED/hora para expresar la dosis efectiva y la irradiancia efectiva R, así las unidades Te serán horas o fracciones de hora en décimos.

En el ámbito internacional es cada vez más común el uso del Índice UV, para expresar la irradiancia efectiva a través de su equivalencia en W/m^2 ($0.025 W/m^2 = 1 IUUV$).

En la tabla que se presenta enseguida, se dan los tiempos de exposición "máximos" a los que se puede exponer una piel tipo II a una dosis efectiva de $210 J/m^2$, antes de tener efectos no deseados, fueron calculados de acuerdo al valor del IUUV, de 1 a 10.

Los tiempos de exposición que aparecen en esta tabla se calcularon con la misma fórmula, para una dosis efectiva de $210 J/m^2$, dividiendo el resultado entre 3600 para expresar este tiempo en horas.

Indice UV	Equivalencia del IUV en W/m²	Tiempo de exposición (Te) Horas
1	0.025	2.333
2	0.050	1.167
3	0.075	0.778
4	0.100	0.583
5	0.125	0.467
6	0.150	0.389
7	0.175	0.333
8	0.200	0.292
9	0.225	0.259
10	0.250	0.233

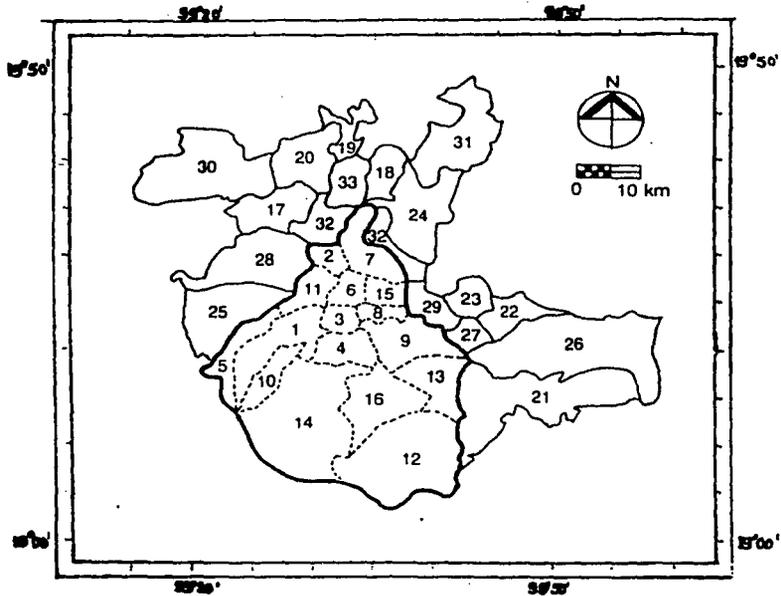
Dada la importancia de la radiación solar ultravioleta por los efectos que causa en la salud humana y para propósitos de climatología, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se creó una red de radiación solar ultravioleta perteneciente a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA); esta red de monitoreo, es única en América Latina, lo que permite que en la ZMCM se desarrollen investigaciones encaminadas al mejor conocimiento de los fenómenos atmosféricos que suceden

en ella. Esto es de suma importancia para la investigación en radiación solar que se hace en México ya que en la Zona Metropolitana de la ciudad no existen registros específicos de información tan detallada de la radiación solar ultravioleta en la banda "B".

Por lo anterior este trabajo constituye una evaluación preliminar del flujo de radiación solar ultravioleta en la banda "B", enmarcado en los estudios de la climatología urbana, para conocer el régimen radiacional que existe en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y evaluar la atenuación que sufra, buscando una relación con los contaminantes que se encuentran en la atmósfera; ya que el conocimiento de estos fenómenos, (para este caso en particular la atenuación de radiación solar UVB) permitirá avanzar en las investigaciones de dinámica atmosférica, contaminación atmosférica y salud humana; así como alteraciones que presenten los recursos de esta zona.

MAPA No. 1.1.

Zona Metropolitana de la Ciudad de México: delegaciones políticas del Distrito Federal y municipios conurbados del Estado de México



Delegaciones del D.F.

- 1 Álvaro Obregón
- 2 Azcapotzalco
- 3 Benito Juárez
- 4 Coyoacán
- 5 Cuajimalpa
- 6 Cuauhtémoc
- 7 Gustavo A. Madero
- 8 Iztacalco
- 9 Iztapalapa
- 10 Magdalena Contreras
- 11 Miguel Hidalgo
- 12 Milpa Alta
- 13 Tláhuac
- 14 Tlalpan
- 15 Venustiano Carranza
- 16 Xochimilco

Municipios conurbados del Estado de México

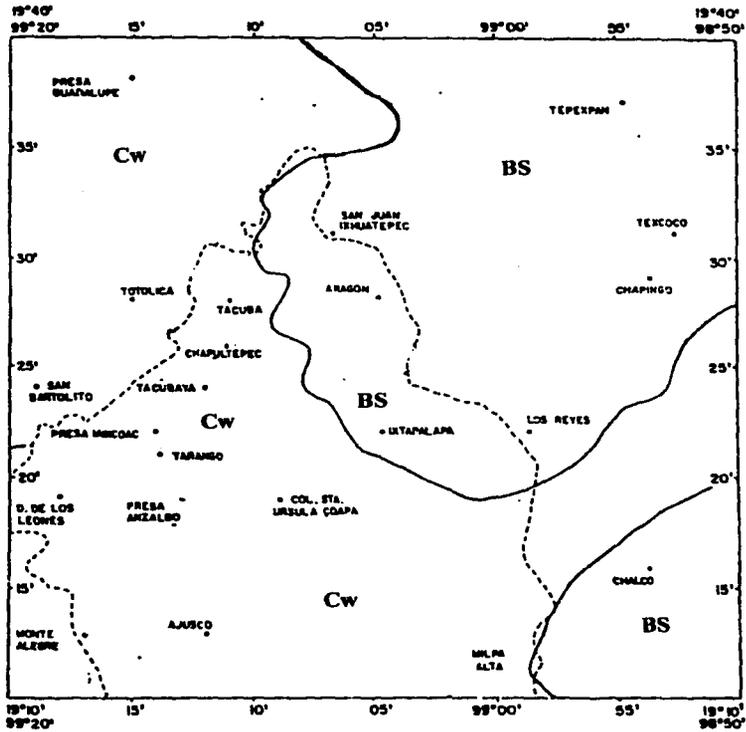
- 17 Alizapán de Zaragoza
- 18 Coacalco
- 19 Cuautitlán
- 20 Cuautitlán Izcalli
- 21 Chalco
- 22 Chicoloapan
- 23 Chimalhuacán
- 24 Ecatepec
- 25 Huixquilucan
- 26 Ixtapaluca
- 27 La Paz
- 28 Naucalpan de Juárez
- 29 Nezahualcóyotl
- 30 Nicolás Romero
- 31 Tecámac
- 32 Tlalneantla
- 33 Tultitlán

- Distrito Federal
- - - - - Delegaciones políticas del D.F.
- Límite de municipios

Fuente: Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica, Secretaría Técnica Intergubernamental, 1990.

MAPA No.1.2

CLIMAS DE LA CIUDAD DE MEXICO Y MUNICIPIOS
CONURBADOS DURANTE 1981-1990.



SIMBOLOGIA:

- Estación meteorológica

ESCALA

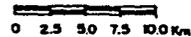
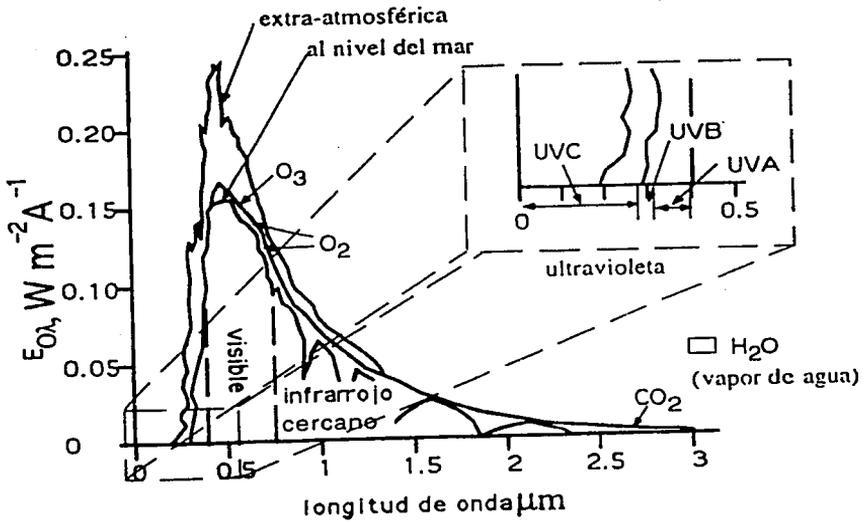


Figura No. 1.1



Distribución de la irradiancia en el espectro solar.

CAPITULO II

PRINCIPIOS FISICOS DE LA RADIACION SOLAR.

La radiación electromagnética interactúa con la materia a través de tres mecanismos básicos: absorción, dispersión o esparcimiento y emisión. Un haz de radiación solar se atenúa en proporción con la densidad y las características físicas y químicas del medio a través del cual pasa (en este caso la atmósfera terrestre). Juntos la absorción y la dispersión constituyen lo que se denomina "extinción" de la energía que se propaga en forma de flujo de radiación. Estas interacciones se encuentran gobernadas por una serie de leyes que describen los procesos físicos que tienen lugar durante la transferencia de radiación en la atmósfera.

Enseguida se definirá cada uno de los mecanismos básicos de la interacción de la radiación solar con la atmósfera; es decir lo que se ha dado por llamar "Ecuación de la transferencia de radiación en la atmósfera".

En forma sencilla ésta ecuación se establece de la siguiente manera:

Un haz de radiación que atraviesa un medio (gaseoso) sufre una atenuación al interactuar con la materia de que esta

formado debido básicamente a la aparición de dos fenómenos a saber: la absorción y la dispersión (esparcimiento de la radiación incidente).

Si la intensidad de la radiación incidente monocromática, I_λ , como consecuencia de esos fenómenos sufre un cambio expresado como $I_\lambda + dI_\lambda$ al atravesar un elemento de espesor ds , en la dirección de su propagación la pérdida en la intensidad es:

$$dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds,$$

en donde ρ es la densidad del material y κ_λ es la sección transversal de atenuación, por unidad de masa y unidad de área, de la radiación de longitud de onda λ .

La atenuación debe considerarse como el fenómeno resultado de la suma de la absorción y la dispersión (esparcimiento). La intensidad de radiación también puede verse incrementada por la aparición del fenómeno de la emisión de radiación del propio material (emisión de Cuerpo Negro) y alguna radiación de la misma longitud de onda dispersada, en la dirección del haz, por el material circundante llamada dispersión múltiple.

El incremento en la intensidad debido a la emisión y la dispersión múltiple se expresa en términos de lo que se denomina coeficiente de la función fuente, j_λ , de la siguiente forma:

$$dl_\lambda = j_\lambda \phi ds$$

Si ahora se suman las "perdidas" y "ganancias", en total se tiene que el cambio que sufre la intensidad es:

$$dl_\lambda = -\kappa_\lambda \phi l_\lambda ds + j_\lambda \phi ds$$

Si la función fuente se expresa como

$$J_\lambda = j_\lambda / \kappa_\lambda$$

entonces:
$$\frac{dl_\lambda}{\kappa_\lambda \phi ds} = -l_\lambda + J_\lambda$$

Esta es la llamada Ecuación (General) de la transferencia de radiación.

Si la emisión y la dispersión múltiple son despreciables, ésta ecuación es la forma diferencial de la Ley de Bouguert-Lambert-Beer.

La Ley de Bouguert-Lamber-Beer dice que en ausencia de dispersión múltiple y emisión, la intensidad de la absorción disminuye exponencialmente con el espesor óptico, el cual está dado como el producto de la distancia que atraviesa la radiación considerada, la densidad y el poder de atenuación (absorción + dispersión) del medio.

Para llegar a la solución de la ecuación general de la transferencia de radiación, se han desarrollado diversos métodos que se aproximan a la solución general; proponiendo modelos simplificados de atmósfera, simplificando la ecuación general de transferencia de radiación de acuerdo con el objetivo que se persiga en la investigación.

EL MODELO.

En este trabajo, se utiliza un modelo de atmósfera que permite una solución parametrizada obtenida por el método de dos haces, y que nos permite cuantificar la cantidad de UVB que llegaría a la superficie atravesando una atmósfera

limpia, es decir en donde solamente exista absorción y dispersión o esparcimiento debidas al ozono estratosférico, aire, y partículas suspendidas, éste modelo será para utilizarlo como referencia y comparación con los resultados del análisis de los datos de campo. El método de dos haces ha sido utilizado por numerosos autores, para conseguir una rápida aproximación a la solución de la ecuación general de transferencia de radiación, a través de la separación del campo de radiación en dos flujos, es decir, el flujo de radiación hacia arriba y hacia abajo.

La solución mencionada, se expresa en forma de un modelo matemático, éste es una modificación de Peláez (1998) a, Paltridge y Barton (1978), para cuantificar la cantidad de UVB que llega a la superficie terrestre y que atraviesa una atmósfera limpia, y una atmósfera turbia.

Es importante mencionar que con este modelo se obtiene la irradiancia solar directa, y la irradiancia solar difusa para poder así calcular la irradiancia solar global.

Los cálculos de la irradiancia (que es la cantidad de energía por unidad de tiempo, por unidad de área y por unidad de longitud de onda), se hacen a partir de la irradiancia solar

espectral I_{λ} en el tope de la atmósfera o sea la llamada constante solar espectral (cantidad calculada de radiación solar fuera de la atmósfera). En este caso el valor medio para cualquiera de las longitudes de onda en el ultravioleta se calcula con el siguiente ajuste: (Green *et al.*) 1974.

$$I_{\lambda} = 0.0552[1 + (\lambda - 300)/37.0], \quad (1)$$

Donde λ es la longitud de onda en nanómetros y I_{λ} está en $\text{mWcm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$.

Como la distancia tierra-sol varía a lo largo del año, la constante solar actual varía aproximadamente en $\pm 3\%$, entonces:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda} f \quad (2)$$

en donde:

$$f = 1.000110 + 0.034221 \cos \theta_0 + 0.001280 \sin \theta_0 + 0.000719 \cos 2\theta_0 - 0.000077 \sin 2\theta_0,$$

(3)

$$\theta_0 = 2\pi d_0 / 365$$

en donde d_0 , es el día del año, (Spencer, 1971)

El espesor óptico producido por la dispersión de Rayleigh, es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda y es por eso altamente significativa en la región ultravioleta del espectro; es decir que el flujo de la radiación ultravioleta difusa llega a ser del mismo orden de la densidad del flujo directo.

La fórmula del espesor óptico por dispersión de Rayleigh (referencia) es:

$$\tau'_{Ra} = 0.00888\lambda^{-4.05} \quad (4)$$

y se utiliza cuando λ está expresada en micrómetros.

La masa óptica relativa del aire requerida para calcular la dispersión de Rayleigh, es muy cercana a la secante del ángulo zenital del sol, ya que la mayoría de la dispersión ocurre en la baja atmósfera y el efecto de la curvatura de la tierra es poco significativo.

El espesor óptico vertical del ozono varía con la concentración total de ozono (con respecto de la columna vertical) y la longitud de onda. De acuerdo con Green *et al* (1974) una expresión analítica para esto es:

$$\tau'o = A_o (\exp - [(\lambda - 300/8.0)]) \quad (5)$$

donde τ_o es el espesor óptico del ozono, A_o es la cantidad de ozono en la columna vertical (mm) y λ longitud de onda en nanómetros.

La masa óptica relativa del ozono m_o es una función del ángulo zenital θ , ya que la absorción dominante ocurre a grandes altitudes donde el efecto de la curvatura de la tierra es muy significativo y la relación simple de la secante es una aproximación pobre. Una expresión más exacta para este propósito es: (Green, 1966)

$$m_o = [1 - \sin^2\theta / (1.003689)^2]^{-1/2} \quad (6)$$

Esta relación asume que la absorción del ozono ocurre a 23.5 km de altitud sobre la superficie terrestre.

El espesor óptico del aerosol varía con la longitud de onda, pero en dependencia con el tipo de aerosol. Con alguna limitante ésta dependencia es aproximadamente proporcional a $\lambda^{-1.3}$. Por lo tanto en este trabajo se asume que:

$$\tau'_{\lambda} = \tau'_{\lambda_o} \lambda^{-1.3}, \quad (7)$$

donde λ es la longitud de onda y está en micrómetros y τ'_{D_0} es el espesor óptico vertical relacionado directamente a la "turbiedad" atmosférica provocada por las partículas del aerosol, para una longitud de onda de 1 μm . La turbiedad se mide rutinariamente en numerosos sitios, como ejemplo del orden de magnitud que alcanza, el promedio anual τ'_{D_0} de Aspendale (Australia) es de 0.03; por lo tanto si sustituimos éste valor en la ecuación (7), τ'_{D_0} es aproximadamente de 0.1 en la longitud de onda de 300 nm. La masa óptica relativa del aerosol m_D es nuevamente la simple secante de θ debido a que la mayor concentración del aerosol está presente en los bajos niveles de la atmósfera.

Los cálculos de la irradiancia espectral pueden hacerse a intervalos de 2 nanómetros a lo largo de todo el espectro desde los 291 a 317 nm.

RADIACION DIFUSA.

Una parte de la radiación dispersada del flujo directo de la radiación regresa al espacio, pero una cantidad variable (dependiendo de la cantidad de aire, de la cantidad de ozono, de la cantidad de partículas y de la altura solar) contribuye

al total del flujo global de radiación incidente en la superficie.

El modelo de atmósfera utilizado considera: primero, la atmósfera se divide en tres capas; se asume inicialmente que toda la absorción del ozono se da en las capas superiores, toda la dispersión de Rayleigh tiene lugar en la capa intermedia y toda la extinción del aerosol tiene lugar en la capa más baja. figura 2.1

La generación de radiación difusa ocurre principalmente en las dos capas inferiores.

La atmósfera se simplifica de esta manera, con el propósito de enfatizar que estos tres fenómenos que ocurren son independientes entre ellos.

Considerando primero la presencia de radiación difusa debida a la dispersión del aire (Rayleigh) a partir de la interacción del flujo de radiación directa, la cantidad generada, W_R se describe así:

$$W_{Rd} = I_{0d} \exp(-\tau_{0d}) [1 - \exp(-\tau_{Rd})] \quad (8)$$

donde, W_{ra} es la radiación difusa que se genera de la dispersión del aire τ_{ra} (Rayleigh), y la interacción de la capa de absorción de ozono $\tau_{o\lambda}$.

Enseguida la radiación difusa es nuevamente dispersada por la atmósfera generando así el flujo hacia abajo o D_{ra} hasta tocar la superficie, esta radiación difusa se asume como isotrópica (su intensidad es independiente de la dirección de donde proviene); y se expresa de la siguiente manera:

$$D_{ra} = I_{o\lambda} \exp(-\tau_{o\lambda}) [f_o - \exp(-\tau_{ra})] \quad (9)$$

Donde D_{ra} es el flujo de radiación difusa hacia abajo, $I_{o\lambda}$ es la irradiancia espectral extra-atmosférica, $\tau_{o\lambda}$ el espesor óptico por absorción del ozono y τ_{ra} es el espesor óptico por dispersión de Rayleigh.

Esta relación contiene el factor

$$f_o = \frac{Z(\tau'_{ra}, \cos\theta)}{1 - S(\tau'_{ra})\alpha_o} \quad (10)$$

donde Z es una función del espesor óptico de dispersión de Rayleigh y de $\cos\theta$, S es únicamente función de la dispersión de Rayleigh y α_s es el albedo de la superficie. Aquí debe notarse que la relación inherente implica la presencia de reflexión múltiple de la radiación; entre la superficie y la atmósfera contigua o atmósfera de dispersión de Rayleigh.

Utilizando el ajuste por mínimos cuadrados, las dos funciones Z y S se aproximaron analíticamente a

$$Z = 1 - \ln[1 + a(\tau'_{R\lambda})^b], \quad (11)$$

Donde:

$$a = 1.1317 \exp(-1.0284 \cos\theta),$$

$$b = 0.943 + 0.1561 \ln(\cos\theta),$$

$$S = 0.47(\tau'_R)^{0.73} \quad (12)$$

Se considera también que una vez que ocurre la dispersión por el aire o dispersión de Rayleigh, esta radiación no vuelve a ser dispersada por las moléculas del aire; si bien se considera también la generación de radiación difusa por el polvo, en la capa 3 (dispersión y absorción por el aerosol).

La dispersión de la radiación por las partículas que forman el aerosol se puede considerar anisotrópica.

Es raro encontrar información acerca de los diagramas de dispersión de las partículas por lo que en este trabajo se asume el patrón de dispersión para la capa del aerosol en una forma estandarizada dada por $p(\phi)$;

$$p(\phi) \propto a_0 / (b_0 - \cos\phi), \quad (13)$$

Donde ϕ es el ángulo de la dirección del proesparcimiento (hacia delante) y a_0 y b_0 son constantes.

El flujo de radiación esparcido hacia adelante $D_{D\lambda}$ atribuido a la dispersión por las partículas que forman al aerosol choca con la superficie y tiene dos componentes:

(a) el componente $D_{D\lambda}$, deriva directamente de la dispersión (con dirección hacia delante) de la radiación directa por el aerosol, llamada

$$D_{D\lambda} = \int_{\phi=-\theta}^{\phi=\pi-\theta} W_{D\lambda} \cdot p(\phi) \cdot \cos\phi d\phi, \quad (14)$$

(b) el componente $D_{D2\lambda}$, deriva también de la dispersión (con dirección hacia atrás) de la radiación directa por el aerosol, que ha sido regresada hacia la superficie después de ser dispersada en la capa no. 2,

(c)

$$D_{D2\lambda} = \alpha_R \int_{\phi=\pi-\theta}^{\phi=\theta} W_{D\lambda} \cdot \rho(\phi) \cdot \cos\phi d\phi. \quad (15)$$

En esta expresión α_R es el albedo atmosférico debido a la dispersión de Rayleigh de la radiación difusa hacia arriba, la generación de radiación difusa $W_{D\lambda}$ esta expresada en la siguiente ecuación

$$W_{D\lambda} = k I_{D\lambda} \exp[-(\tau_{O\lambda} + \tau_{R\lambda})] [1 - \exp(-\tau_{D\lambda})], \quad (16)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad del espesor óptico del aerosol del total del espesor óptico por extinción; y las integrales numéricas requeridas en las ecuaciones (14) y (15) fueron realizadas considerando intervalos de 5° .

Quizás el primer defecto del modelo es el hecho de asumir que toda la absorción de la radiación por ozono ocurre sobre la

región de dispersión de Rayleigh y entonces se limita a la radiación directa.

Por lo tanto la ecuación (9) se modifica considerando el concepto de que una fracción f_1 del total del ozono atmosférico existe por debajo de la capa no. 2 y por lo tanto puede contribuir a la absorción de la radiación difusa esparcida por el aire. (Dispersión de Rayleigh). Ya que en la realidad la distribución del ozono se da a lo largo de la capa intermedia, no es sorprendente que la obtención de respuestas numéricas correctas al cálculo de la densidad del flujo de radiación difusa, la fracción f_1 , esté en función del ángulo zenital del sol, aquí está ajustado por comparación con un modelo de transferencia de radiación basado en los trabajos de Stephens (1976); de ésta comparación resulta la siguiente ecuación empírica.

$$f_1 = 0.13(\cos\theta)^{1/2} \quad (17)$$

A partir del cálculo de ésta función se modifica la ecuación (9) a

$$D_{RA} = f_{0, \lambda} \exp(-\tau_{CA}) [f_0 - \exp(-\tau_{RA})] \quad (18)$$

El albedo de la superficie que requiere la ecuación (10) debe ser el valor apropiado para las longitudes de onda de la región ultravioleta que normalmente es mucho menor que el utilizado cuando se calcula la radiación solar global.

También está en función del ángulo zenital del sol. En referencia a Paltridge y Platt (1976) los valores usados se generaron de acuerdo con:

$$\alpha_g(\theta) = \alpha_1 + (1 - \alpha_1) \exp[-0.1(90 - \theta)], \quad (19)$$

donde α_1 se considera con valor de 0.1, y θ se mide en grados.

El total del flujo de radiación difusa hacia abajo D para determinada longitud de onda λ es, por lo tanto

$$D_\lambda = D_{RA} + D_{D1\lambda} + D_{D2\lambda}, \quad (20)$$

Y el total del flujo de radiación espectral difusa D (y su correspondiente dosis eritematosa) se calcula por integración

númerica considerando intervalos de 2 nm como en el caso de la componente de la radiación espectral directa. Finalmente la densidad de flujo de radiación espectral global total F_{\downarrow} se expresa así:

$$F_{\downarrow} = I \cos \theta + D \quad (21)$$

LOS PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO

Los datos de entrada del modelo son: altura angular aparente del Sol, cantidad de ozono y parámetros de turbiedad en la atmósfera así como el albedo de la superficie.

LOS DATOS

Los datos de Radiación Ultravioleta banda "B" que actualmente existen para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son los que registra la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación a través de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que cuenta con 32 estaciones distribuidas en el área metropolitana (mapa 2.1) en las que se miden tanto parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, presión, precipitación, dirección y

velocidad del viento), como concentraciones de contaminantes (partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, monóxido de azufre y ozono). Sólo 10 de estas estaciones cuentan con sensores de radiación solar ultravioleta en sus bandas "A" y "B". (Radiómetros Solar Light) y son las siguientes: Estación Merced, Hangares, San Agustín, Tlalnepantla, Pedregal, Cuajimalpa, ENEP Acatlán, Tlahuac, Cerro de la Estrella y Chapingo.

Además existe la base de datos del Observatorio de Radiación Solar (ORS), del Instituto de Geofísica que es a su vez Centro Regional para la medición de la Radiación Solar de la región IV (AR-IV) de la O.M.M., que se registran en el campus de Ciudad Universitaria y que se miden desde 1991; éstas mediciones son: UVA (290-385) nm con el radiómetro Eppley modelo TUVR (Total Ultraviolet Radiometer) y desde 1997 para UVB con el radiómetro Solar Light modelo 501 A versión 3, con una respuesta espectral de 300 a 410 nm ponderada con la función de actividad eritemagénica CIE (Comisión Internacional para los Estudios de Iluminación), por sus siglas en francés.

Para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo, se utilizan los datos proporcionados por la RAMA, actualmente

esta red se encuentra en proceso de calibración de sus sensores y de la instalación de fibra óptica para la transmisión de los datos, así como la validación y análisis de estos con la finalidad de proporcionar datos de alta confiabilidad, por lo que se elegirán las estaciones en las cuales dicho proceso haya concluido, así como también las que proporcionen información sobre contaminantes.

Es importante mencionar que los datos de radiación solar UVB y los datos de contaminantes tienen la misma resolución espacio-temporal, lo que permitirá buscar una relación entre ellos.

Al mismo tiempo se utilizan los datos proporcionados por el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, como una estación más para complementar la información.

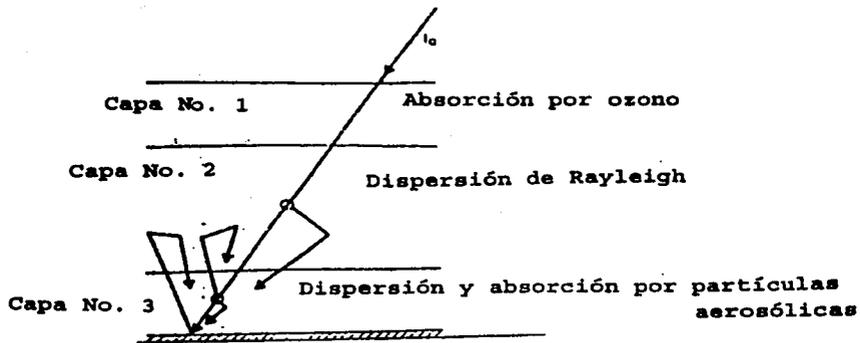
Se elaboran gráficas de los diferentes parámetros con la finalidad de distinguir alteraciones en la radiación solar UVB con respecto a las que se esperarían en condiciones de atmósfera limpia, así como también del ozono para encontrar algunas alteraciones o efectos sobre el flujo de radiación solar UVB.

Se elaboran gráficos para apreciar las variaciones espacio-temporales que puedan existir.

Se utiliza el modelo de Paltridge y Barton, modificado por Peláez (1998) para cuantificar la cantidad de UVB que llegaría a la superficie atravesando una atmósfera limpia y utilizarlo como referencia haciendo un análisis y comparación con los resultados que proporcionen los datos de campo.

De igual manera se utilizan datos obtenidos en una estación de monitoreo que está en el Cerro de San Miguel, en la parte más alta de la Sierra de las Cruces, cuyas coordenadas geográficas son $19^{\circ} 16'$ latitud norte y $99^{\circ} 19'$ longitud este, y su altitud es de 3808 msnm; las mediciones hechas en este lugar son muy importantes, ya que se encuentran fuera de la contaminación, es decir que la capa de mezcla de los contaminantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México queda por debajo, lo que permite tomar medidas de Radiación Solar Ultravioleta banda "B", en una atmósfera casi sin contaminantes que nos permitirá comparar el flujo que existe en una zona sin contaminación, cercana a los límites de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y el que existe dentro de ella. (Estación C.U.).

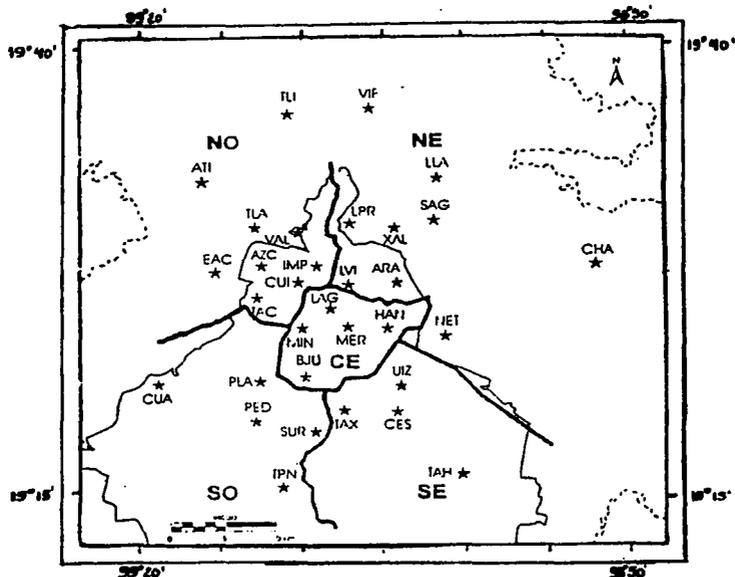
Figura 2.1



Esquema de la interacción de la radiación solar ultravioleta, con las tres principales capas atmosféricas consideradas por el modelo de atmósfera.

MAPA No. 2.1.

RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO (RAMA)



VALLEJO	VAL	LA VILLA	LVI	INSURGENTES	MIN
TACUBA	TAC	SAN AGUSTIN	SAG	SANTA URSULA	SUR
ENEP-ACATLA	EAC	XALOSTOC	XAL	PEDREGAL	PED
AZCAPOTZALCO	AZC	ARAGON	ARA	PLATEROS	PLA
TLALNEPANTLA	TLA	NETZAHUALCOYOTL	NET	CUAJIMALPA	CUA
I.M.P.	IMP	VILLA DE LAS FLORES	VIF	TLALPAN	TPN
CUITLAHUAC	CUI	CHAPINGO	CHA	CERRO DE LA ESTRELLA	CES
TUILITLAN	TLI	MERCED	MER	UAM IZTAPALAPA	UIZ
ATIZAPAN	ATI	HANGARES	HAN	TAXQUEÑA	TAX
LAURELES	LLA	BENITO JUAREZ	BJU	TLAHUAC	TAH
LA PRESA	LPR	LAGUNILLA	LG		

Fuente: Red Automática De Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

CAPITULO III

PRESENTACION DE LA INFORMACION.

Como se describió en el capítulo anterior, la estación temporal que se instala en el Cerro de San Miguel (CSM), D. F., aproximadamente a 5 km de los límites occidentales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), a más de 1000 m sobre el nivel promedio de ésta, representa un buen punto de referencia de irradiación solar ultravioleta en condiciones de atmósfera limpia. En la figura No. 3.1 se muestra un perfil topográfico entre la estación San Miguel y la ZMCM.

Durante el mes de Mayo de 1999 en el CSM se llevo a cabo un experimento de medición de parámetros meteorológicos incluyendo los diferentes componentes de la radiación solar, entre ellos la radiación solar ultravioleta en su banda "B" que denominaremos para fines prácticos RSUVB; en el gráfico No. 3.1, se muestran los valores obtenidos para el 4 de Mayo en esta estación temporal y en la de Ciudad Universitaria (CU); como se puede observar, durante la primera mitad del día, en ausencia de nubosidad los valores obtenidos en CSM fueron superiores a los de Ciudad Universitaria,

comportamiento esperado por la diferencia de altitud, pero según la literatura especializada Muhlia, 2001, este valor no debería de superar el 3% ya que la radiación solar se atenúa en un 2% por cada 1000 metros de atmósfera, pero en este caso la atenuación fue de aproximadamente 30%; para verificar la inexistencia de nubosidad durante la primera mitad del día, se graficó la radiación solar global en Ciudad Universitaria (gráfico No. 3.2), comprobando las condiciones despejadas aproximadamente hasta las 12:00, luego se verificó esta situación en los reportes horarios de las observaciones meteorológicas que se realizan en el Observatorio de Radiación Solar, los cuales reportaron cielo despejado hasta las 11:53 con 1/8 de Fractocumulus (Fc) en el horizonte.

Las condiciones anteriormente descritas, nos planteaban en principio la atenuación de la radiación por una masa importante de contaminantes.

Un primer ejercicio para comprobar y evaluar la absorción de RSUVB por la contaminación atmosférica de la ZMCM es la construcción del gráfico No. 3.3 en donde se muestran los valores de este parámetro para las estaciones Ciudad Universitaria, Pedregal, Merced, San Agustín y Chapingo en un día sin nubosidad (21 de Abril del año 2000), en el gráfico

No. 3.4 se observan los valores de ozono para esa misma fecha y estaciones, en un día que podemos considerar con bajos niveles de contaminación atmosférica.

Enseguida los gráficos No. 3.5 y 3.6 nos muestran los valores de RSUVB y ozono respectivamente, de las estaciones antes mencionadas para un día sin nubosidad y altos niveles de contaminación atmosférica (15 de Julio del año 2000).

Un siguiente paso en este proceso es la utilización del modelo parametrizado de Paltridge y Barton, (1976). Modificado por Peláez, (1998); el cual puede calcular la RSUVB con diferentes valores de turbiedad atmosférica. El uso de este modelo permitirá, en primera instancia comparar sus resultados con los valores obtenidos en el Cerro de San Miguel en condiciones de atmósfera limpia; en segundo lugar realizar esta misma comparación en una atmósfera contaminada y como resultado evaluar la atenuación de la RSUVB por contaminación atmosférica en la ZMCM.

En la tabla No. 3.1. se presentan los resultados horarios obtenidos por el modelo de Paltridge, *et al.*, para la RSUVB en la estación del Cerro de San Miguel el 1 de marzo de 2000 y los medidos en superficie directamente; para la obtención de

estos resultados se utilizó un beta (turbiedad atmosférica) de 0.063, la cual se calculó a partir de observaciones de Radiación Solar Directa medida en el lugar de observación (Robinson,1996).

En la tabla No. 3.2, se presentan los mismos cálculos realizados para la estación de la Ciudad Universitaria y los resultados de lo observado en superficie; los cálculos se realizaron con una beta de 0.08, también obtenida a partir de observaciones de Radiación Solar Directa para el mismo día en el Observatorio de Radiación Solar.

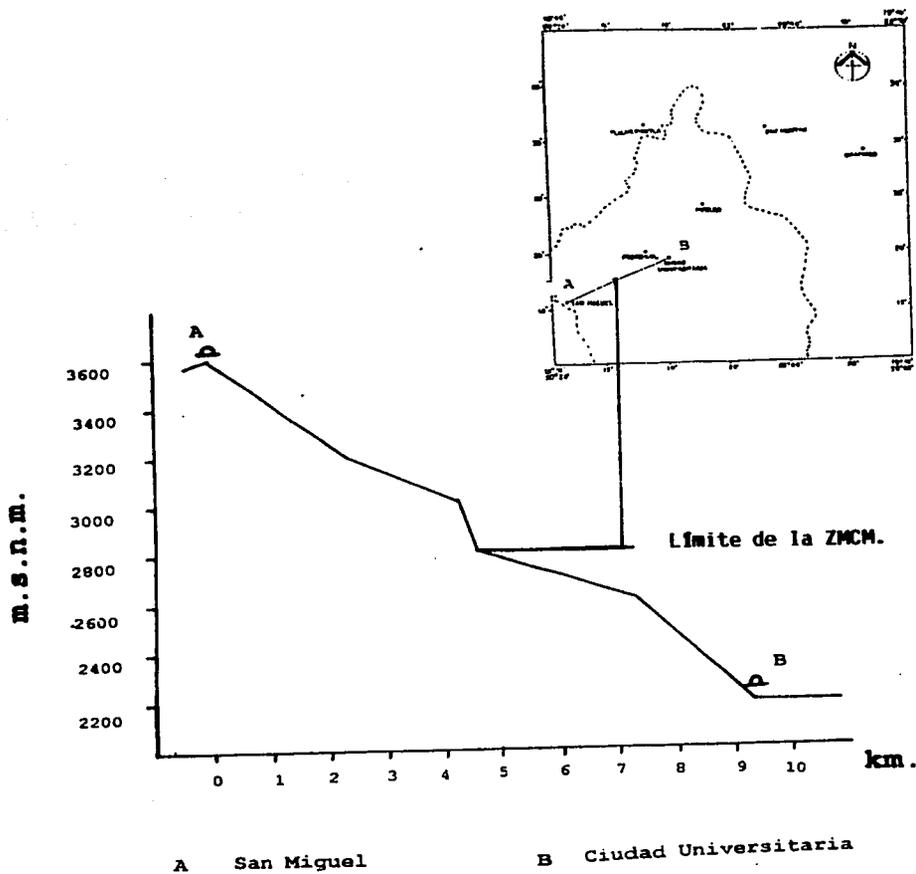
Es preciso recordar, que los cálculos realizados por el modelo, toman en cuenta, la latitud del lugar, la altitud, la época del año, la turbiedad atmosférica (calculada de observaciones de radiación solar directa para ese día en especial), la columna ozono y la presión atmosférica, y que además el cálculo se realiza por ventanas espectrales.

Por último en los gráficos 3.7. y 3.8. se presentan los resultados obtenidos por el modelo de Paltridge y Barton, modificado por Peláez, (1998). Y lo medido en superficie de RSUVB para el 1 de marzo del 2000 en la estación Cerro de San Miguel y Ciudad Universitaria respectivamente.

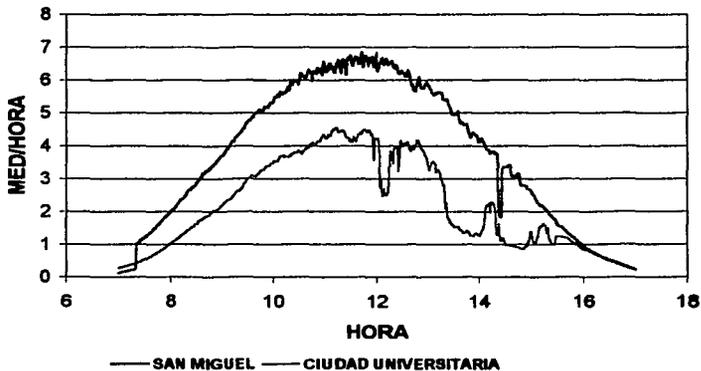
Toda la información presentada en éste capítulo constituye el primer paso en el análisis de los datos existentes; se complementa con la creación de nuevos gráficos y mapas como productos de dicho análisis en el siguiente capítulo.

Figura 3.1

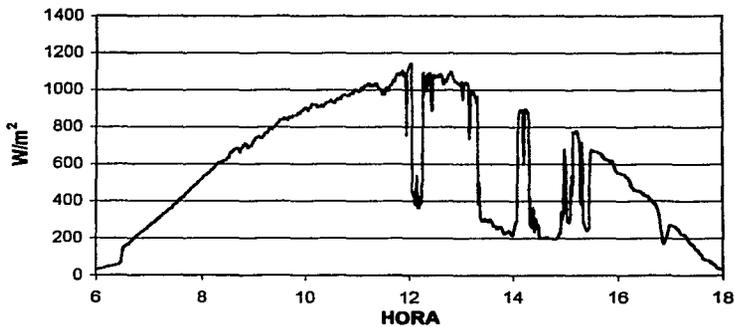
Perfil topográfico Cerro de San Miguel-Ciudad Universitaria.



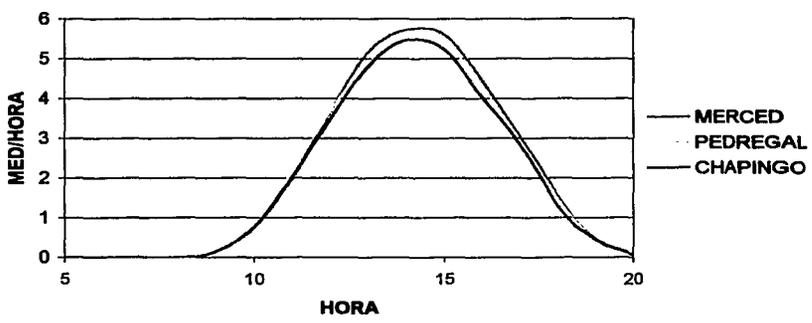
3.1. RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B"
04 MAYO 1999



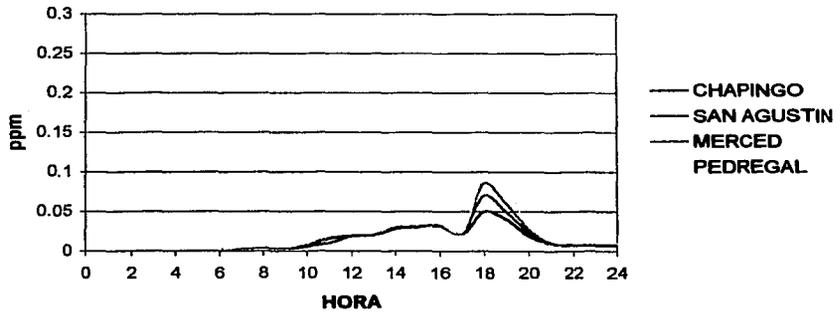
3.2. RADIACION SOLAR GLOBAL.
CIUDAD UNIVERSITARIA.
04 MAYO 1999



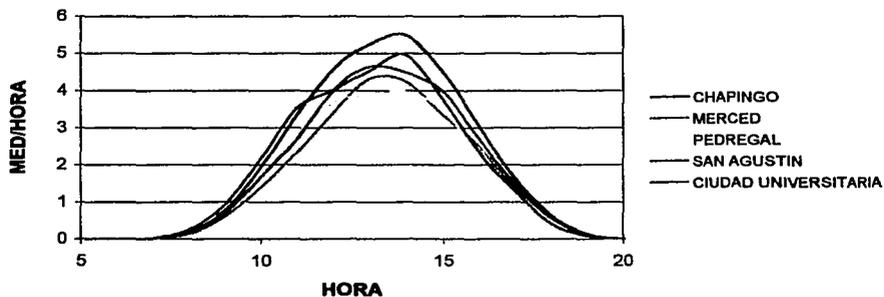
3.3. RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA "B" ABRIL 21 DEL 2000



3.4 CONCENTRACION DE OZONO. 21 ABRIL 2000.



3.5. RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA "B". 15 JULIO 2000.



3.6. CONCENTRACION DE OZONO 15 JULIO 2000.

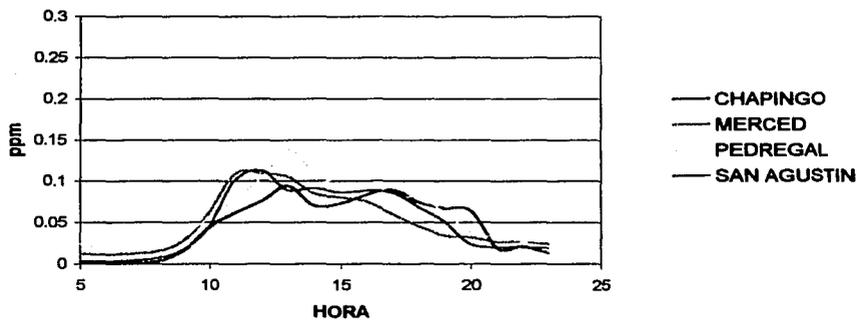


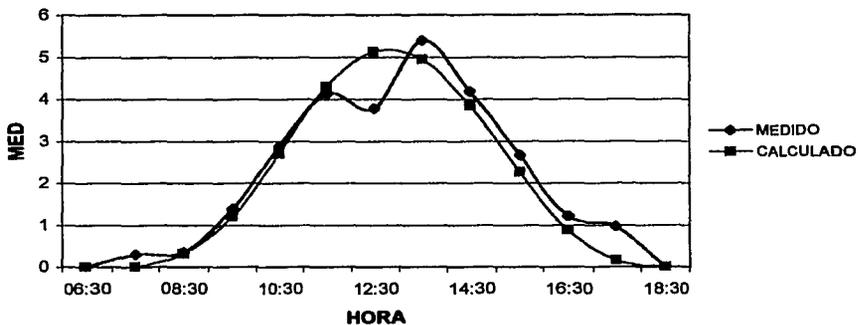
Tabla No. 3.1. Radiación solar ultravioleta "B" (RSUVB).
 Resultados para la estación San Miguel.
 1 marzo 2000.

HORA	Medido (MEDS)	Calculado (MEDS)
6:30	0.00	0.00
7:30	0.03	0.01
8:30	0.35	0.32
9:30	1.39	1.20
10:30	2.87	2.70
11:30	4.13	4.30
12:30	3.78	5.12
13:30	5.40	4.95
14:30	4.19	3.84
15:30	2.66	2.26
16:30	1.21	0.88
17:30	0.97	0.16
18:30	0.00	0.00

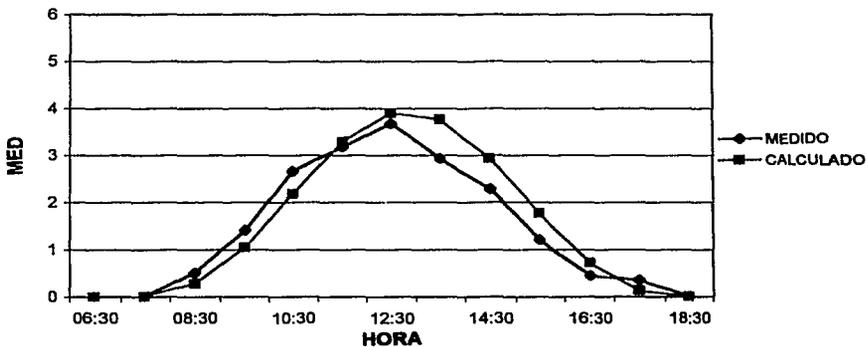
Tabla No. 3.2. Radiación solar ultravioleta "B" (RSUVB).
 Resultados para la estación Ciudad Universitaria.
 1 marzo 2000.

HORA	MEDIDO (MED)	CALCULADO (MED)
6:30	0.00	0.00
7:30	0.00	0.00
8:30	0.51	0.28
9:30	1.40	1.04
10:30	2.65	2.18
11:30	3.17	3.29
12:30	3.67	3.89
13:30	2.92	3.76
14:30	2.27	2.93
15:30	1.20	1.77
16:30	0.45	0.72
17:30	0.35	0.13
18:30	0.00	0.00

**3.7. Radiación Solar Ultravioleta Banda "B".
1 de marzo 2000. Estación San Miguel.**



**3.8. Radiación Solar Ultravioleta Banda "B".
1 marzo 2000. Estación Ciudad Universitaria.**



CAPITULO IV

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

Como pudimos observar en el gráfico No. 3.1, en apariencia existe una importante atenuación de la radiación solar, en este caso específico, radiación solar ultravioleta banda "B" en el sur de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), dicha energía puede ser absorbida, reflejada o dispersada por los diferentes contaminantes existentes; durante este trabajo solamente se ha relacionado con el ozono en la troposfera; las estaciones comparadas fueron Cerro de San Miguel y el Observatorio de Radiación Solar en Ciudad Universitaria.

En gráficos subsecuentes se compara la radiación solar ultravioleta banda "B", medida en el Observatorio de Radiación Solar, con la medida en algunas de las estaciones pertenecientes a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), ubicadas en diferentes puntos de la Cuenca de México (San Agustín, Chapingo, Tlalnepantla, Merced y Pedregal), para un día con concentraciones de ozono menores a 0.05 partes por millón (ppm); el resultado como se muestra en el gráfico No. 3.3 es una distribución homogénea de la

irradiancia en superficie, los valores obtenidos en cada una de las estaciones, difieren en algo menos del 5%, lo cual es bastante aceptable ya que el fabricante de los sensores, informa que el error estimado de éstos es del 7%, por lo que la diferencia puede deberse a los mismos sensores. También se presenta un día de las mismas estaciones, pero con valores de concentración de ozono troposférico mayores a 0.11 ppm, en este caso se observa una diferencia mayor entre las estaciones del norte y sur de la cuenca, se observa en el gráfico de ozono en superficie, una correlación negativa entre las altas concentraciones de este contaminante en el sur de la cuenca y los valores bajos de irradiancia en superficie, lo que contrasta con el comportamiento inverso en el norte de la misma.

Todos estos gráficos, apuntan a la existencia de una atenuación de la radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, que se asocia a la presencia de ozono también en superficie; para confirmar lo anterior, se utilizó el modelo parametrizado de Paltridge y Barton (1978) modificado por Pelaez (1998); el cual considera para realizar sus cálculos la latitud del lugar, la presión atmosférica y el parámetro más importante para este análisis, la concentración de ozono en toda la columna atmosférica.

Este modelo se utilizó para el calculo de la radiación solar ultravioleta banda "B" en dos puntos de la Cuenca de México, el primero sobre el Cerro de San Miguel y el segundo en la estación de Ciudad Universitaria, en ambos lugares para un mismo día (1 de marzo de 2000), también en estos dos sitios, se obtuvieron los valores medidos de los parámetros que necesita el modelo para el calculo de la radiación solar ultravioleta, además se obtuvieron los valores medidos de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie con sendos radiómetros marca Solar Light (UV-BIOMETER), los cuales fueron calibrados en la fábrica Solar Light.

En el gráfico 3.7 construido con los resultados del modelo para los parámetros de la estación del Cerro San Miguel, podemos observar que reporta valores menores a lo medido en superficie, esta diferencia no es mayor al .33 de error medio cuadrático, por lo cual el error no puede atribuirsele completamente al modelo o al instrumento; por otra parte, el gráfico 3.8 nos muestra los mismos resultados, pero para la estación Ciudad Universitaria, en este caso, el modelo reporta mayor radiación solar ultravioleta banda "B", que lo medido en superficie (aproximadamente .41 de error medio cuadrático, es decir, el error promedio entre lo medido y lo

calculado). Este resultado específicamente, nos demuestra que además de existir una atenuación por ozono la cual es considerada en estos cálculos en la variable de concentración de la columna de ozono, aun así lo medido en superficie esta por debajo de lo calculado, dicha diferencia, solamente puede atribuirsele a la presencia de otros gases como los SO_2 , CO , NO_4 y aerosoles presentes en la atmósfera de la ZMCM.

Debido a lo anterior, no se puede evaluar la aportación del ozono en la atenuación de la radiación solar con la información existente (UVB y O_3), pues sería necesario contar con la información del resto de los contaminantes que se miden para lograr nuestro objetivo (SO_2 , CO , NO_4 , PM_{10}).

Distribución espacial.

Por otra parte, es posible conocer la distribución espacial y temporal de la radiación Solar Ultravioleta Banda "B", transformando las unidades empleadas (MED/Hora), en unidades de energía (Kj); para esto, es necesario realizar los siguientes pasos:

Partiendo de que si durante una hora se recibe 1 MED/hora al finalizar este tiempo se alcanzará una dosis (irradiación) de 1 MED, es decir:

$$1 \text{ MED/hora} * 1 \text{ hora} = 1 \text{ MED}$$

segun Parrish (1982):

$$1 \text{ MED} = 0.0583 \text{ W/m}^2$$

y

$$1 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ Joule} * \text{segundo}$$

por lo tanto:

$$1 \text{ MED} = 0.0583 \text{ W/m}^2 = 0.0583 * 3600 \text{ J/m}^2 = 209.88 \text{ J/m}^2$$

En forma general se pueden hacer las transformaciones con las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ MED/hora} = .0583 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ MED} = 210 \text{ J/m}^2$$

Una vez obtenidos estos valores para cada mes y cada estación, se vacían en los mapas sobre los puntos indicados;

posteriormente, se interpolan los puntos y se trazan las isopletras. De los mapas resultantes solamente se analizarán dos (Mapa 4.1 y 4.2), correspondientes a los meses de Enero y Julio respectivamente, los cuales son los más representativos de las dos épocas extremas del año (seca-fria y humeda-caliente).

Enero. En el mapa 4.1 se observan los mayores valores en la estación Chapingo al Noreste de la ZMCM (3.22 KJ/m^2), disminuyendo en general hacia al Suroeste (San Agustín 2.65 y Merced 2.56), hasta alcanzar su valor mínimo en la estación Pedregal con 2.44 KJ/m^2 , existiendo una diferencia de 0.78 KJ/m^2 entre ambas estaciones; es preciso mencionar que la estación Tlalnepantla obtuvo un valor promedio de 2.76 KJ/m^2 en el Noroeste, situación por la que no podemos generalizar, un comportamiento de disminución de la radiación UVB de Noreste-Suroeste. Para saber que tan significativa es la diferencia entre los valores extremos, obtuvimos las desviaciones estandar de la estación Chapingo y Pedregal (± 0.51 y ± 0.38 respectivamente), dando como resultado que la diferencia de ± 0.13 entre estos dos si puede considerarse significativa.

Julio. El mapa 4.2, nos muestra la distribución de UVB para el mes de Julio del año 2000; en esta ocasión si podemos describir la distribución de la radiación UVB como de Noreste-Suroeste, encontrando su valor máximo en Chapingo (5.35 Kj/m²), y el mínimo en Pedregal (4.31 Kj/m²), mientras que San Agustín, Tlalnepantla y Merced obtienen valores intermedios (4.89, 4.48 y 4.37 Kj/m² respectivamente). La desviación estándar de Chapingo y Pedregal es de ±1.0 y ±0.7 respectivamente, por lo que también es posible considerar esta cifra como significativa.

Con la elaboración de estos mapas, una vez más observamos que la distribución de la radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, responde a un comportamiento derivado de la presencia de contaminantes, cuya concentración en la atmósfera, esta determinada por la circulación de vientos en superficie:

Los mapas 4.3 y 4.4 fueron proporcionados por la Dirección de Inventario y Modelación de Emisiones de la Subdirección de Meteorología y Modelación de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, la misma Dirección a la que pertenece la Red Automática de Monitoreo

Atmosférico, por lo que esta información, procede de la misma fuente, y se elaboró a partir de 21 estaciones meteorológicas que miden el parámetro.

En el mapa 4.3 muestra la circulación de vientos en superficie para la época seca del año (Enero), como se puede observar, en las zonas de Tlalnepantla y Chapingo existen vientos que limpian perfectamente la atmósfera de estas estaciones, y San Agustín se encuentra justamente en el corredor de salida de estos vientos, lo que pudiera explicar los valores altos de las primeras estaciones con respecto a esta última; de Merced y Pedregal, se puede decir que los vientos con los contaminantes acarreados del centro de la ciudad, se acumulan en la atmósfera de la zona en donde se encuentra ésta última estación.

En el mapa 4.4 se observa claramente una correlación perfecta entre la dirección predominante del viento y la distribución de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie; el flujo de vientos recorre la ZMCM con una dirección de noreste a suroeste, provocando una acción de barrido de contaminantes, los cuales se acumulan en la zona del piedemonte del Cerro del Ajusco.

Distribución Temporal.

A partir de los valores horarios de la radiación solar ultravioleta banda "B", se obtuvo el día promedio horario por cada mes, en cada una de las estaciones. Con estos valores se construyeron los gráficos correspondientes a Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre de 2000 (4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente), Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio y Agosto de 2001 (4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 respectivamente), en donde se presentan los comportamientos promedio diario de cada una de las estaciones para cada mes del año.

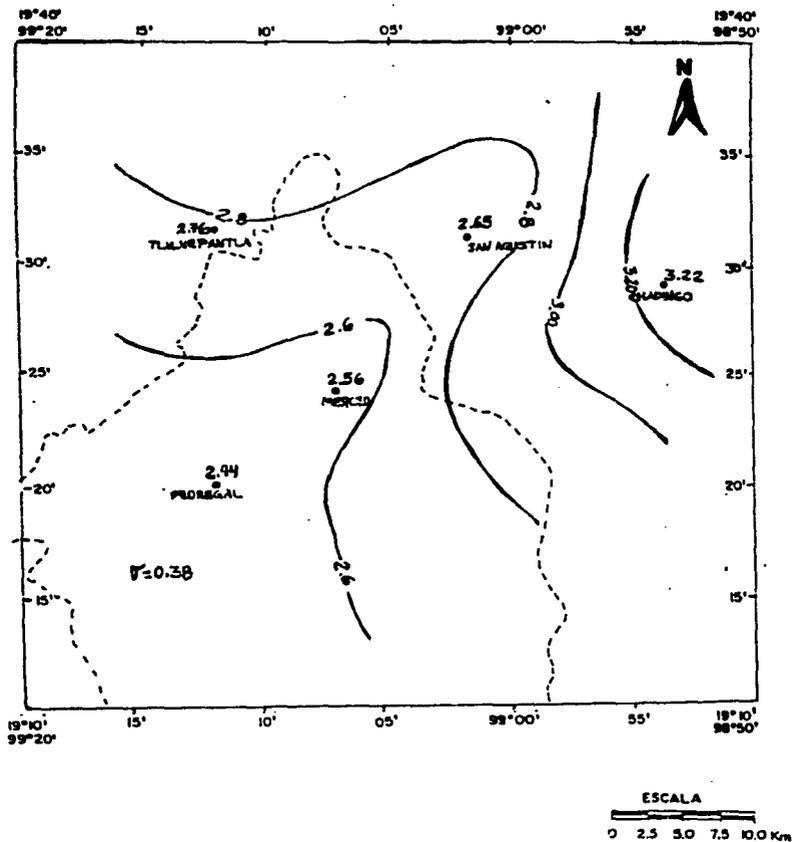
En lo general, se puede destacar que la distribución de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, a lo largo del año es casi semejante espacialmente, ya que la zona con un mayor índice y por lo tanto irradiancia, corresponde al noreste de la ZMCM (Chapingo), mientras que la que presenta el más bajo índice es Pedregal al Suroeste de la misma; que los valores más bajos (< 3 MED) se presentan durante el mes de Diciembre, mientras que los más altos corresponden al mes de Abril (casi 5 MED), situaciones explicables si tomamos en cuenta que durante el mes de

diciembre se presenta la máxima declinación solar negativa, las frecuentes inversiones térmicas en la Cuenca de México y por consecuencia una mayor acumulación de contaminantes; mientras que durante el mes de abril se presentan los días más despejados de todo el año y la declinación solar ya es positiva (Norte).

Por otra parte, Diciembre es el mes en donde los valores de todas las estaciones son semejantes, pues la diferencia entre ellos no es de más de 1 MED, debido principalmente a esa estabilidad atmosférica mencionada anteriormente; mientras que Febrero corresponde al mes en donde existen las mayores diferencias, aproximadamente de 2 MED, lo cual puede ser explicable debido básicamente a que durante este mes, se presentan la mayor frecuencia e intensidad de vientos en superficie en la ZMCM, lo que no solamente provoca una acumulación de contaminantes en algunas zonas de la cuenca, sino que también inyecta en la atmósfera una gran cantidad de partículas suspendidas (tolvaneras), que se generan en la zona del Noreste (Jáuregui 2000).

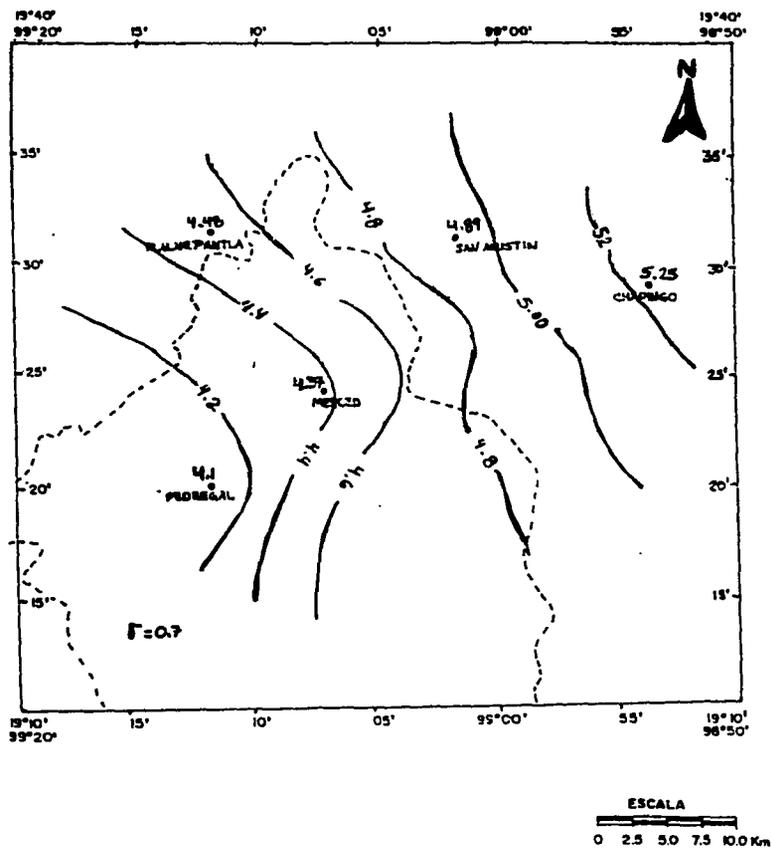
MAPA No. 4.1

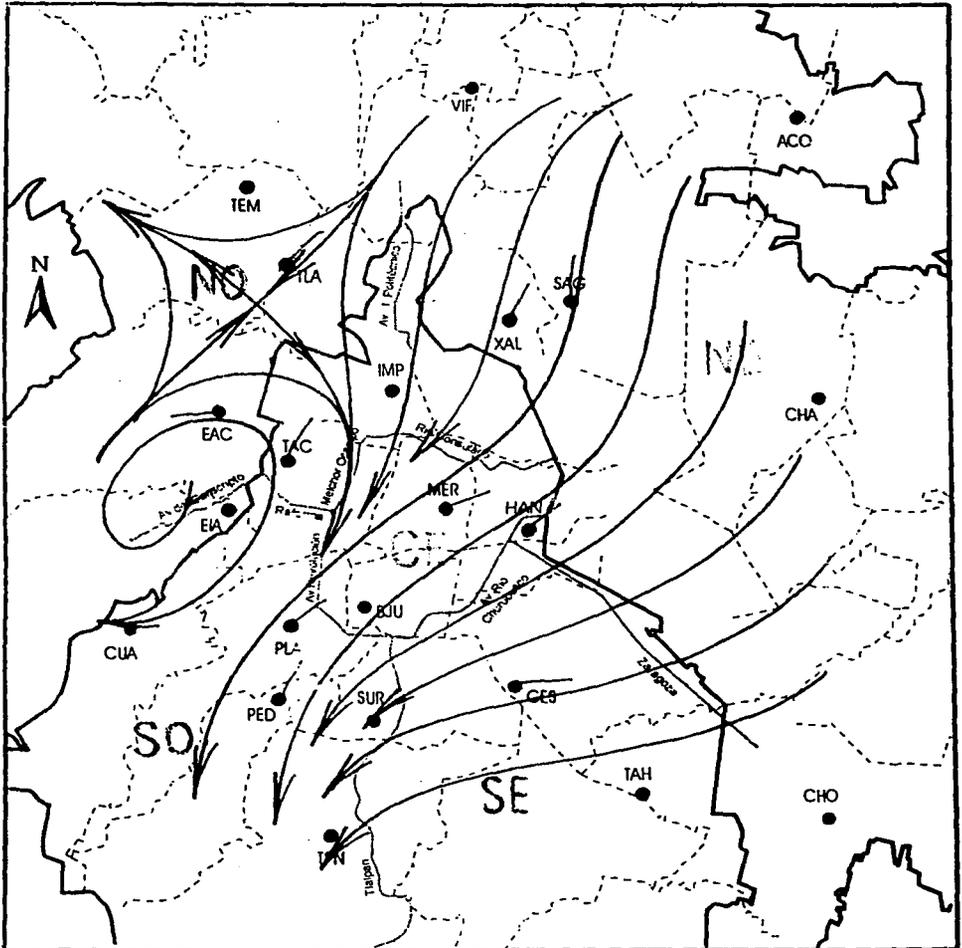
Distribución de la Radiación Solar Ultravioleta banda "B" en la ZMCM. Enero 2001.



MAPA No. 4.2

Distribución de la Radiación Solar Ultravioleta banda "B" en la ZMCM. Julio 2000.

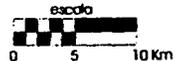




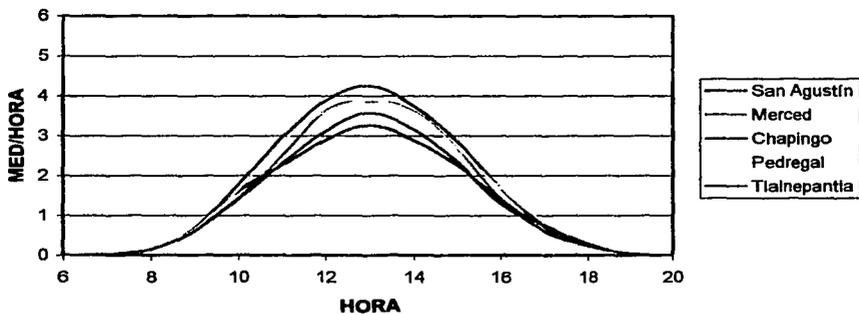
**RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO
SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA**

Análisis de: Flujo de Viento

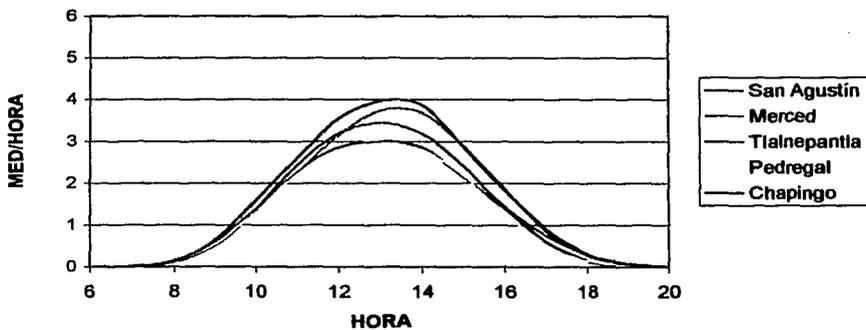
Fecha: Julio/2000



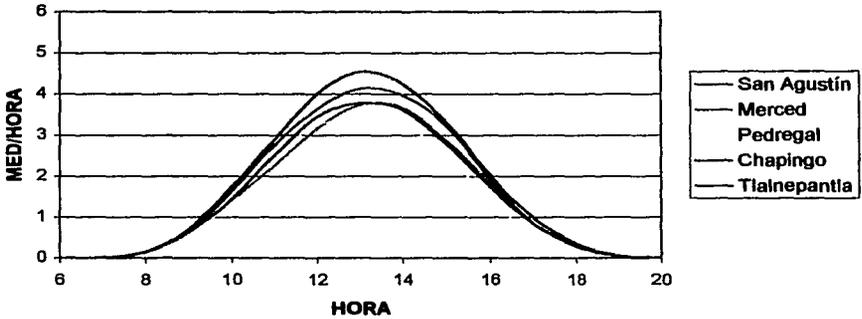
**4.1 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR
ULTRAVIOLETA BANDA "B". MAYO 2000**



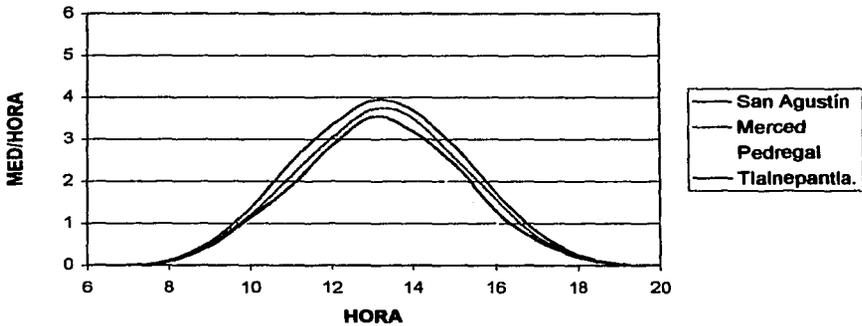
**4.2 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR
ULTRAVIOLETA BANDA "B". JUNIO 2000.**



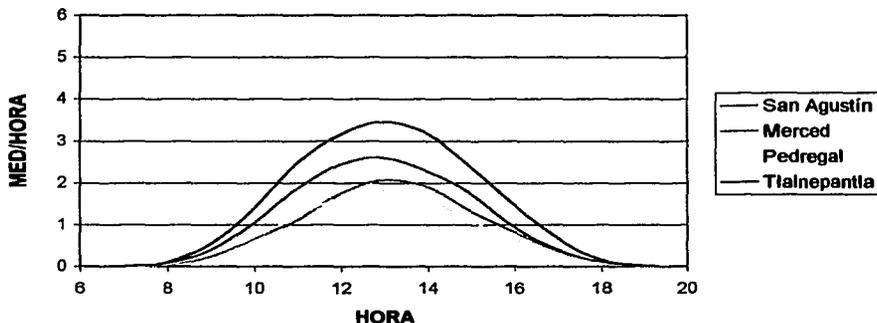
4.3 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B". JULIO 2000



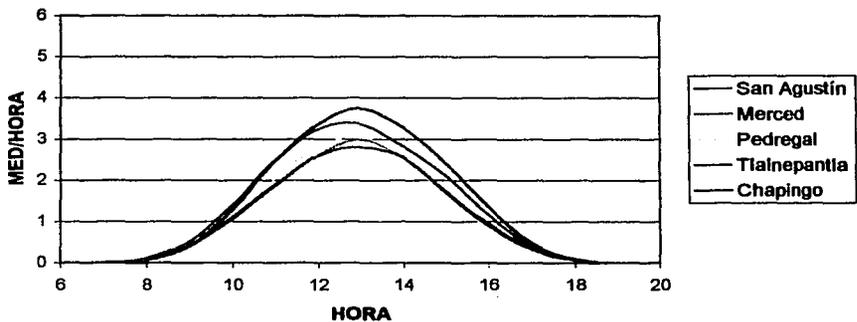
4.4 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B". AGOSTO 2000



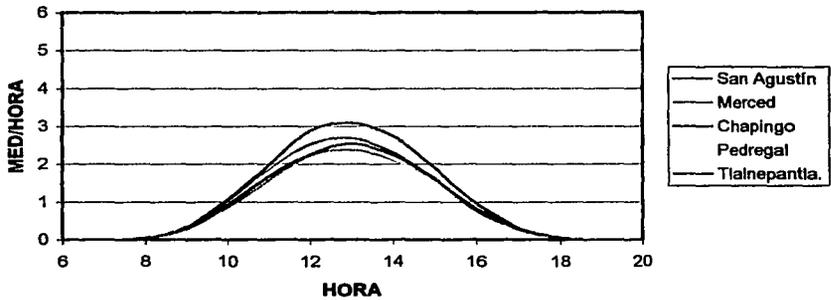
4.5 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B". SEPTIEMBRE 2000



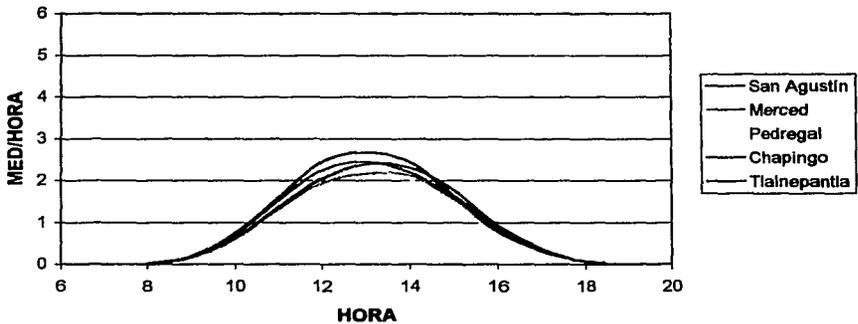
4.6 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA BANDA "B". OCTUBRE 2000



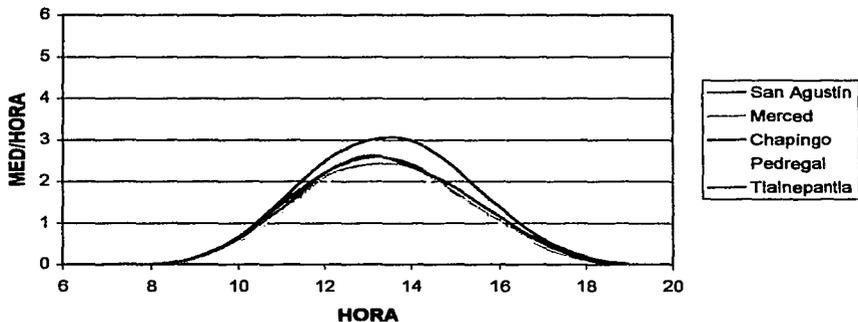
**4.7 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION ULTRAVIOLETA
BANDA "B". NOVIEMBRE 2000.**



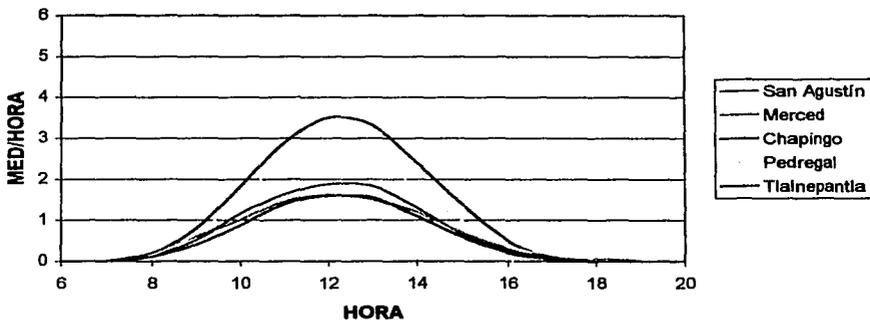
**4.8 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR
ULTRAVIOLETA BANDA "B" DICIEMBRE 2000.**



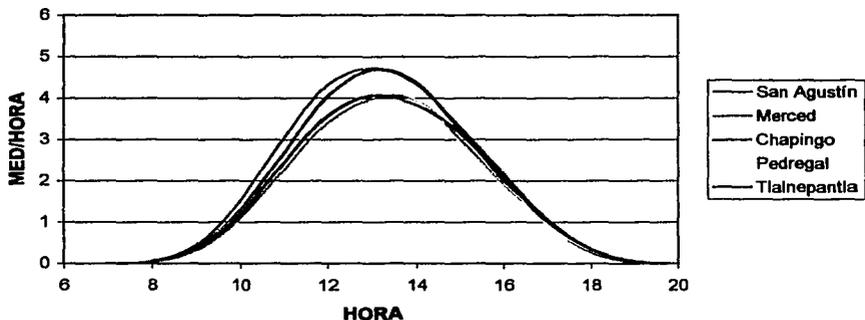
4.9. PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA "B". ENERO 2001.



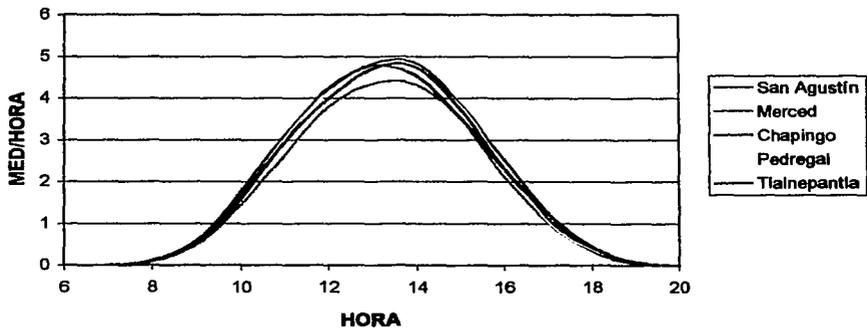
4.10. PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR ULTRAVIOLETA "B". FEBRERO 2001.



**4.11 PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR
ULTRAVIOLETA "B" MARZO 2001.**



**4.12. PROMEDIO HORARIO DE RADIACION SOLAR
ULTRAVIOLETA "B". ABRIL 2001**



**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

CONCLUSIONES.

La radiación solar ultravioleta banda "B" en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, presenta un régimen diario en donde los máximos valores se presentan entre las 12:00 hrs. y 14:00 hrs. durante todo el año; un régimen anual en donde los mayores valores se encuentran durante el mes de Abril con valores máximos cercanos a los 5 MED, mientras que los valores mínimos los encontramos en el mes de Diciembre con un promedio de 2.5 MED.

Existe un gradiente en superficie de radiación solar ultravioleta banda "B" de la estación Chapingo (Noreste), hacia la estación Pedregal (Suroeste), durante todo el año, alcanzando las diferencias máximas durante el mes de Febrero con cerca de 2 MED, mientras que la diferencia mínima se presenta en el mes de Diciembre con 0.5 MED.

La existencia de este gradiente de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie en una distancia tan "pequeña" (32 Km), se debe básicamente a la presencia de gases y partículas contaminantes, generadas por industria,

automóviles, servicios (panaderías, baños, diferentes procesos para el asfalto, etc.), y generación de partículas suspendidas (aerosoles).

La acumulación de contaminantes en la atmósfera que atenúan el flujo de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, se debe al régimen de vientos existente en la Cuenca de México (dirección, velocidad y estacionalidad); ya que la dirección predominante de estos durante las horas de mayor producción de contaminantes es predominantemente de Norte y Noreste.

El ozono juega un papel muy importante en la atenuación de la radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, pero existen otros gases como el Dióxido de Azufre y partículas suspendidas, que son tan o más importantes que el ozono en el fenómeno de distribución espacial y temporal de UVB en superficie.

El modelo parametrizado de Paltridge y Barton (1978) modificado por Peláez (1998), es una fuente de información confiable que con suficiente información medida en superficie (3 años), se podrá "sintonizar" correctamente, para conocer más a fondo y con mayor precisión, la atenuación causada no

solamente por el ozono, sino también de otros gases y partículas suspendidas.

Es de gran importancia mencionar, tal vez como la conclusión más importante, debido a la trascendencia que pueda tener para la población en general, que los niveles de radiación solar ultravioleta banda "B" en superficie, se encuentran dentro de los límites normales. En el Sur de la Cuenca de México, los valores de UVB que se presentan, se encuentran por debajo de los valores esperados debido a la gran cantidad de contaminantes atmosféricos, que como lo hemos dicho, atenúan hasta en un 30% la radiación solar ultravioleta banda "B"; que en el Norte de la cuenca, los valores se ajustan a lo esperado, y que en ningún momento la radiación solar ultravioleta banda "B", rebasa los valores que puedan poner en peligro la salud de la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Por último es importante destacar que para este trabajo se utilizaron 5 estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico perteneciente al Gobierno del Distrito Federal, que actualmente existen 9 estaciones funcionando las cuales cotidianamente se les esta dando mantenimiento y anualmente se calibran sus sensores con una referencia internacional;

que 9 estaciones en un área tan "pequeña" como la que ocupa la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, podría pensarse que son muchas, pero debido a los complejos fenómenos atmosféricos provocados por la contaminación, la red de radiación solar (ultravioleta, banda "A", banda "B" y global), es una herramienta de gran utilidad y confiabilidad en la generación de información para el estudio de la contaminación atmosférica y para la protección de la población.

BIBLIOGRAFIA.

ACOSTA, R, F.J.EVANS. 2000. "Design of the México City UV monitoring network:UV-B measurements at ground level in the urban environment". Journal of Geophysical Research, Vol.105 No. D4, pp.5017-5026.

BAUMULLER, J. 1984. "La incorporación de la climatología a la administración y el desarrollo de la planificación de la ciudad de Stuttgart". Documentos de la Conferencia Técnica No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra Suiza. pp 394-402.

BRAVO ALVAREZ, H. 1987. "La contaminación del aire en México". Universo Veintiuno, Colección Medio Ambiente. No. 5. México.

BRAVO J.L., MUHLIA A., LEYVA A., MOTA A. 1990 "A statical model describing the sunshine in the southern metropolitan area of the Mexico Valley", Geofísica Internacional, Vol. 29, No.1, pp 35-45, México.

COULSON KILLSEN L. 1975. "Solar and Terrestrial Radiation", Academic Press, Nueva York.

ESPINOSA-CARDENAS, M., 1994. "Bioclimatología Urbana de la Ciudad de México". Tesis de Licenciatura. Colegio de Geografía, Facultad. de F y L., UNAM. México D.F. 140 p.

GALINDO I., FRENK S., BRAVO H., 1995. "Ultraviolet irradiance over Mexico City", Air & Waste Managment Association, 45: pp. 886-892.

GAVILANES RUIZ, J.C., 1994. "Mediciones a 5,100 m de altitud de la irradiación solar global y ultravioleta", Facultad de Filosofía y letras, UNAM, Tesis de Licenciatura.

GOMEZ ROJAS J.C., 1993 "Anomalías térmicas en la Ciudad de México y Zona Metropolitana", Facultad Filosofía y Letras.

<http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html> página "Total ozone mapping spectrometer".

JAUREGUI, E. 1978. " Una primera estimación de la distribución de la radiación global y neta en México",

Recursos Hidráulicos, Vol. 7 No. 2, pp. 96-106, México.

JAUREGUI, E., 1984. "El clima urbano de la Ciudad de México". Documentos de la Conferencia Técnica No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra Suiza. pp 55-74.

JAUREGUI, E. 2001. "El clima de la ciudad de México". Instituto de Geografía, Plaza y Valdés. Textos monográficos: urbanización. México.

KINSELL, L. COULSON., 1975 "Solar and Terrestrial radiation". Academic Press, New York.

MUHAMMAD, I., 1983. "An Introduction to solar radiation". Academic Press. Nueva York.

MUHLIA A., . CHAVEZ A. 1980. "Insolación y la radiación solar en el tope de la atmósfera para las latitudes que cubren la República Mexicana". Anales del Instituto de Geofísica, UNAM, Vol. 26, pp. 127-149, México.

MUHLIA, A, A LEYVA and J.L. BRAVO., "Actinometric method for the determination of the total number of aerosol particles in

the vertical atmospheric column". Geofísica Internacional, Vol 28, 1; pp 47-71.

MUHLIA, A., "Procesos de extinción de la radiación solar con algunas aplicaciones sobre el estudio de la turbiedad atmosférica". Facultad de Ciencias, UNAM, 1969. Tesis Licenciatura.

OGUNTOYINBO, J.S., 1984. "La climatología urbana en Africa tropical". Documentos de la Conferencia Técnica No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra. Suiza.

OKE, T.R., 1984. "La climatología urbana y las ciudades tropicales: una introducción al tema". Documentos de la Conferencia Técnica No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra Suiza. pp 1-21.

PADMANABHAMURTY, B., 1984. "Algunos aspectos del clima urbano en la India". Documentos de la Conferencia Técnica No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra. Suiza.

PALTRIDGE, G, J.BARTON., 1978. "Erythemat ultraviolet radiation distribution over Australia, the calculations, detailed results and input data, including frequency analysis of observed australian cloud cover". Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of atmospheric Physics technical paper No. 33. Australia.

PINEDA BARDALES, B., 1998. "Análisis climatológico de la radiación solar directa, y su relación con las partículas aerosólicas suspendidas en la Ciudad de México". Avances de tesis de licenciatura en proceso.

RED AUTOMATICA DE MONITOREO ATMOSFERICO., "Informe Anual 1995", DDF-Secretaría del Medio ambiente, Dirección General de prevención para el control de la contaminación. México, junio 1996.

RICO E., PEDROZA E., RIVERA A., TORRES R., MUHLIA A., VALDES M., HERNANDEZ A. 1998. " Red de radiación solar ultravioleta bandas "A" y "B" en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México , VIII Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos A.C. pp. 192-196, Veracruz, Ver., México.

ROBINSON N., 1996. "Solar Radiation". American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.

RUIZ, H., J. "Cambios climáticos en la ciudad de México", México, UNAM, 1994. Tesis Licenciatura.

TAESLER, R., 1984. "Métodos y datos sobre climatología urbana. En: La climatología urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales". Documentos de la Conferencia Técnica. No. 652. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra Suiza. pp 175-206.

VALDES-BARRON, M., 1978-1984 "Análisis de Información de radiación solar global en Ciudad Universitaria". Tesis de Licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad. F y L., UNAM. México D.F. 92 p.

VALDES M, MUHLIA A., PINEDA B. 1998. "La radiación solar directa y su interacción con una atmósfera urbana." VIII Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos A.C. Veracruz, Ver. México.

WIEDER, SOL., 1982. "An introduction to solar energy for scientists and engineers". John Wiley & Sons, Inc., EUA.

YANEZ, G., 1988. "Arquitectura solar, bioclimatismo e iluminación natural". Monografías de la Dirección general para la vivienda y la arquitectura. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid. España.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA