



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

MODELO PRELIMINAR DE LA IRRADIACIÓN UV EN EL D.F.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

En el área de ENERGÍA, campo de conocimientos ENERGÍA Y
AMBIENTE

P R E S E N T A

LOURDES ANGÉLICA QUIÑONES JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2012

Índice

| | | |
|---|-------|-------|
| Capítulo I | ..... | 1 |
| 1.1. Introducción y Objetivos. | ..... | 1-3 |
| Capítulo II Fundamentos Teóricos | ..... | 4-4 |
| 2.1 Conceptos generales | ..... | 4-5 |
| 2.2 Comportamiento de la Radiación Solar a su paso por la atmósfera terrestre. | ..... | 6-9 |
| 2.3 Leyes de la Radiación de un cuerpo negro. | ..... | 9-12 |
| 2.4 Geometría de la órbita terrestre | ..... | 13-16 |
| 2.5 La constante solar y el espectro solar. | ..... | 16 |
| 2.6 Cuantificación de la Energía de Radiación Solar. | ..... | 17-18 |
| 2.7 Definición de las unidades radiométricas básicas. | ..... | 18-21 |
| Capítulo III La Radiación Ultravioleta (UVR) | ..... | 22 |
| 3.1 Características de la radiación Ultravioleta | ..... | 22-23 |
| 3.2 Factores que influyen en los niveles de radiación UV | ..... | 23-28 |
| 3.3 Posibles daños a la salud debidos a la Radiación UV. | ..... | 29-36 |
| Capítulo IV. Medición de la radiación Solar. | ..... | 37-37 |
| 4.1 Sensores para la medición de la radiación Solar. | ..... | 37-38 |
| 4.2 Estación Meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería. | ..... | 39-44 |
| 4.3 Validación y control de calidad de los datos de radiación. | ..... | 45-46 |
| Capítulo V. Modelo de radiación ultravioleta para el DF. | | |
| 5.1 Introducción | ..... | 47-48 |
| 5.2 Nomenclatura | ..... | 49-49 |
| 5.3 Análisis de Datos. | ..... | 50-51 |
| 5.4 Fracción de radiación Ultravioleta en relación a la Radiación Global. | ..... | 52-58 |
| 5.5 Modelos para la Radiación Ultravioleta en función de la Radiación Solar Global. | ..... | 58-65 |

Índice

| | | |
|--|-------|-------|
| 5.6 Estudio Estadístico de los valores de Irradiancia Ultravioleta de los datos obtenidos con la estación Radiométrica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería. | ..... | 66-79 |
| 5.7 Índice de Claridad. | ..... | 80-82 |
| 5.8 Análisis del Índice de claridad en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería. | ..... | 83-85 |
| Capítulo VII Conclusiones. | ..... | 86-87 |
| Capítulo VIII. Referencias. | ..... | 88-89 |

Capítulo I

1.1 Introducción y objetivos

Para la vida en la tierra es de vital importancia la radiación proveniente del Sol, ya que propicia un clima favorable en la Tierra y esto a su vez ejerce una influencia en todos los ecosistemas.

La componente de radiación UV, contribuye con relativamente poca energía con respecto a todo el espectro solar estraterrestre, esta cantidad de energía representa sólo un 8.3% (Stamnes, 1993) y un 5% de la radiación que llega a la superficie de la Tierra. Esta parte del espectro solar juega un papel muy importante en varios procesos de la biosfera ya que es biológicamente muy activa: por lo tanto en la exposición a este tipo de radiación se tiene que tomar en cuenta, que tanto se pueden producir efectos benéficos así como procesos negativos.

La radiación UV es importante en diversos procesos bioquímicos como la fotosíntesis. En el caso de los seres humanos, la radiación ultravioleta es importante para que el organismo humano pueda producir la vitamina D, la cual es vital para el fortalecimiento de los huesos y los músculos. Otro aspecto a considerar es que la radiación ultravioleta propicia la degradación de materia orgánica al actuar con un fotocatalizador.

Sin embargo, si la exposición a la radiación ultravioleta es elevada puede tener como consecuencia una ineficiencia en los mecanismos de autoprotección, lo que puede ocasionar efectos negativos o daños irreversibles dependiendo de la intensidad.

Para los seres humanos una sobre exposición a la radiación ultravioleta ocasionará problemas de salud como inmunosupresión, cáncer de piel, envejecimiento prematuro y cataratas, por mencionar algunos. En el ámbito de la construcción, los materiales como pinturas, envases, paneles fotovoltaicos, techos, recubrimientos, etc. se verán afectados ya que la radiación UV propiciará que el envejecimiento de dichos materiales sea más rápido.

En el caso de México las enfermedades más comunes debido a una exposición prolongada a la radiación UV se encuentran el melanoma (cáncer en la piel) y las cataratas. La incidencia de melanoma se ha ido incrementando en prácticamente todo el mundo. Entre los tumores de piel, el melanoma cutáneo representa el 7.9% en México y de acuerdo a las estadísticas esta enfermedad ha aumentado un 500% en los últimos años.

Las cataratas son un problema de salud pública en nuestro país, ya que se estima que un millón 600 mil mexicanos podrían tener este mal. Y esta enfermedad es la responsable del 45% de la ceguera del país, y cada año se suman entre 50 y 60 mil nuevos casos, de acuerdo con el programa Nacional de Cirugía de Cataratas de la Secretaría de Salud.

En la Planta Solar del Instituto de Ingeniería se han venido desarrollando diversos proyectos encaminados a promover el uso de las energías renovables, particularmente la energía solar. Uno de los aspectos que es conveniente resaltar es que en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, no solamente se están desarrollando proyectos para la generación de energía eléctrica, sino que también se están realizando investigaciones para el uso de la energía solar en la desintoxicación de agua.

En el presente trabajo tuvo como objetivo encontrar una relación entre radiación global y ultravioleta diarias, para lo cual se realizó un análisis estadístico de ambos datos utilizando la base de datos generada por medio de la Estación radiométrica ubicada en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería (19°19'N,99°11'O, 2324 m). Para esto, se agruparon los datos por mes para caracterizar el comportamiento de ambas variables a lo largo de las estaciones del año.

La base de datos utilizada está compuesta por datos de la radiación Solar, global, difusa, directa e irradiancia ultravioleta global entre otras variables atmosféricas; todas estas variables han sido medidas desde el año 2010 hasta la fecha. Las mediciones han sido adquiridas con un periodo de cada 5 segundos y almacenadas en la base de datos cada 5 minutos. La irradiación Solar Global se ha medido utilizando un piranómetro de banda giratoria de la compañía LI-COR, modelo PY26523. La irradiación ultravioleta global (290-385 nm) es medida utilizando un Radiómetro de la marca Eppley modelo TUVR. La base de

datos de valores horarios se ha generado de Enero del 2010 hasta diciembre del 2011, este periodo garantiza que se ha cubierto varias condiciones estacionales y diferentes ángulos de elevación solar. Es importante destacar que la calibración de los sensores se realizó cada año. Para el caso de la base de datos que se está generando con la estación radiométrica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, los datos se han validado mediante el algoritmo propuesto por S. Younes.

Tomando en cuenta que los modelos de transferencia radiativa son bastante complejos, en este trabajo se propone un modelo semiempírico o empírico que permitirá determinar la radiación ultravioleta a partir de parámetros regularmente medido y de los que ya se tienen bastas bases de datos y para este trabajo se utilizó a la radiación global como medio para encontrar una relación con el comportamiento de la irradiación ultravioleta. Otro aspecto que también se tomo en cuenta fue el índice de claridad ya que la nubosidad juega un papel muy importante entre la relación de radiación global y ultravioleta.

Con este estudio se obtuvo una correlación entre radiación global y ultravioleta con un error típico promedio de ± 2 . El índice de claridad instantáneo K_t se analizó debido a que su cuantificación permitió el análisis de las fluctuaciones de la irradiancia Solar, ya que el índice de claridad proporciona la energía recibida a nivel de suelo en relación a la energía recibida en el superficie de la atmósfera, por lo tanto, indica la transparencia de la atmósfera. Para el caso de este trabajo el índice de claridad se analizó ya que se observaba que en los meses donde existe una mayor frecuencia de un índice de claridad comprendido en el rango de $0.55 < k_t^h \geq 0.65$ (que corresponde a un cielo parcialmente nublado con predominancia de la componente de radiación directa) se observaban que es cuando existe el nivel máximo de radiación UV registrados.

Otro aspecto que es importante comentar es que este estudio es de importancia, pues permitirá conocer el comportamiento de la radiación UV en otras localidades y también será la base para el desarrollo de un algoritmo de mayor complejidad que abarque a toda la República Mexicana.

Capítulo II

Fundamentos Teóricos. (UVR)

2.1 Conceptos generales

La radiación es una forma de energía y nosotros estamos expuestos a ella constantemente, nos damos cuenta de su existencia debido a que nuestros sentidos la perciben en forma de calor [1].

La luz visible es solo una derivación del espectro solar, el hecho de que los humanos no podamos ver otros tipos de energía, no quiere decir que estas no existan, entre las formas de energía electromagnética se encuentran las ondas de radio, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta o los rayos X entre las más comunes.

Estas formas de energía se comportan siguiendo el principio de la teoría ondulatoria, que no es más que la energía viajando a lo largo de una trayectoria sinusoidal con una velocidad enorme como es la de la luz.

$$v\lambda = c \dots \dots \dots 1.1$$

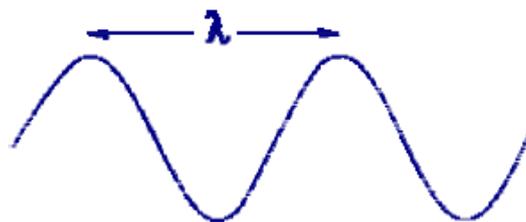


Figura 2.1 Comportamiento ondulatorio de la radiación electromagnética

En donde

c = velocidad de la luz, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

v = frecuencia [Hz]

λ = longitud de onda

El espectro de la radiación electromagnética se puede tomar como una larga cuerda, continua y de acuerdo al nivel energético va cambiando su comportamiento debido a su energía. Para fines prácticos la longitud de onda dentro de la radiación ultravioleta por lo regular será medida en nanómetros (*nm*), pero es importante mencionar que ésta también puede estar expresada en Angstroms (*Å*) o en micrómetros (*μm*).

La conversión es la siguiente:

$$1 \text{ nm} = 10 \text{ Å} = 10^{-9} \text{ metros}$$

Para el estudio de la radiación electromagnética es importante no pasar por alto su naturaleza corpuscular descrita por la teoría cuántica, esta teoría se refiere a la dualidad onda-partícula donde cientos de partículas muy pequeñas forman el haz de luz, conocidas como cuantos o fotones.

De acuerdo a esta teoría la energía de cada fotón está dada en Julios (J) y la ecuación que lo describe es la siguiente:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \dots \dots \dots (1.2)$$

En donde

***h*; es la constante de planck = 6.6260 × 10⁻³⁴J · s = 6.6260 × 10⁻²⁷ ergs · s.**

Otra expresión que nos da la cantidad de energía de los fotones es la siguiente:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = kT \dots \dots \dots (1.3)$$

En donde

***k*, constante de Boltzman = 1.3806 × 10⁻²³J/K**

Se puede concluir de estas ecuaciones que la energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda; esto es, a una mayor longitud de onda menor será la cantidad de energía que tenga el fotón.

2.2 Comportamiento de la Radiación Solar a su paso por la atmósfera terrestre.

Para la tierra, el disco solar está direccionado en promedio con un ángulo sólido de alrededor 0.5°. Sin embargo la excentricidad elíptica de la órbita terrestre (0.0167), la distancia de la Tierra al Sol varía a lo largo del año en $\pm 1.7\%$, esto propicia que la intensidad de la radiación terrestre en la superficie de la atmósfera varía alrededor de $\pm 3.4\%$. El Sol actual como una fuente casi puntual, iluminando la tierra con rayos muy paralelos, estos rayos casi colimados son la radiación directa extraterrestre o radiación extraterrestre y en inglés también se denota como ETR.[19]

Existe una distancia promedio de $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ entre la Tierra y el Sol, virtualmente toda la energía que la tierra recibe y pasa por la atmósfera y los océanos provienen del Sol.

El Sol es una esfera gaseosa con un radio de $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ y una masa aproximadamente de $1.99 \times 10^{30} \text{ Kg}$. Los principales ingrediente que conforma al Sol son Hidrógeno (H) y Helio (He), además también lo conforman otros elementos como el Oxígeno (O), Carbono (C), Nitrógeno (N), Neón (Ne), Hierro (Fe), Silicio (Si), Magnesio (Mg), Sulfuro (S) y Calcio (Ca). La masa del hidrógeno aumenta aproximadamente un 90% y para el caso del helio un 10%. La temperatura del Sol decrece ya que tiene una temperatura en el centro de alrededor $5 \times 10^6 \text{ K}$, mientras que en la superficie es de 5800 K.[19]

| Fuente | Energía (W m^{-2}) | Cambio en el ciclo Solar (W m^{-2}) | Depósito Terrestre Altitud |
|------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------|
| Radiación Solar | | | |
| Irradiancia total | 1366 | 1.3 | Superficie, troposfera |
| UV 2000-3000 Å | 15.4 | 0.16 | 0-50 km |
| UV 0-2000 Å | 0.1 | 0.02 | 50-500 km |
| Partículas | | | |
| Protones solares | 0.002 | | 30-90 km |
| Rayos cósmicos | 0.000007 | | 0-90 km |
| Viento Solar | 0.0003 | | Sobre, 500 km |

Tabla 2.2.1. (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84)

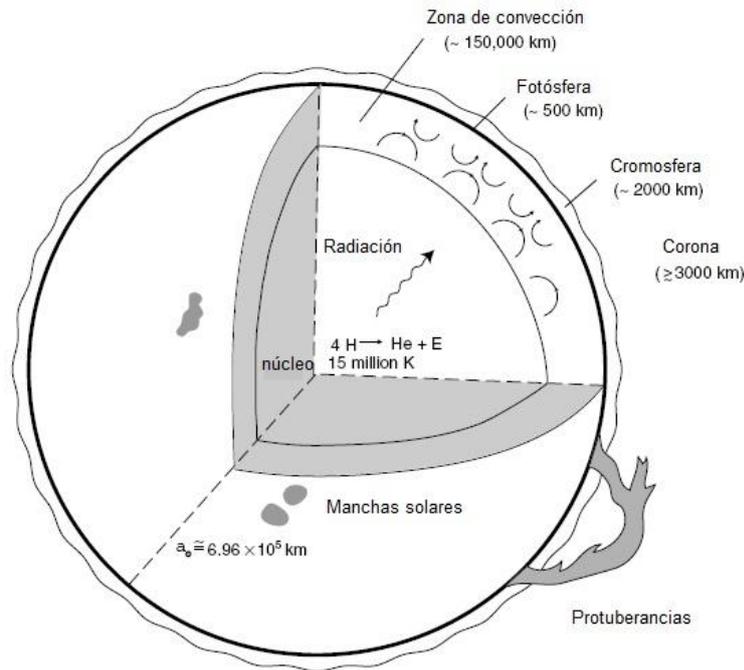


Figura 2.2.1 Ilustración de un corte transversal del Sol representando su atmósfera. El interior del Sol incluye el núcleo con una temperatura de alrededor $1.5 \times 10^7 \text{ K}$. La atmósfera solar está conformada por la fotosfera, la cromosfera y la corona. (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84)

La región en la cual existen grandes cambios en los gases es conocida como zona de convección (Fig2.2.1), la cual tiene un espesor de 150,000 km hacia la superficie del Sol. Bajo este espesor, se piensa que la energía del Sol es transportada en forma de energía electromagnética; por ejemplo un flujo de fotones. Sin embargo, cerca de la superficie debido al bloqueo de la energía radiante por medio de la absorción de los elementos pesados que conforman esta capa, la energía es transferida parte por convección y otra parte por radiación electromagnética. Sobre la superficie, la energía es transportada otra vez por radiación electromagnética.

El Sol provee tanto de energía electromagnética así como de energía de plasma a la tierra como se resume en la tabla 2.2.1. La radiación electromagnética se caracteriza por longitudes de onda que van desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (ver Fig. 2.2.2). La radiación electromagnética es la mayor fuente de energía solar hacia la tierra, y tiene mucha importancia en los procesos climáticos de la tierra.

| Región | Longitud de onda (μm) | Frecuencia (GHz) | Número de onda (cm^{-1}) |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------|--|
| Rayos gamma | 10^{-5} | 3×10^{10} | 10^8 |
| Rayos X | 10^{-2} | 3×10^7 | 10^6 |
| Ultravioleta | 3×10^{-1} | 10^8 | 0.33×10^5 |
| Visible | | | |
| Infrarrojo | 1 | 3×10^2 | 10^4 |
| Microondas | 10^3 | | 10 |
| | 10^4 (1cm) | 3×10^1 | 1 |
| Spacecraft | 10^6 | 3×10^{-1} | 10^{-2} |
| Television y FM | 10^7 | 3×10^{-2} | 10^{-3} |
| Ondas cortas | 10^8 | 3×10^{-3} | 10^{-4} |
| Ondas de radio AM | 10^9 | 3×10^{-4} | 10^{-5} |

Violeta .4 μm
 Morado
 Azul
 Verde
 Amarillo
 Naranja
 Rojo .7 μm

Figura 2.2.2 Espectro electromagnético en términos de longitud de onda en μm , frecuencia en GHz y número de onda en cm^{-1} . (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84)

Como podemos observar en la figura 2.2.2, la región que es captada por nuestro sistema ocular es mínima a comparación de toda la capacidad del espectro electromagnético; esta abarca de los 400 nm a los 700 nm, la radiación ultravioleta está comprendida de los 10 nm a los 400 nm. Por conveniencia o referencia, se tomará la división espectral realizada por Joint Committee para Espectroscopia Aplicada [6], que se ilustra en la tabla 2.2.2.

| Región | Longitud de onda (nm) |
|----------------------|-----------------------|
| Ultravioleta lejano | 10-200 |
| Ultravioleta cercano | 200-380 |
| Visible | 380-780 |
| Infrarrojo cercano | 780-3000 |
| Infrarrojo medio | 3000-30,000 |
| Infrarrojo lejano | 30,000-300,000 |
| Microondas | 300,000-1,000,000,000 |

Tabla 2.2.2 División del espectro electromagnético realizada por *Joint Committe para la Espectroscopia Aplicada

2.3 Leyes de la Radiación de un cuerpo negro.

Es básico el estudio de las leyes de radiación de un cuerpo negro debido a que es vital el conocimiento de los procesos de absorción y emisión. Un cuerpo negro es un concepto básico en la física y puede ser visualizado como una cavidad con un pequeño agujero, como se puede observar en la figura 2.3.1. En un cuerpo negro la mayoría de flujo de radiación que entra por el agujero es atrapado dentro de la cavidad, independientemente de las características del material que componga la superficie de la cavidad.

Dentro de la cavidad ocurren varias reflexiones internas hasta que todo el flujo que entro por la cavidad es absorbido por sus paredes. La probabilidad de que alguna parte del flujo que entre por la cavidad salga es casi nula; por lo tanto el interior de un cuerpo negro se dice que es de un color negro.

El término de cuerpo negro es usado para definir una configuración de materiales, en donde la absorción es completa. La emisión por un cuerpo negro es el contrario de la absorción.

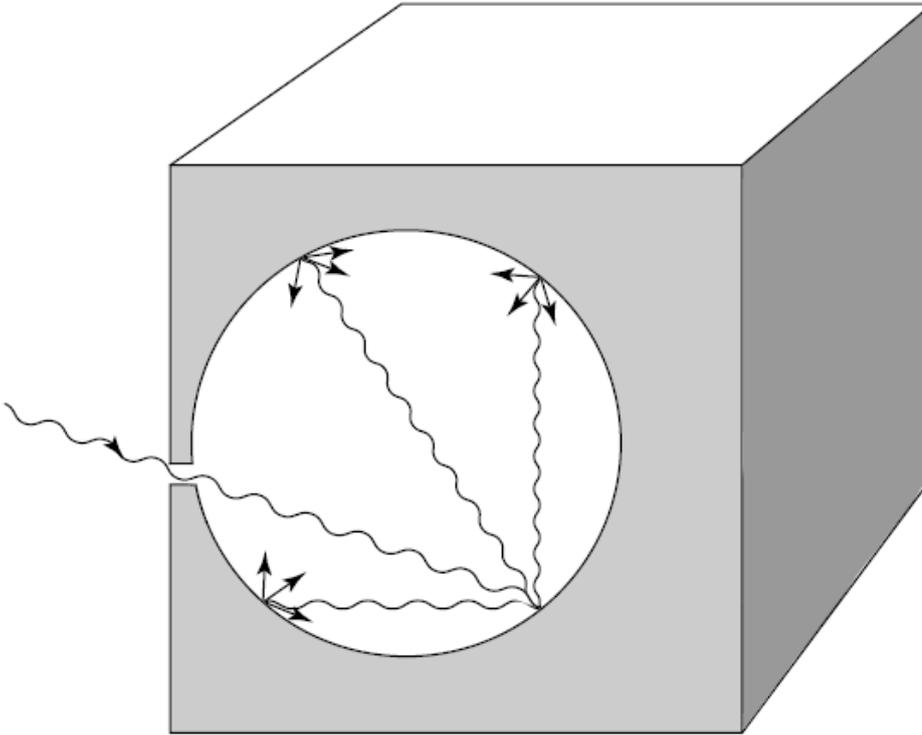


Figura 2.3.1 Un cuerpo negro, donde la absorción es completa. (Liou K.N., “An Introduction to Atmospheric Radiation”, International Geophysics Series, Vol. 84)

Para entender un poco más sobre el concepto de cuerpo negro, a continuación se detallan cuatro leyes fundamentales.

Ley de Planck. En el año de 1901 Planck comenzó a ocuparse en dar una explicación teórica acerca del comportamiento de la radiación en una cavidad. Planck asumió que los átomos que recubren las paredes de la cavidad producen pequeñas oscilaciones electromagnéticas, cada uno con su respectiva frecuencia de oscilación. EL oscilador emite energía dentro de la cavidad y absorbe energía para que se produzcan las oscilaciones. Primero, Planck postulo que un oscilador solamente puede tener energía mediante la siguiente expresión:

$$E = nh\nu \dots\dots\dots(2.3.1)$$

En donde $\tilde{\nu}$ es la frecuencia de oscilación, h es la constante de Planck y n es conocido como número cuántico y solo puede tomar valores enteros. Desarrollos posteriores revelaron que la fórmula correcta para oscilaciones armónicas es la siguiente $E = (n + \frac{1}{2}) h\tilde{\nu}$; sin embargo este cambio no introdujo diferencias a la conclusión de Planck. Después Planck postulo que el oscilador no emite energía radiante de forma continua, sino en forma de saltos o en cuantos. Los cuantos de energía son emitidos cuando un oscilador cambia de estado cuántico. Sin embargo, si el número cuántico cambia en una unidad, el resultado de la energía radiante esta dado por la siguiente ecuación.

$$\Delta E = \Delta n h \tilde{\nu} = h \tilde{\nu} \dots \dots \dots (2.3.2)$$

Para determinar cuanta energía ha sido emitida se requiere del conocimiento del número total de oscilaciones así como su frecuencia $\tilde{\nu}$ para todos los estados posibles de acuerdo con la estadística de Boltzmann. Siguiendo los dos formulaciones de Planck y normalizando sobre el promedio de la energía emitida por oscilación, la función de Planck en unidades de energía/ área/ tiempo/ sr/frecuencia está dada por la siguiente ecuación.

$$B_{\tilde{\nu}}(T) = \frac{2h\tilde{\nu}^3}{c^2(e^{h\tilde{\nu}/kT}-1)} \dots \dots \dots (2.3.3)$$

En donde, K es la constante de Boltzmann, c es la velocidad de la luz, y T es la temperatura absoluta. Las constantes de Planck y Boltzmann fueron determinadas de forma experimental y son $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s y $K = 1.3806 \times 10^{-23}$ J/K

La función de Planck relaciona la intensidad monocromática emitida con la frecuencia y temperatura de una sustancia emisora. Por la relación entre frecuencia y longitud de onda y la longitud de onda mostrados en la ecuación 2.3.1 y la ecuación 2.3.3 pueden ser escritas como:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT}-1)} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\pi(e^{C_2/\lambda T}-1)} \dots \dots \dots (2.3.4)$$

Ley de Wien. Al incrementar la temperatura de un cuerpo negro, la cantidad de energía que emite se incrementa. También, al incrementar la temperatura, el máximo de la distribución de energía se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas. Se encontró que este desplazamiento obedece a la siguiente relación, llamada ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{m\acute{a}x} T = 2897.8 (\mu m K) \dots \dots \dots (2.3.5)$$

Donde $\lambda_{m\acute{a}x}$ es la longitud de onda que corresponde al máximo de la curva y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

La ley de Wien, afirma que para la radiación de un cuerpo negro la longitud de onda de máxima emisión es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Con esta ley se demuestra que la emisión de la radiación de la superficie terrestre tiene un máximo en cerca de $9.9 \mu m$, que corresponde a la región infrarroja del espectro. También muestra que la temperatura del Sol, si el máximo de emisión de radiación solar ocurre en $0.474 \mu m$, es del orden de 6100 K.

Ley de Kirchhof. En general un cuerpo puede absorber y reflejar la radiación, y emitir lo que queda de ésta. En términos de la razón de radiación absorbida, reflejada y transmitida con respecto a la intensidad de radiación monocromática I_λ incidente en las capas, se tiene que:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \dots \dots \dots (2.3.6)$$

Cuando se incluyen valores promedio sobre todo el espectro, el subíndice referente a la longitud de onda puede eliminarse. Por otra parte, no se ha de perder de vista que una simplificación común es la consideración de fenómenos superficiales, cuando en la realidad se tienen sistemas volumétricos.

2.4 Geometría de la órbita terrestre

La tierra es uno de los nueve planetas en el sistema solar. Los cuatro planetas más cercanos al Sol (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), son referidos como planetas terrestres y los demás planetas (Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno), son conocidos como planetas mayores. Todos los planetas giran en torno al Sol en la misma dirección, con la excepción de Urano, y todos también rotan en la misma dirección sobre sus propios ejes. Adicionalmente, todas las órbitas planetarias excepto Mercurio y Plutón se encuentran en el mismo plano.

Una vez cada veinticuatro horas la Tierra realiza una rotación constante hacia el Este sobre su propio eje. Esta rotación es la que causa los cambios de periodos en la tierra, involucrando la alternancia del día y la noche. Al mismo tiempo el movimiento orbital de la tierra que tiene una masa de $6 \times 10^{24} \text{ kg}$, con una elipse con un foco respecto al Sol; con lo cual a la tierra le tomo 365 días aproximadamente para completar toda una vuelta al Sol. La distancia media de la Tierra al Sol, r_0 , define una unidad de longitud denominada unidad astronómica, UA, cuyo valor es :

$$r_0 = 1.495979 \cdot 10^8 \text{ km} = 1UA$$

A lo largo del año, la distancia Tierra-Sol, variará apreciablemente entre un valor mínimo de 0.983 UA, esto es el paso por el punto de la órbita terrestre más próximo al Sol, conocido como Perihelio (aproximadamente el 3 de enero), y un valor máximo de 1.017 UA en el momento conocido como Afelio, y es el punto de la órbita terrestre más alejado del Sol (aproximadamente el 4 de Julio). Todas estas variaciones originarán una oscilación anual de alrededor de $\pm 3\%$ en la cantidad de radiación solar recibida en la Tierra; la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, por lo tanto es importante determinar precisamente el valor de la distancia Tierra-Sol.

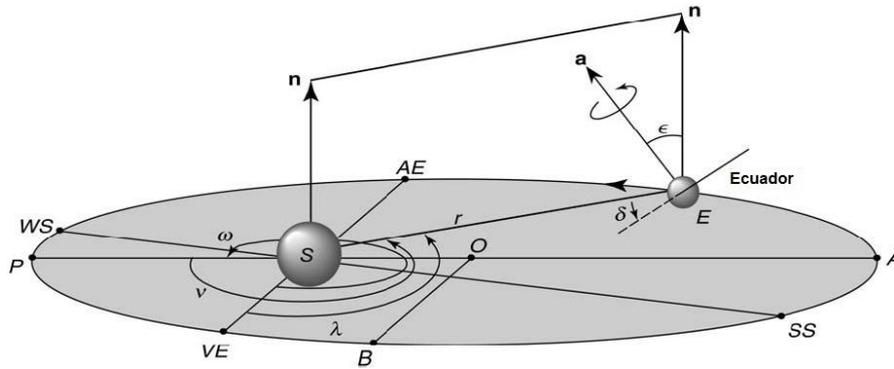


Figura 2.4.1. Geometría Tierra-Sol. P denota el Perihelio, A el Afelio, AE el equinoccio de Otoño, VE el equinoccio de Verano, WS el solsticio de invierno y SS el solsticio de verano, n es la normal al plano elíptico, a es paralelo al eje de la tierra, δ es la declinación solar, ϵ el ángulo oblicuo con respecto al eje de la tierra, ω es la longitud del perihelio en relación al equinoccio de verano, ν es la verdadera anomalía de la tierra en cierto periodo de tiempo, λ es la verdadera longitud de la tierra, O es el centro de la elipse, OA ($OP=a$) el semi eje mayor, OB ($=b$) el semi eje menor, S es la posición de el Sol, E es la posición de la tierra, y ES ($=r$) la distancia entre la tierra y el Sol. (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84)

Esto da como resultado una variación en la intensidad alrededor de un 7% entre ambas fechas. Lo anterior aunado a la inclinación del eje de rotación de la tierra tiene como resultado un ligero incremento de los niveles de la radiación ultravioleta en el verano del hemisferio sur, mientras que son menores en el verano del hemisferio norte.

Es importante destacar que tanto la cantidad como la calidad de radiación UV recibida por la Tierra sufren variaciones con la elevación del Sol sobre el horizonte, lo que se conoce como Altitud Solar (figura 2.4.2)

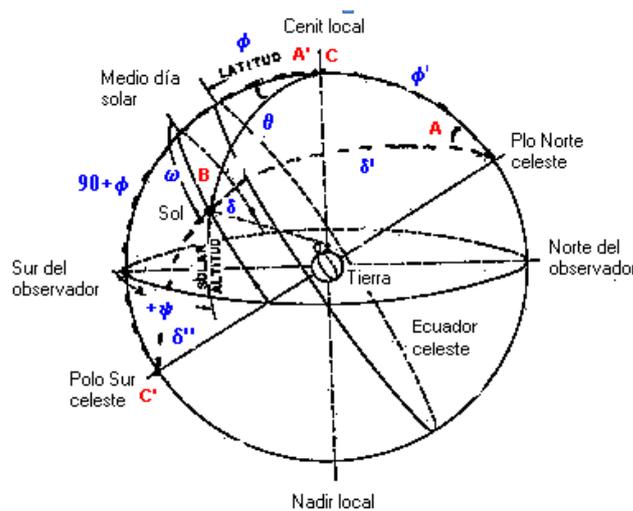


Figura 2.4.2. Las coordenadas locales y las coordenadas geocéntricas del Sol son origen común en la Tierra (Apuntes de Solarimetría Múhlia Velazquez A.)

La insolación diaria se muestra en la figura 2.4.4. La distribución de la insolación es independiente a la longitud y es ligeramente asimétrico entre el norte y el hemisferio sur. El Sol está más cerca de la tierra en Enero (invierno en el hemisferio norte), sin embargo el máximo de radiación solar recibida es mayor en el hemisferio sur que en el hemisferio norte. En el caso de los equinoccios, la insolación solar será máxima en el ecuador y es cero en los polos.

2.5 La constante solar y el espectro solar.

El flujo de energía radiante que el Sol emite en todas las direcciones llega al límite superior de la atmósfera terrestre con un valor prácticamente constante. De esta forma, se define la constante solar, I_{SC} , como la potencia recibida por unidad de superficie normal a la dirección de propagación de la radiación, a la distancia media del Sol a la Tierra, si bien, en realidad esta distancia no es constante y su valor presenta un intervalo de variación anual próximo al 3%.

La determinación experimental de la constante solar se hizo, en un principio, midiendo la radiación que llega a la superficie terrestre después de atravesar la atmósfera, tras ser parcialmente absorbida y dispersada por los constituyentes atmosféricos. Las extrapolaciones a partir de las medidas terrestres realizadas en alta montaña, tenían que basarse en cálculos aproximados de la transmisión atmosférica según las longitudes de onda del espectro solar. En este sentido los primeros estudios se deben a Johnson (1954) que proponía un valor de $1395 W/m^2$. Posteriormente, medidas realizadas por Abbot condujeron al valor de $1322 W/m^2$. Actualmente las dos medidas consideradas más precisas de la constante solar han sido realizadas por la NASA, obtenidas en el periodo 1968-1971 desde un avión volando a gran altitud para minimizar los efectos atmosféricos, y por el World Radiation Center (WRC) en Davos (Suiza). Las dos medidas dieron resultados ligeramente diferentes; el valor obtenido por la NASA fue $1353 W/m^2$, frente al de $1367 W/m^2$ obtenido por el WRC, siendo éste segundo valor el más aceptado actualmente.

2.6 Cuantificación de la Energía de Radiación Solar.

Se conoce como radiometría a la ciencia encargada de la medición de la radiación.

Los conceptos radiométricos más comunes son los siguientes:

Energía de radiación (ϵ): Es la energía total emitida por un cuerpo radiante, dada en Joule (J).

Potencia de radiación o Flujo de energía de radiación: Se define como la razón a la cual emite o recibe un objeto la energía de radiación por unidad de tiempo, expresada como:

$$P = \frac{d\epsilon}{dt}, W \dots \dots \dots (2.6.1)$$

La Irradiancia o densidad de flujo de energía de radiación, se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área:

$$I = \frac{d}{dA} \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) = \frac{dP}{dA}, \left[\frac{W}{m^2} \right] \dots \dots \dots (2.6.2)$$

La Radiancia se define como la densidad de flujo de energía de radiación por unidad de ángulo sólido (expresado en Estereorradianes, Sr), la cual es emitida o recibida por la superficie de un objeto, perpendicular a la dirección de propagación, esto es:

$$L = \frac{d}{d\omega} \frac{d}{\cos\theta dA} \frac{d\epsilon}{dt}, W / \frac{m^2}{Sr} \dots \dots \dots (2.6.3)$$

La Irradiación se mide como la densidad de flujo de energía de radiación que emite o recibe un objeto durante un cierto tiempo, dicho en otras palabras, es la integral de la irradiancia a lo largo de un cierto tiempo, esto es:

$$R = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dA} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) dt = \frac{d}{dA} \left[\int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon \right], J/m^2 \dots \dots \dots (2.6.4)$$

La irradiación también se acostumbra expresar en Watt-Hora/m²(Wh/m²) y en Horas Pico (HP). Estas unidades tienen su equivalente en el SI.

$$1 Wh/m^2 = (3600s)(1 W/m^2) = 3.6 kJ/m^2$$

$$1 HP = 1000 Wh/m^2 = 3.6 MJ/m^2$$

2.7 Definición de las unidades radiométricas básicas.

Considerando el diferencial de la energía radiante dE_λ en un intervalo de tiempo dt ; y para un intervalo específico de longitud de onda (λ a $\lambda + d\lambda$); los cuales cruzan un área determinada dA como se observa en la figura 2.7.1; todo está confinado dentro de un diferencial de ángulo sólido., el cual está en dirección a un ángulo Θ normal al dA . Esta energía es expresada por la ecuación 2.7.1 en términos de intensidad específica I_λ .

$$dE_\lambda = I_\lambda \cos\theta dA d\Omega d\lambda dt \dots \dots \dots (2.7.1)$$

En donde el $\cos\theta dA$ denota el área efectiva en la cual la energía es recibida inicialmente.

La ecuación 2.7.1 define la *intensidad monocromática* conocida también como Irradiancia y de manera general está definida por la siguiente ecuación:

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos\theta d\Omega d\lambda dt dA} \dots \dots \dots (2.7.2)$$

De tal manera, la intensidad está definida por unidades de energía por área, por tiempo, por longitud de onda y por estereorradián. Con esto es evidente que la intensidad implica una dirección del rayo de radiación.

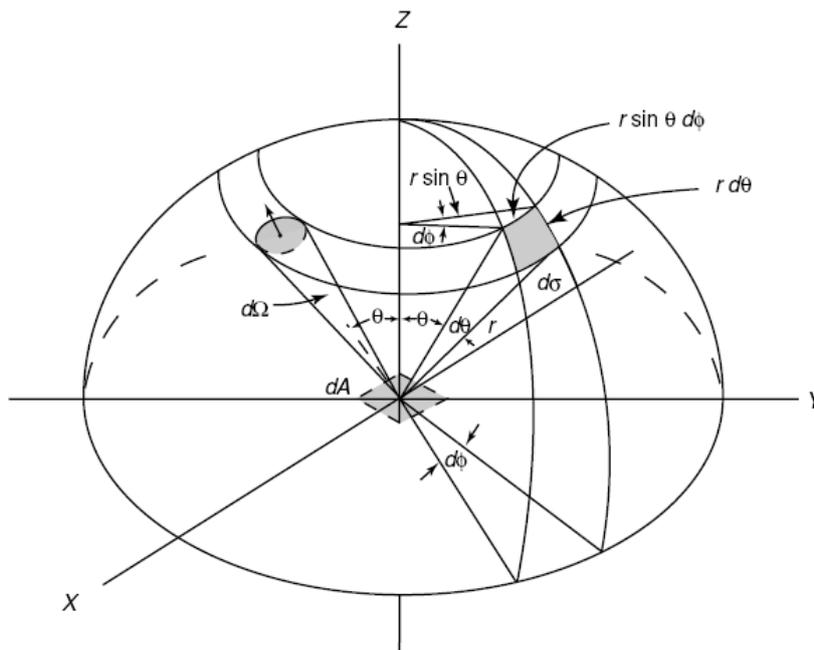


Figura 2.7.1 Ilustración de un diferencial de ángulo sólido y su representación en coordenadas polares. (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84)

La *densidad del flujo monocromático* o también conocido como *irradiancia monocromática* o *energía radiante* es definida por la componente normal de I_λ integrada sobre un ángulo sólido hemisférico y puede ser definida como:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega. \dots\dots\dots 2.7.3$$

Para el caso de radiación isotrópica (es cuando la intensidad es independiente a la dirección), la densidad de flujo monocromático se expresa como:

$$F_\lambda = \pi I_\lambda \dots\dots\dots 2.7.4$$

La densidad de flujo de energía radiante total, o *irradiancia*, para todas las longitudes de onda (energía por unidad de área, por tiempo), puede ser obtenida integrando la densidad de flujo monocromática sobre todo el espectro electromagnético.

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} \dots\dots\dots 2.7.5$$

Por otra parte, el flujo total f , o radiación W (energía por tiempo) está definida por

$$f = \int_A F dA \dots\dots\dots 2.7.6$$

La densidad de flujo monocromático en función de la frecuencia podría ser escrito de la forma:

$$F_{\nu} = \frac{dF}{d\nu} \dots\dots\dots 2.7.7$$

Para la relación entre longitud de onda y frecuencia se utiliza la siguiente expresión:

$$F_{\nu} = -(\lambda^2/c)F_{\lambda} \dots\dots\dots 2.7.8$$

De la misma manera, la intensidad en relación con la longitud de onda y la frecuencia está representado por:

$$I_{\nu} = -(\lambda^2/c)I_{\lambda} \dots\dots\dots 2.7.9$$

Cuando la densidad de flujo o la irradiancia son sobre una superficie determinada, la cantidad es llamada emitancia. Cuando ésta se expresa en términos de la longitud de onda ésta se refiere a emitancia monocromática.

La intensidad o la radiancia es llamada también *luminancia*. El flujo total recibido en una superficie es llamado luminosidad. Los conceptos básicos de cantidades radiométricas se resumen en la siguiente tabla 2.7.1

| Símbolo | Cantidad | Dimensiones | Unidades |
|----------|------------------------------------|--------------|--|
| <i>E</i> | <i>Energía</i> | ML^2T^{-2} | Joule (J) |
| <i>f</i> | Flujo | ML^2T^{-3} | Joule por segundo (J/s, W) |
| <i>F</i> | Densidad de Flujo (Irradiancia) | MT^{-3} | Joule por segundo por metro cuadrado. (W/m ²) |
| <i>I</i> | Intensidad (radiancia) | MT^{-3} | Joule por segundo por metro por estereorradián. (W/m ² sr) |

Tabla 2.7.1. Cantidades Radiométricas. M= masa, L= longitud, T= tiempo.

Capítulo III

La Radiación Ultravioleta (UVR)

3.1 Características de la radiación Ultravioleta

La radiación ultravioleta ocupa una pequeña porción del espectro electromagnético. Ésta comprende de los 400 a los 100 nm, para fines prácticos y para agilizar los estudios se ha realizado una subdivisión del espectro de la radiación ultravioleta, la idea de realizar esta subdivisión nació porque al decrecer su longitud de onda, la radiación UV impacta de manera significativa la biología de los seres vivos [1].

La radiación UV es dividida en tres grupos: radiación Ultravioleta tipo C, Radiación Ultravioleta tipo B y Radiación Ultravioleta tipo A.

De acuerdo al Segundo congreso Internacional sobre Luz realizado en Agosto de 1932 la radiación UV fue dividida de la siguiente manera:

| Tipo de radiación | Longitud de Onda |
|-------------------|------------------|
| UVA | 400-315 nm |
| UVB | 315-280 nm |
| UVC | 280-100 nm |

Tabla 3.1.1 Clasificación de la radiación ultravioleta de acuerdo al segundo congreso de la luz, agosto de 1932

La división de la radiación Ultravioleta dependerá de acuerdo a su aplicación o para lo que se quiera estudiar.

A continuación se da una descripción de cada división

Ultravioleta tipo A ó Ultravioleta Cercano (400-315 nm): Esta longitud de onda tiene la característica de tener frontera con la luz visible y llegar hasta longitudes de onda que alcanzan la superficie de la tierra.

Ultravioleta tipo B ó Ultravioleta Medio (315-280 nm): Ésta se encuentra en el límite de la onda corta que incide en la superficie terrestre y la porción de mayor absorción de oxígeno molecular.

Ultravioleta tipo C ó Ultravioleta lejano (280-100 nm): Ésta se extiende a partir de la zona de mayor absorción de oxígeno molecular hasta el límite de transmisión de longitudes de onda del fluoruro de litio.

3.2 Factores que influyen en los niveles de radiación UV

El nivel de radiación UV en cierto lugar de la superficie terrestre depende de factores como:

- Posición del Sol.
- Altitud.
- Latitud.
- Nubosidad.
- Cantidad de ozono en la atmósfera.
- Niveles de contaminación.

Los mayores niveles de radiación ultravioleta se presentan cuando el Sol alcanza su elevación máxima, esto es, cuando los rayos están en una posición normal a la superficie expuesta [3].

En zonas diferentes a los trópicos, la máxima radiación ultravioleta se presentará en el verano al medio día.

Las variaciones espaciales y temporales de la irradiancia de la radiación UV en la superficie de la tierra dependen de factores como: la elevación solar, la latitud, la altitud, la capa de ozono y las condiciones atmosféricas locales.

3.2.1 La capa de ozono.

El ozono que contiene la estratósfera forma una capa alrededor de la tierra protegiendo a la biósfera de la mortal radiación UV proveniente del Sol. El desgaste de la capa estratosférica de ozono ha incrementado la radiación que pasa a la superficie terrestre.

Los informes recientes sugieren que la capa protectora de ozono se está agotando a un ritmo suficiente como para dejar "agujeros" sobre la Antártida, provocando una mayor exposición UV para los habitantes de países como Nueva Zelanda y el sur de Australia. Algunos agujeros de ozono han sido reportados en partes de Europa y América del Norte.

Debido a esto, es importante cuantificar la radiación UV recibida, ya que ésta es capaz de romper algunos tipos de moléculas biológicas, como el DNA (Al-Aruri, 1990).

3.2.2 La elevación Solar.

El flujo de la radiación ultravioleta, principalmente el de la radiación del tipo B, depende de la altura solar del Sol. Este factor varía de acuerdo a las estaciones del año, hora del día y la latitud del lugar, por lo tanto es de esperarse que en los meses de verano se registren los valores máximos del flujo de la radiación UV recibida en la superficie terrestre. En los meses de verano los rayos del tipo UVB son de dos a tres veces más intensos en la zona ecuatorial que por ejemplo en el norte de Europa.

3.2.3 La Atenuación de la radiación solar.

La distribución espectral de la radiación solar en la parte superior de la atmósfera se muestra en la figura 3.2.1. Como se observa, existen tres mecanismos de atenuación de la radiación solar durante su viaje a través de la atmósfera: absorción, reflexión y dispersión. Se puede ejemplificar de la manera siguiente: Si tenemos 100 unidades de energía proveniente del Sol que entran a través de la atmósfera, 24 unidades serán reflejadas (20 por las de las nubes y 4 por la tierra), 6 son dispersadas y 19 absorbidas por la atmósfera (25 unidades) y las 51 unidades restantes son absorbidas por la Tierra.

La energía dispersada se conoce como radiación difusa. Aunque muchos gases pueden absorber la radiación, solo las moléculas de aire y las partículas pueden dispersarla; cuando ocurre esto es cuando se puede apreciar el azul intenso del cielo en un día despejado. Las partículas de nubes (gotitas de agua y cristales de hielo), también pueden absorber o dispersar la radiación, produciendo grandes cúmulos grises en el cielo (dependiendo del espesor óptico será la intensidad de la tonalidad de las nubes).

La atenuación de la radiación solar debido a la atmosfera terrestre es causada por diferentes medios de dispersión: moléculas de aire (dispersión de Rayleigh), aerosoles (dispersión de Mie) y medios de absorción como: vapor de agua, algunos otros gases, polvo y nubes. En el caso de las moléculas de aire, la dispersión ocurre principalmente en la longitud de onda que abarca del UV al infrarrojo cercano. La dispersión decrece con la longitud de onda: entre más corta sea la longitud de onda, aumentará el efecto de dispersión. Aunque la dispersión de la radiación solar por las moléculas de aire es una función continua de la longitud de onda, la absorción de la radiación solar por gases atmosféricos es un proceso selectivo; esto significa que estos gases absorben energía solar en bandas espectrales específicas, y no es igual en todo el espectro solar. Los principales atenuadores de las longitudes de onda corta son: Vapor de agua (H_2O), Dióxido de Carbono (CO_2), Ozono (O_3), Ácido Nitroso (N_2O), Monóxido de Carbono (CO), Oxígeno (O_2), Metano (CH_4); y entre los menores atenuadores están el Amoniaco (NH_3), el Óxido Nítrico (NO), el Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y el Dióxido Sulfúrico (SO_2).

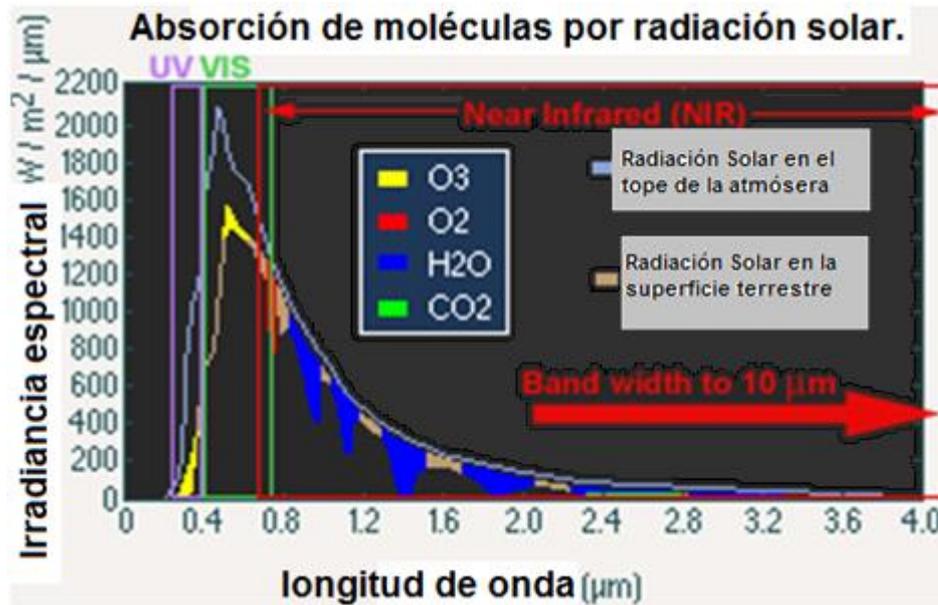


Figura 3.2.3. 1. Absorción de la Radiación Solar (Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", International Geophysics Series, Vol. 84).

3.2.4 Dependencia de la radiación UV con la nubosidad.

La nubosidad tiene más influencia sobre la irradiación UV que cualquier otra variable atmosférica. Los efectos de la nubosidad son difíciles de determinar, debido a la complejidad geométrica y a la importancia de que los modelos estén bien detallados, por lo tanto se utilizan modelos tridimensionales.

Bajo condiciones estándares, las nubes disminuyen la radiación UV, sin embargo en ciertos casos éstas pueden aumentar la radiación hasta un 25%. (Cuando el cielo no está totalmente cerrado).

La condición más importante es si el Sol está o no obstruido por las nubes. En el análisis para un lugar específico esto puede representar una dificultad incluso para los estudios con satélites. La recomendación para estos casos es realizar un histograma de la cantidad de transmisión como función de cantidad de nubosidad, en donde existirá un mínimo cuando el Sol haya sido tapado por las nubes, mientras que existe un máximo cuando las nubes no han bloqueado al Sol.

3.2.5 Albedo.

Las propiedades reflectantes bajas tienen una influencia sobre la exposición UV. La mayoría de las superficies naturales como la hierba, el suelo y el agua reflejan menos de 10% de la radiación UV incidente. Sin embargo, la nieve fresca refleja alrededor de un 80% de los rayos UV. Durante la primavera en altitudes más altas, bajo cielos despejados, la reflexión de la nieve podría aumentar los niveles de exposición a la radiación UV a los que existen durante el verano. La arena también refleja alrededor de entre un 10 y 25% la radiación UV, por lo tanto puede aumentar significativamente la exposición UV en la playa.

Se destaca que la radiación UV reflejada es de las principales fuentes de exposición al ojo. Efectos agudos, tales como la ceguera de nieve, mientras se practica esquí o la fotoqueratitis, mientras se broncea en la playa, pueden ser resultado de la radiación UV reflejada ya sea por la nieve o la arena, respectivamente.

3.2.6 Dependencia con la Altitud.

Aún cuando este efecto había sido ignorado hasta hace poco, se ha encontrado que a mayor altitud, la dependencia de la irradiancia UV con el SZA (Solar Zenith Angle) cambiarán.

Modelos RT (Radiative Transfer models): con estos modelos se obtienen datos de irradiancia en la superficie bajo condiciones de cielo despejado con cantidades de ozono y tipo de aerosol que contiene la atmósfera.

La dificultad en la previsión del índice UV está en cuantificar la cantidad de ozono y la transmisión de la radiación UV a lo largo de la atmósfera bajo la presencia de nubosidad y aerosoles.

La dificultad de estimar con precisión la presencia de aerosoles en una localidad específica, da como resultado grandes incertidumbres en la medición del índice UV.

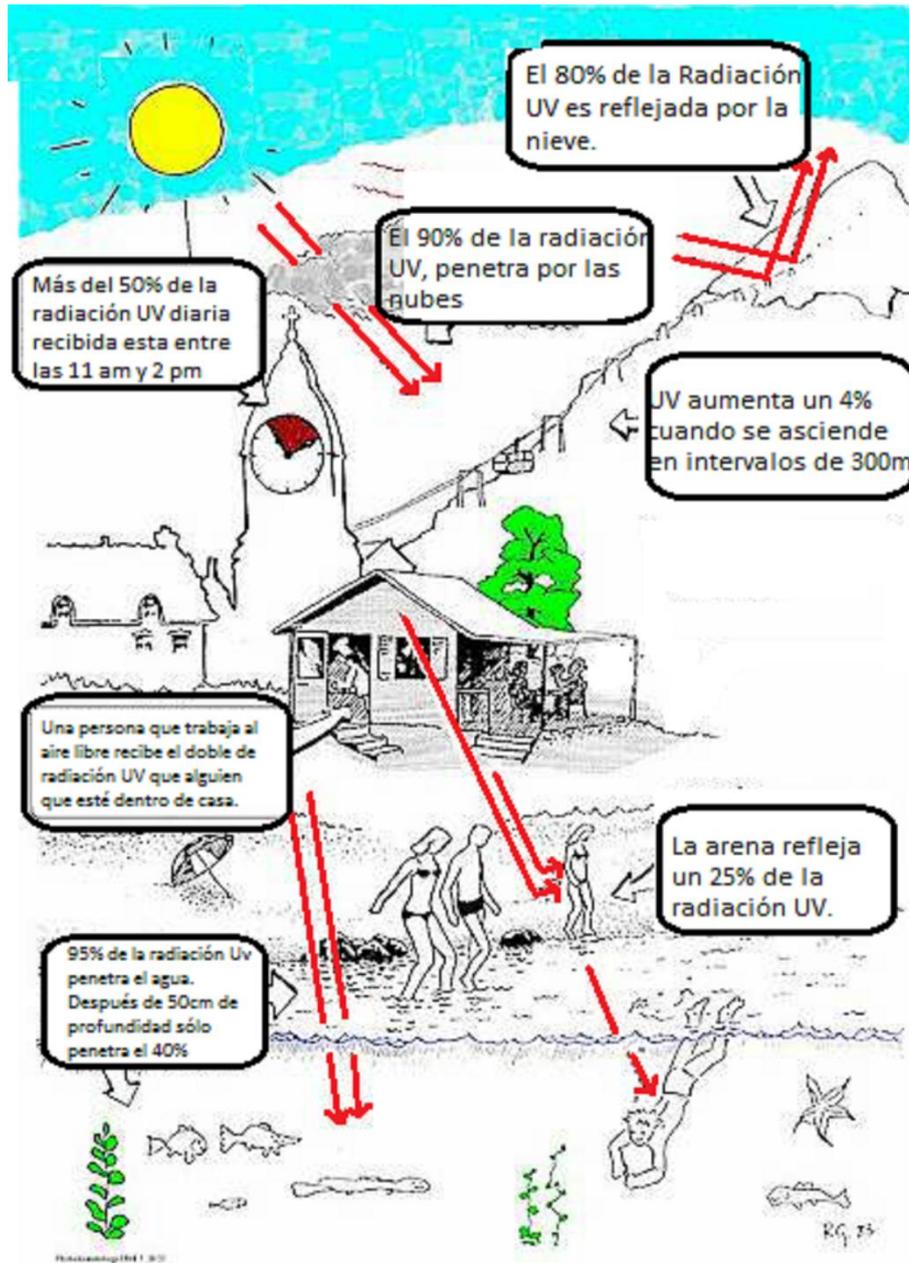


Figura 3.2.6. Factores que afectan los rayos UV (Modificado de Diffey BL y O Larko, climatología clínica. Photodermatology 1 984, 1 :30-37. Comisión Perm.)

3.3 Posibles daños a la salud debidos a la Radiación UV.

Mientras más corta sea la longitud de onda, es más peligrosa y es causa de daños irreversibles para la salud [4].

Radiación UV-A

Este tipo es el menos peligroso de la radiación ultravioleta, aunque llega a la Tierra en forma considerable.

Alguno de los daños biológicos que puede causar son los siguientes:

- Inmunosupresión
- Lesiones crónicas producidas por la luz (arrugas)
- Formación de radicales libres que producen alergias solares (fotodermatitis poliforme)

Radiación UV-B

Este tipo de radiación es potencialmente dañina, ya que causa problemas como:

- Subyuga el crecimiento de las plantas

Una exposición prolongada a este tipo de radiación puede causar daños a la salud humana tales como:

- Cataratas.
- Inflamaciones en los ojos.
- Cáncer de piel.
- Debilitamiento del sistema inmunológico, por lo tanto crece la probabilidad de contraer infecciones.
- Disminuye la eficacia de las vacunas, debido a que la radiación ultravioleta tipo B actúa como un inmunodepresor.

Es importante señalar que la cantidad de radiación ultravioleta tipo B es proporcional al deterioro de la capa de ozono ya que una reducción en esta capa implica un aumento en la radiación en la superficie terrestre.

Radiación UV-C

Debido a que los rayos ultravioleta tipo C poseen un alto nivel energético es la forma más dañina de la radiación ultravioleta, afortunadamente esta radiación es absorbida por el ozono y el oxígeno de la estratósfera.

3.3.1 EXPOSICIÓN HUMANA.

Para la mayoría de los seres vivos el Sol es la principal fuente de exposición a los rayos UV. En algunos casos esta exposición se da de forma deliberada (bronceado de la piel), en otros casos es el resultado de actividades al aire libre.

Los niveles de la radiación UV cambian constantemente a lo largo del día; por lo tanto la exposición personal a los rayos UV dependerá de:

- La geometría de la exposición: La cantidad de radiación que reciben las partes del cuerpo debido a su orientación con respecto al Sol y a la reflexión de las superficies de la tierra.
- La duración de la exposición: Se refiere a la exposición total diaria a los rayos UV relacionados con la intensidad de esos rayos, en función del tiempo de exposición.
- Protección personal: La exposición se puede reducir considerablemente con el uso de la protección personal, ésta puede ser con prendas de vestir adecuadas; como sombreros y gafas bien diseñadas.
- Hábitos y Costumbres: Se debe evitar la exposición a la radiación UV cuando ésta alcanza los niveles más intensos, que por lo regular ocurre en el medio día de los meses de primavera y verano.

Fuentes artificiales.

Una exposición a radiación UV puede ser por medio de fuentes artificiales; por ejemplo en el sector industrial, para tratamientos médicos o con fines cosméticos (camas solares). A continuación se mencionan algunas fuentes artificiales para la exposición humana.

- **Camas de bronceado.** Éstas tienen la característica de broncear a las personas mediante la emisión de los rayos UVA y UVB. El uso continuo de estos aparatos puede contribuir para alcanzar el límite de radiación UV que puede recibir una persona al año. El uso de protección para los ojos, como gafas o lentes de sol debería ser obligatorio. El personal que trabaja en los salones de bronceado también están expuestos a los rayos UV.

- **Exposición médica.** Se utilizan fuentes de UV para una gran variedad de propósitos médicos tanto para fines terapéuticos así como para diagnósticos. El grado de exposición varía considerablemente de acuerdo al tipo de tratamiento.

- **Exposición industrial/comercial.** En esta sección la fuente más importante de radiación UV es la soldadura por arco, los niveles de radiación UV alrededor del equipo de soldadura de arco son muy altos lo que causa lesiones agudas en los ojos y en la piel.

- **Iluminación.** Las lámparas fluorescentes son principalmente usadas para áreas de trabajo; estas lámparas emiten pequeñas cantidades de radiación UV y por lo general sólo contribuyen con un pequeño porcentaje de la exposición anual de una persona. Las lámparas sin pantalla a una distancia muy corta de una persona, puede emitir niveles de radiación UV suficientes para causar una lesión aguda. Algunos filtros de las lámparas puede reducir significativamente estos niveles.

3.3.2 Efectos de la radiación UV sobre los seres humanos.

3.3.2 .1 La piel.

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, tiene una superficie de más de 1.5m² en un adulto promedio. Esta parte del cuerpo funciona como una primera etapa de protección contra la acción de productos químicos, la radiación, así como de infecciones. Además la piel también impide la evaporación de los fluidos corporales.

La dermis está compuesta por tres partes; la epidermis (parte más extensa de la piel, la cual se renueva continuamente), la dermis y el tejido subcutáneo.

La epidermis es separada de la dermis por una membrana compuesta por queratinocitos y melanocitos. Los melanocitos se encargan de sintetizar la melanina y la transfieren a los queratinocitos próximos, en esta membrana también se encuentran otras células llamadas, células de Langerhans, las cuáles son capaces de reconocer sustancias extrañas y nocivas para el sistema inmunológico; la actividad de dichas células es muy sensible a la radiación Ultravioleta.

La dermis es una capa fibrosa compuesta de colágeno; la cuál proporciona a la piel su elasticidad y su fuerza. Estas fibras tienden a desgarrarse al ser expuestas a una alta radiación Ultravioleta y como efecto se reducirá la elasticidad de la piel dando origen al envejecimiento prematuro de la piel.

La interacción de la piel humana con los rayos ultravioleta, también presenta fenómenos de absorción, refracción y dispersión; por tanto el nivel de exposición en las distintas capas de la piel será más bajo que la radiación incidente.

Para fines prácticos la piel se agrupo en 3 grupos generales tomando como factor principal el grado de sensibilidad de cada tipo de piel frente a los rayos Ultravioletas.

Tipo de piel ligeramente pigmentada. La exposición a la radiación UV puede causar quemaduras graves y muy poco bronceado. Las personas que pertenecen a este grupo son las que tienen características físicas como cabello rubio o rojizo, ojos azules y pecas. La

población perteneciente a este conjunto debe tener un cuidado muy especial en lo relativo a su exposición al Sol.

Tipo de piel medianamente pigmentada. Este tipo de piel al ser expuesta a la radiación Solar puede presentar algunas lesiones, se broncean un poco. En este grupo se encuentran las personas con características físicas como cabello castaño y ojos cafés.

Tipo de piel muy pigmentada. La exposición a los rayos solares no es un detonante de lesiones cutáneas. La población que tiene la piel oscura posee una protección natural muy alta contra los rayos UV, por lo tanto se reduce el riesgo de que padezcan cáncer de piel; pero son igual de vulnerables que los otros grupos a desarrollar padecimientos oculares y alteraciones en el sistema inmunológico; al exponerse a una radiación de onda corta excesiva.

3.2.2.1 .2 Efectos nocivos

Corto plazo: Eritema (quemadura solar) y bronceado.

Largo plazo: envejecimiento prematuro, engrosamiento cutáneo, aparición de pecas y lunares, queratosis solar y cáncer de piel no melanoma ver figura 3.2.2.



Figura 3.2.2. Melanoma y Queratosis solar(World Health Organization 2002).

Es importante recalcar que el cáncer de piel no melanoma es el tipo de cáncer más frecuente en los seres humanos. Sin embargo de todos estos padecimientos el más común es el eritema.

3.3.2.2 Los Ojos

El ojo humano es un sistema óptico formado por un dioptrio esférico y una lente, que reciben, respectivamente, el nombre de córnea y cristalino, y que son capaces de formar una imagen de los objetos sobre la superficie interna del ojo, en una zona denominada retina, que es sensible a la luz. Los mecanismos de protección de los ojos tales como la constricción de la pupila y el cierre de los párpados, son activados por la luz visible brillante, de ningún modo por la radiación Ultravioleta; por lo tanto no existe ningún beneficio ocular debido a los rayos Ultravioletas.

3.3.2.2.1 Efectos nocivos de la radiación UV sobre los ojos.

Los principales efectos nocivos son las cataratas y la fotoqueratitis.

La catarata es la principal causa de ceguera en el mundo. Se caracterizan por la pérdida de transparencia del cristalino. La catarata aparece en diferentes grados en la mayoría de los individuos a medida que envejecen. Es susceptible de extirpación quirúrgica, y con la inserción de una lente intraocular u otros medios de corrección óptica la visión puede ser restaurada. Está comprobado que la exposición permanente a los rayos UV está asociada con la formación de ciertos tipos de cataratas.

La Fotoqueratitis es el principal efecto agudo de una intensa exposición a los rayos UV. La fotoqueratitis se caracteriza por daños en las capas externas de la córnea, lo cual causa dolor y disminución de la visión.

3.3.2.3 EFECTOS NOCIVOS DE LA RADIACIÓN UV SOBRE EL SISTEMA INMUNOLÓGICO.

La exposición UV de la piel a niveles ambientales suprime algunas de las respuestas inmunitarias en los seres humanos. Por lo tanto, existe la preocupación de que la exposición a los rayos UV pueden aumentar el riesgo de infección, disminuir la eficacia de las vacunas, y reducir las defensas del cuerpo contra el cáncer de piel. Estas respuestas parecen ocurrir en todas las personas independientemente de su color de piel. Una de las consecuencias de la exposición a rayos UV, son las erupciones recurrentes de virus del herpes simple, sobre todo en el labio (llamado "herpes labial").

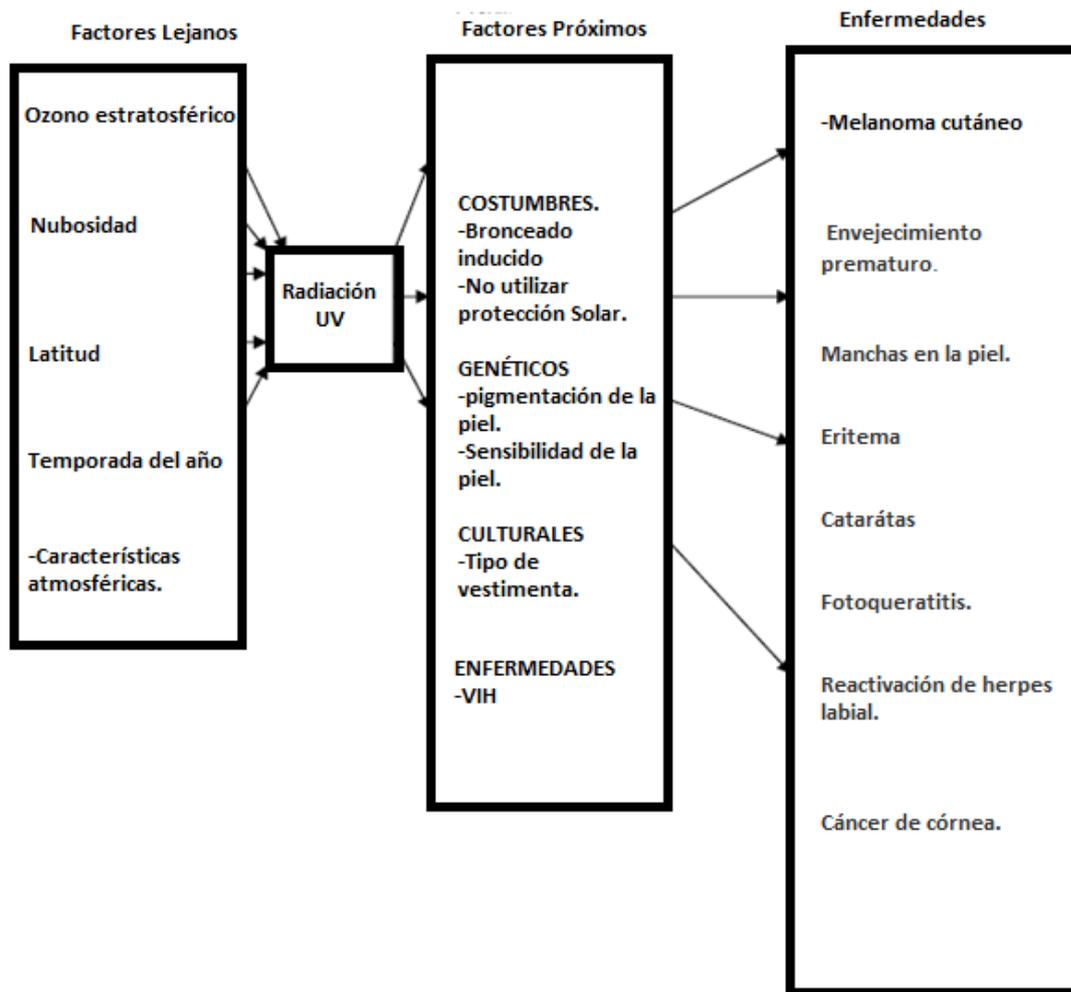


Figura 3.3.2.3.1 Red causal de impactos en la salud debidos a la radiación UV (World Health Organization 2002).

Es primordial tomar en cuenta que exponerse a la radiación ultravioleta también es necesario, debido a que ayuda al organismo humano a sintetizar la vitamina D, la cuál es esencial para la salud de los músculos y esqueleto. En la figura 3.3.2.3.2, se observa que una vida saludable no es cuando se evita por completo la exposición a los rayos UV, ya que una baja exposición originaría una deficiencia en el organismo de vitamina D, lo que a su vez origina enfermedades como raquitismo y osteoporosis. Investigaciones recientes resaltan que la vitamina D también juega un papel importante en el sistema inmunológico, ya que la deficiencia de la vitamina D puede ser un factor causal para desencadenar algunos tipos de cáncer y contribuir al desarrollo de enfermedades autoinmunes como la esclerosis múltiple y la diabetes tipo 1.

Esquema de la relación entre la exposición a la radiación UV (UVR) y las enfermedades

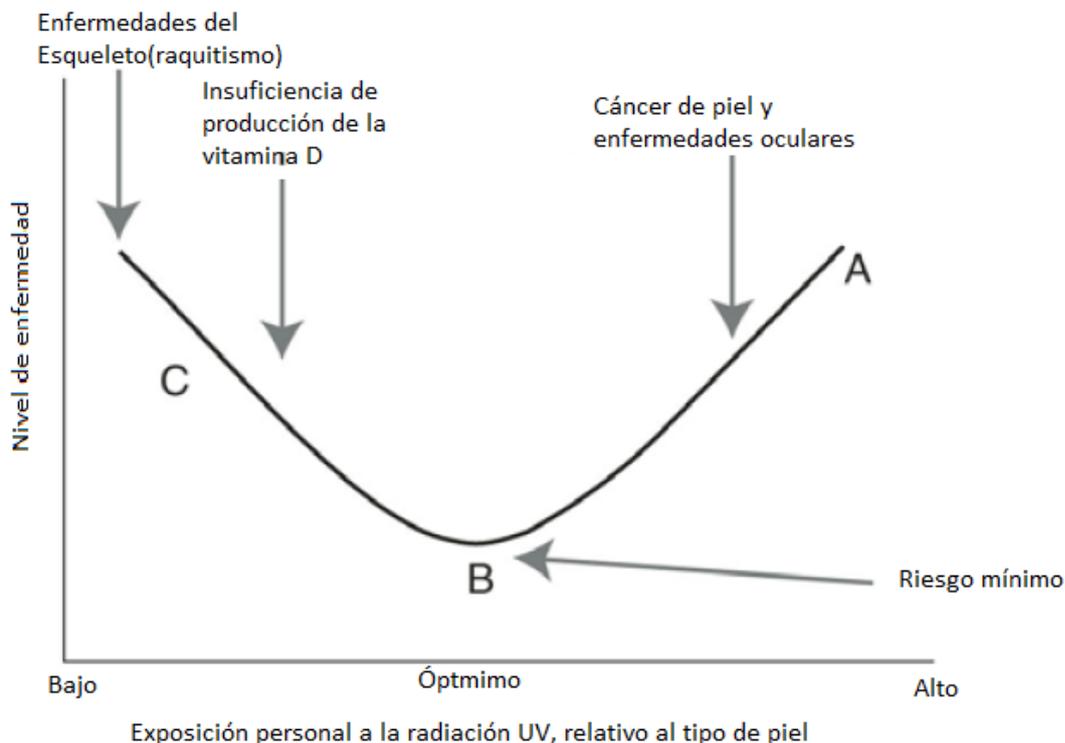


Figura 3.3.2.3.2. Los puntos A y C representan una inapropiada UVR exposición. El punto B representa una adecuada exposición. (Martinez Lozano, Grupo de Radiación Solar Valencia 2003)

Capítulo IV.

Medición de la radiación Solar.

4.1 Sensores para la medición de la Radiación Solar.

Es importante conocer el funcionamiento de los sensores que miden la radiación solar, estos sensores pueden ser de dos tipos: sensores termoeléctricos (termopilas), o sensores fotovoltaicos [9].

Sensores termoeléctricos.

El elemento principal de los sensores termoeléctricos es el termopar, y con estos se construyen las termopilas. Un termopar está compuesto por dos diferentes conductores con los cuales se hacen un par de juntas alternando los conductores para formar un circuito cerrado. Si las juntas se ponen en contacto con diferentes fuentes de calor y se establece un gradiente de temperatura, se generará una fuerza electromotriz. Una termopila es un conjunto de termopares conectados en serie, de tal forma que la fuerza electromotriz total será la suma de las fuerzas electromotrices de los elementos que la forman. El arreglo de los termopares se realiza configurando áreas conocidas como de “juntas frías” (a temperatura ambiente) y áreas de “juntas calientes” (calentados por radiación). El área de la juntas calientes es la que constituye realmente el sensor de radiación, es por esta razón, que además de ser altamente absorbente, debe de ser fabricado con un material no selectivo a la radiación de diferentes longitudes de onda, por lo tanto su absorción espectral debe ser constante en todas las longitudes de onda del espectro ($0.3 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$) y ser lo más próxima a 100%. [18]

Un sensor termoeléctrico se caracteriza por ser uno de los mejores instrumentos para medir los flujos de energía de la radiación; sin embargo siempre se deben de calibrar respecto de instrumentos con características físicas y de diseño capaces de medir de forma absoluta los flujos de radiación, con niveles altos de exactitud.

Sensores fotovoltaicos.

Los sensores fotovoltaicos por lo regular son fotodiodos de silicio, los cuales por sus características físicas han resultado ser buenos simuladores de piranómetros, esto porque las comparaciones con los piranómetros de primera clase a los que se ha sometido bajo diferentes condiciones de cielo, han dado como resultado un alto grado de correlación estadística, lo cual establece que con este tipo de sensores se puede tener una precisión dentro de un $\pm 5\%$ para días nublados y hasta un $\pm 2\%$ para días despejados[3].

El principal problema que presentan los sensores fotovoltaicos se deriva del manejo de la energía entrante, ya que cuando existe un flujo mayor los sensores pueden llegar a su capacidad límite y no mostrarán de manera correcta el monitoreo del flujo de la radiación solar [18].

4.1.2 Sensores para el registro de la radiación Ultravioleta.

Para el monitoreo de la radiación UV no existen muchas compañías que se dediquen a la fabricación de sensores de este tipo, ya que para su fabricación se tiene que poner énfasis en el estudio de la selectividad en las longitudes de onda. Para lograr esto los desarrolladores de instrumentos han tenido que realizar grandes investigaciones sobre materiales que tengan alta sensibilidad en longitudes de onda específicas.[18]

4.2 Estación Meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería.

En la Planta Solar del Instituto de Ingeniería se han venido desarrollando diversos proyectos encaminados a promover el uso de las energías renovables, particularmente la energía solar.

Uno de los aspectos que es conveniente resaltar es que en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, no solamente se están desarrollando proyectos para la generación de energía eléctrica, sino que también se están realizando investigaciones para el uso de la energía solar en la desintoxicación de agua.

Es por eso que es de vital importancia que la planta solar cuente con una estación meteorológica completa y actualizada para obtener un registro confiable de las variables meteorológicas que intervienen en el desarrollo de dichos proyectos.[18]

4.2.1 Estación Meteorológica.

Una estación meteorológica es un sistema integrado por varios sensores, los cuales están conectados a un dispositivo llamado datalogger, quien se encarga de efectuar la adquisición y procesamiento de sus señales emitidas para su posterior almacenamiento en una base de datos.

La estación meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, es un sistema integrado por los siguientes sensores:

Un piranómetro, un termohigrómetro, un radiómetro, un anemómetro y veleta; y estos están conectados a un datalogger Modelo CR10 de Campbell Scientific.[18]

4.2.1.1 Piranómetro de Banda Giratoria

RSR (Rotating Shadowband Radiometer) desarrollado por Ascension Technologies. Ver figura 4.2.1.



Figura 4.2.1. Unidad Principal RSR.

El piranómetro de banda giratoria fue desarrollado por Ascension Technologies Inc. (ATI, Waltham, MA) en el año de 1990 por encargo de las autoridades de energía del gobierno de Nueva York.

El piranómetro de banda giratoria es el único instrumento que proporciona mediciones directas de irradiancia global e irradiancia difusa, y permite calcular los valores de la irradiancia directa normal.

Los principales componentes del RSR son:

- 1.- Piranómetro de silicio de LI-COR modelo PY26523, el cual está montado en un plano horizontal, y es usado para medir la irradiancia global y difusa.
- 2.- Banda giratoria y motor para su rotación.

3.-Adquisidor de datos CR-10 producido por Campbell Scientific, Inc.

4.- Caja de fibra de vidrio para la protección del CR-10

El adquisidor de datos o datalogger considera los parámetros de la latitud y longitud del lugar donde está ubicado el RSR, así como una base en tiempo real (reloj fechador) para calcular la posición solar.

Operación del RSR

El RSR con su piranómetro de silicio mide directamente cada minuto la irradiancia global horizontal (GHI), después cada 54 segundos, el registrador de datos acciona el motor para hacer girar la banda rotatoria; una vez terminada la rotación alrededor del piranómetro, el registrador adquiere los datos con una frecuencia alta, a fin de tomar el valor más significativo de irradiancia difusa.

El datalogger calcula el ángulo cenital con los modelos que describen el movimiento del sol, para lo cual necesita la fecha y las coordenadas del lugar.

Teniendo el ángulo cenital, la irradiancia global horizontal y la irradiancia difusa, la irradiancia directa normal es calculada usando la siguiente ecuación:

$$GHI = DHI + Id \cos(z).....(4.1)$$

Donde:

GHI es la irradiancia global horizontal,

DHI es la irradiancia difusa horizontal,

Id es la irradiancia directa normal,

y z es el ángulo cenital.

Después de un periodo de 10 minutos, los 10 valores tomados por el datalogger son promediados y guardados en cierto archivo destinado para el almacenamiento de datos.

Ventajas del piranómetro de banda giratoria sobre los instrumentos basados en termopilas.

- Algunos estudios han arrojado que los piranómetros con fotodiodo de silicio tienen una mayor tolerancia a los efectos de la suciedad que los radiómetros con termopilas.
- Los fotodiodos de silicio tienen una estabilidad mayor, por lo que tienen la ventaja de que los periodos de re-calibración sean más prolongados.
- El RSR es un sistema de costo accesible, en comparación a otros radiómetros.

Desventajas del RSR.

- Los fotodiodos de silicio son muy sensibles a los cambios espectrales y de temperatura, por lo que las mediciones del RSR tendrán cierta incertidumbre.
- Requiere de una verificación continua del reloj fechador del datalogger para que calcule el ángulo cenit correctamente. El datalogger necesita ser inicializado regularmente, debido a que el tiempo se desfasa aproximadamente un minuto por mes. Para conocer en detalle la conexión de los instrumentos ver Quiñones A., Alamanza R. "Modernización de la Estación Meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería UNAM" Ingeniería de la Energía Solar Series del Instituto de Ingeniería.

4.2.2 Radiómetro EPPLEY

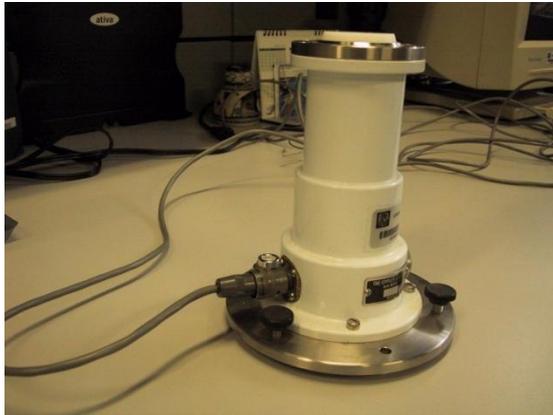


Figura. 4.3.2 Radiómetro Eppley

Éste es un instrumento que fue desarrollado para la medición de la radiación solar UV. Las principales características de diseño son que es de fácil operación y se combina con su óptimo desempeño que se compara con los piranómetros meteorológicos destinados a registro de la radiación total de onda corta emitida por el Sol y el cielo sobre una superficie horizontal. Otra característica importante es que este radiómetro prescinde de métodos sofisticados para amplificar la señal, ya que utiliza potenciómetros.

El radiómetro Eppley UV utiliza un recipiente herméticamente cerrado de selenio y una celda fotoeléctrica, que está protegida por una ventana de cuarzo.

Opera a bajos niveles de luz y en condiciones de mínima fuga de corriente eléctrica, a fin de garantizar un rendimiento alto en la estabilidad en periodos largos de exposición.

El radiómetro EPPLEY tiene un disco compuesto de cuarzo opaco que al actuar como receptor, no sólo reduce el flujo de radiación en niveles aceptables, sino que también proporciona datos mediante la ley del coseno de Lambert.

El encapsulado de banda estrecha filtra la respuesta espectral de la celda fotoeléctrica para el intervalo de 295-385 nanómetros de longitud de onda, con una insignificante transmisión secundaria.[18]

Por estar construido de latón cromado, es ideal para soportar las inclemencias del tiempo. Este radiómetro contiene un tornillo nivelador ajustable y un nivel de burbuja circular.

La calibración del sensor se realiza bajo condiciones de exposición naturales.

Los radiómetros se han diseñado para mediciones precisas de la radiación ultravioleta de la atmósfera para tres diferentes rangos espectrales. Todos los modelos miden la radiación UV global, es decir, la suma directa de la radiación solar y la radiación que ha sido dispersada por las partículas o moléculas en el aire.

La respuesta angular sigue al coseno del ángulo cenital como un ideal de la superficie de Lambert, el filtro óptico interno controla la temperatura de 25 °C, independiente a la temperatura externa, esto elimina las variaciones de la sensibilidad espectral causadas por el cambio de temperaturas.[18]

Instalación.

Al instalar el radiómetro se debe considerar lo siguiente:

1. El radiómetro debe instalarse lo más alto posible para minimizar la proyección de sombras producidas por árboles, edificios, etc.
2. El radiómetro deben ser cuidadosamente instalado en el plano horizontal, con visibilidad plena de todo el horizonte. Utilice el nivel de burbuja incorporado para encontrar la posición correcta.
3. La instalación del radiómetro deben garantizar la ventilación natural para disipar el calor causado por la radiación solar y la energía eléctrica, para evitar algún daño al equipo. Para conocer en detalle la conexión de los instrumentos ver Quiñones A., Alamanza R. “Modernización de la Estación Meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería UNAM” Ingeniería de la Energía Solar Series del Instituto de Ingeniería.

4.3 Validación y control de calidad de los datos de radiación.

La validación y el control de calidad de los datos de radiación son tan importantes como los procesos de medición, por tal motivo se tiene que seguir ciertos pasos para asegurar la precisión de los datos.

Dentro de los procesos de control de calidad de los datos se puede recurrir a mediciones redundantes o a la comparación con algoritmos o tablas de radiación máxima para días claros.

Por lo tanto se recomienda que el programa de monitoreo de datos esté conformado de procesos redundantes, lo ideal sería utilizar sistemas de medida y registros independientes, por lo que mediante comparaciones realizadas en estados estacionarios (días despejados, pequeños ángulos cenitales y poca turbiedad atmosférica), se podrían detectar valores erróneos en donde las disparidades entre los sistemas superaran los errores de medición típicos, que por lo regular son menores al 4%.

Para la radiación global, Iqbal (1983) recoge procedimientos de varios autores donde se proponen valores máximos diarios para días despejados. Según algunos autores una diferencia aceptable es de alrededor un 20% en invierno y de 15% para el verano.

Para el caso de la base de datos que se está generando con la estación radiométrica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, los datos se han validado mediante el algoritmo propuesto por S. Younes (ver figura 4.3.1)

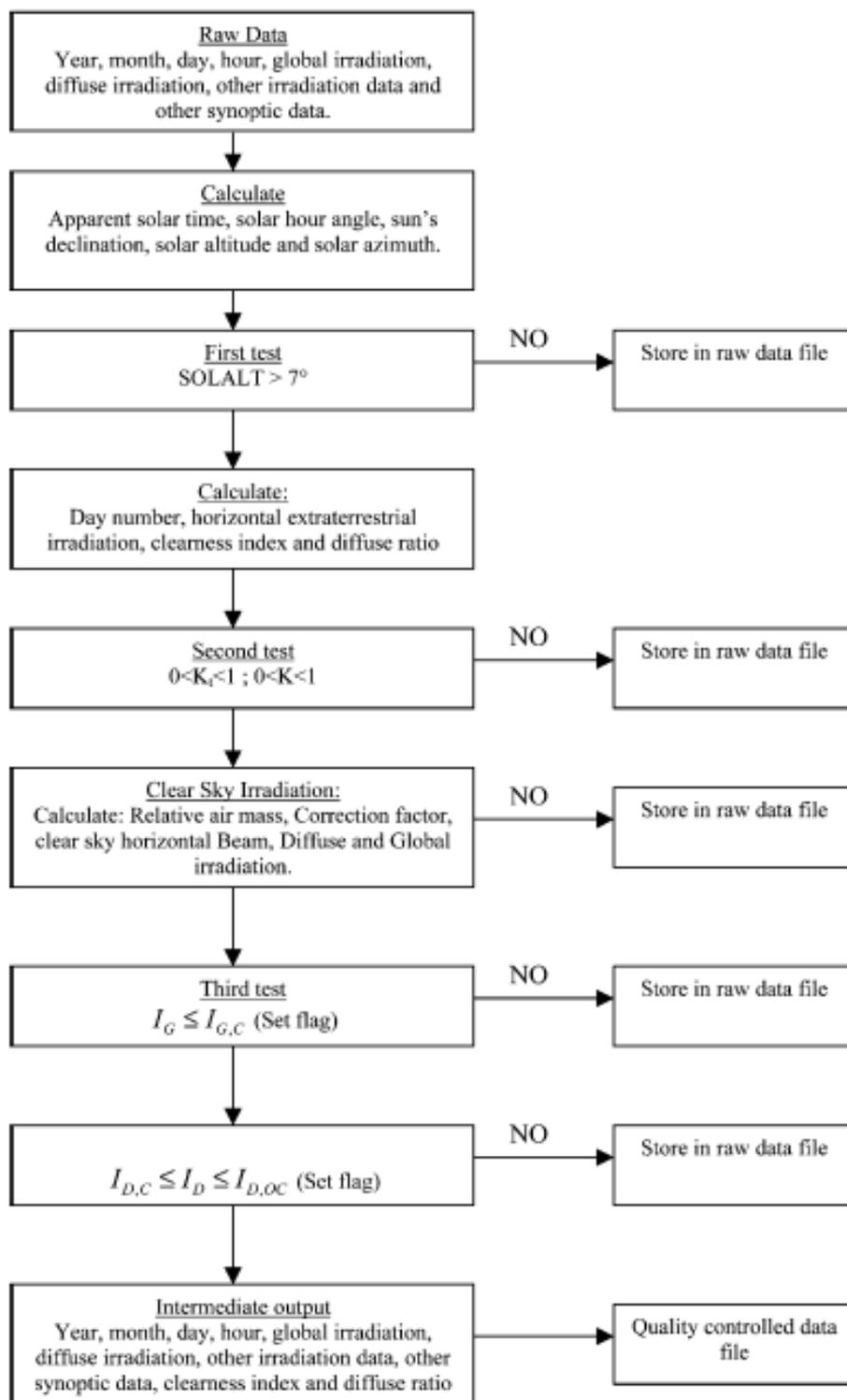


Figura 4.3.1. Diagrama de Flujo del proceso de validación de datos propuesto por S. Younes.

Capítulo V

Modelo de radiación ultravioleta para el DF.

5.1 Introducción

El incremento progresivo de la radiación ultravioleta (UV) que alcanza la superficie de la Tierra es consecuencia del decremento de ozono en la capa estratosférica. Por esto, es importante evitar una exposición prolongada a la radiación solar con el objetivo de prevenir un daño a la salud. Debido a los problemas biológicos, ecológicos y físicos producidos por este tipo de radiación solar, en los últimos años el estudio de la radiación ultravioleta ha tomado gran importancia en muchos países.

Para facilitar su estudio, la radiación UV se ha subdividido en tres bandas: UV-C (100- 280 nm) la cual es completamente absorbida por la capa de ozono estratosférica; UV-B (280- 315 nm) que es parcialmente absorbida y dispersada en la atmósfera; y UV-A (315-400 nm) la cual representa el mayor tipo de radiación UV recibida por la superficie de la Tierra. Considerando la irradiancia solar espectral en el espacio, las bandas de radiación UV-B y UV-A representan solo el 7.45% de la radiación total emitida por el Sol que incide en la Tierra fuera de la atmósfera de ésta. Después de pasar por la atmósfera, la radiación UV del tipo A y B representan el 5.90% y 1.33% respectivamente (Iqbal M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983.)

La irradiancia UV puede ser determinada de dos formas: directamente o por algún método de estimación. Los espectrorradiómetros son los aparatos que se utilizan para determinar la cantidad de energía que se está recibiendo y saber a qué longitud de onda pertenece dicha energía.

Desafortunadamente el costo de estos equipos aumenta drásticamente cuando están ajustados para la medición en estas longitudes de onda, es por esto que como alternativa se utilizan los piranómetros.

El ozono que contiene la estratosfera forma una capa alrededor de la tierra protegiendo a la biosfera de la mortal radiación UV proveniente del Sol. El desgaste de la capa estratosférica de ozono ha incrementado la radiación que pasa a la superficie terrestre.

Debido a esto, es importante cuantificar la radiación UV recibida, ya que ésta es capaz de romper algunos tipos de moléculas biológicas, como el DNA (Al-Aruri, 1990).

Las variaciones espaciales y temporales de la irradiancia de la radiación UV en la superficie de la tierra dependen de factores como: latitud, altitud y las condiciones atmosféricas locales.

La radiación UV ha sido utilizada en procesos de fotodescomposición de residuos orgánicos presentes en aguas contaminadas, la fotodegradación de plásticos y fibras naturales o sintéticas. La exposición a la radiación UV está asociada con enfermedades como el cáncer de piel y las cataratas. Los efectos resultantes de las condiciones del cielo, como vapor de agua, aerosoles y cantidad de ozono afectan la transmisión de la radiación ultravioleta sobre la superficie terrestre.

La composición y concentración del aire varían de acuerdo a la posición geográfica, elevación y la época del año.

La atmósfera terrestre está compuesta en alrededor del 99% por Nitrógeno molecular (N_2) y Oxígeno molecular (O_2). Ésta también contiene vapor de agua y aerosoles, así como polvo meteórico, arenas y partículas de polvo, cristales de hielo, cenizas volcánicas y contaminantes emitidos por algunas actividades humanas (metales pesados, partículas suspendidas, etc.).

El contenido de vapor de agua y los aerosoles en la atmósfera son altamente variables, sin embargo, para examinar la opacidad de la atmósfera a los rayos solares, se agrupan los componentes de la atmósfera en: moléculas de aire secas, vapor de agua y aerosoles, con el fin de saber en qué medida la radiación solar es atenuada (dispersada o absorbida) por cada una de estas variables de la atmósfera.

5.2 Nomenclatura.

| | | | |
|----------|--|------------|--|
| G | Radiación Solar Global. | H_{UV}^h | Valor promedio horario de la irradiancia Solar UV en la superficie (W/m ²) |
| UV | Radiación Solar Ultravioleta | | |
| I_G | Irradiancia Solar Global en la superficie de la tierra (W/m ²) | H_G^d | Valor promedio diario de la irradiancia solar en la superficie (W/m ²) |
| I_{UV} | Irradiancia Solar Ultravioleta en la superficie de la tierra (W/m ²) | H_{UV}^d | Valor promedio diario de la irradiancia Solar Ultravioleta (W/m ²) |
| K_T | Índice de claridad. | G_{top} | Radiación Solar extraterrestre. |
| K_T^h | Índice de claridad horario | | |
| K_T^d | Índice de claridad diario | I_o | Flujo Solar sobre la superficie de la atmósfera. |
| H_G^h | Valor promedio horario de la irradiancia Solar global en la superficie (W/m ²) | D | Distancia Sol-Tierra |
| | | \bar{D} | Distancia Sol-Tierra promedio |
| S_0 | Constante Solar Promedio | Z | Ángulo cenital |

5.3 Análisis de Datos.

La radiación Solar (0.3-3 μ m), global, difusa e irradiancia ultravioleta global y otras variables meteorológicas han sido continuamente monitoreadas, desde el año de 2010 en la Estación Radiométrica instalada en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería (19°19'N,99°11'O, 2324 m), localizada en el suroeste de Ciudad Universitaria. Las mediciones han sido adquiridas cada 5 segundos y registradas en una base de datos cada 5 minutos. La irradiancia Solar Global se ha medido utilizando un piranómetro de banda giratoria de la compañía LI-COR, modelo PY26523. La irradiancia ultravioleta global (290-385 nm) es medida utilizando un Radiómetro de la marca Eppley modelo TUVR.

La base de datos de valores horarios se ha generado de Enero del 2010 hasta diciembre del 2011, este periodo garantiza que se ha cubierto varias condiciones estacionales y diferentes ángulos de elevación solar.



Figura 5.3.1. Estación Radiométrica Planta Solar Instituto de Ingeniería UNAM (19°19'N,99°11'O, 2324 m) glooge earth .

Es importante señalar que existen diferencias significativas en la respuesta temporal y el coseno entre los radiómetros utilizados para la medición de la radiación solar UV y banda ancha. En consecuencia los valores de hora se han calculado, con el fin de reducir los efectos temporales que podrían introducirse en el estudio de la proporcionalidad de la radiación UV y la radiación de banda ancha.

Estos efectos adversos pueden llegar a un nivel bastante significativo, especialmente bajo condiciones muy cambiantes, que generalmente están asociados con los campos de nubes.

Por otro lado, debido a las diferencias que existen en la respuesta del coseno, se tiene que tomar en cuenta la elevación solar, Por lo tanto, los valores horarios correspondientes a los ángulos de elevación solar debajo de 10° fueron rechazados, como parte del filtrado de datos.

La calibración de los sensores se revisó cada año.

En la actualidad existen series experimentales de radiación solar global, sin embargo, no se dispone de una amplia base de datos sobre radiación ultravioleta. Ante estas circunstancias, resulta interesante establecer relaciones sencillas entre ambas variables que permitan determinar los niveles de radiación ultravioleta a partir de los de radiación global.

En este capítulo, en primer lugar, se analizarán la radiación solar global y ultravioleta diarias, tratando de establecer dichas correlaciones, así como el porcentaje de radiación ultravioleta respecto a la total.

5.4 Fracción de radiación Ultravioleta en relación a la Radiación Global.

Como ya se ha dicho, los estudios sobre la radiación ultravioleta han experimentado un considerable ímpetu en los últimos años (Ogunjobi and Kim, 2004). Sin embargo, frente a la abundancia de largas series de radiación global sobre superficie horizontal, H_G , en muchas estaciones, nos encontramos con una importante escasez de resultados que cubran periodos de tiempo relativamente largos de radiación ultravioleta, H_{UV} , y, en especial, de sus componentes espectrales UV-A y UV-B (Martínez-Lozano et al., 1996).

Ante estas circunstancias se plantean dos posibles soluciones alternativas. Por una parte, es posible recurrir al uso de los modelos de transferencia radiativa que permiten calcular la radiación ultravioleta a partir de los procesos de absorción y dispersión que tienen lugar en la atmósfera. En este sentido, Frederick and Lubin (1988), desarrollaron un modelo de transferencia radiativa para calcular la irradiancia espectral asociada a cada longitud de onda del intervalo 290-400 nm. Los parámetros de entrada de dicho modelo son el ozono, el espesor óptico atmosférico, el albedo superficial para la banda ultravioleta y la localización, hora y día para los que se calcula la irradiancia. De manera análoga, Kylling et al. (1995), proponen otro modelo de transferencia radiativa para el cálculo de la irradiancia espectral ultravioleta a partir de la cantidad de ozono atmosférico, el albedo ultravioleta, la visibilidad, el día del año y el ángulo cenital solar.

No obstante, estos modelos matemáticamente son bastante complejos y, frecuentemente, exceden las necesidades de las aplicaciones de esta línea de investigación a la industria y la agricultura (Cañada et al., 2003). Como solución alternativa, se recurre a los modelos empíricos o semiempíricos que permiten determinar la radiación ultravioleta a partir de parámetros comúnmente registrados en la mayor parte de las estaciones radiométricas.

En esta línea de trabajo, Green et al. (1974) formularon un modelo analítico semiempírico para calcular la componente global de la radiación ultravioleta en el intervalo espectral 280-340 nm, utilizando como parámetros la longitud de onda, la altura solar, el espesor del ozono atmosférico y de los aerosoles, el albedo superficial y la nubosidad.

Asimismo, resultan interesantes los diversos estudios empíricos en los que se expresa la radiación ultravioleta como una fracción de la radiación total cuando se dispone de ambas medidas simultáneamente. Algunos de estos trabajos se basan en datos registrados en

intervalos de tiempo diarios (Yamasaki, 1983; Baker-Blocker et al., 1984; Nagaraja Rao et al., 1984; Zavodska and Reichrt, 1985; Blumthaler et al., 1992; Feister and Gransnick, 1992), de una hora (Zavodska and Reichrt, 1985; Khogali and Al-Bar, 1992) e, incluso, inferiores a una hora (Stewart, 1980; Khun and Rau, 1990; Riordan et al., 1990; Mehos et al., 1991).

| Parámetro | Anual | Otoño | Invierno | Primavera | Verano |
|-----------|-------|-------|----------|-----------|--------|
| (Huv/HG) | 0.054 | 0.056 | 0.057 | 0.053 | 0.050 |
| σ | 0.008 | 0.009 | 0.008 | 0.005 | 0.005 |
| n | 1002 | 259 | 245 | 255 | 243 |

Tabla 5.4.1. Razón entre la radiación diaria ultravioleta y total (Huv/HG), desviación estándar, σ , y número de medidas, n, para el agrupamiento estacional en Corvalis, Óregon, USA (Naranja Rao et al. 1984)

De esta forma, se ha comprobado que el porcentaje de radiación ultravioleta respecto a la total presenta, en términos generales, pequeñas variaciones a lo largo del año, si bien experimenta ligeros aumentos durante las estaciones más lluviosas.

Concretamente, Nagaraja Rao et al. (1984), buscando una cierta uniformidad, agrupan las medidas de radiación solar diaria de acuerdo a la estación del año (otoño: octubre, noviembre y diciembre; invierno: enero, febrero y marzo; primavera: abril, mayo y junio; verano: julio, agosto y septiembre), observando oscilaciones entre el 5.0 y 5.7% en Corvalis, Oregón (26°32'N, 50°13' W) con un mínimo en verano (tabla 5.4.1).

Sin embargo, Al-Aruri et al. (1988) encuentran un comportamiento diferente para Kuwait (29°20'N, 47°57'E) al determinar porcentajes de $\frac{H_{UV}}{H_G}$ diarios que oscilan desde el 4.2% de diciembre hasta un valor máximo de 5.2% correspondiente a verano, concretamente, al mes de agosto. Diversos estudios han encontrado, para distintos puntos del mundo, valores del cociente similares (Yamasaki, 1983; Zavodska and Reichrt, 1985; Blumthaler et al., 1992; Al-Aruri and Amer, 1993). Sin embargo, los porcentajes de radiación ultravioleta respecto a la total registrados en Dhahran (26°32'N, 50°13'E) son inferiores, alcanzando un valor medio de 3.44% a lo largo del año (Elhadidy et al., 1990) mientras que los de Kwangju (35°10'N, 126°53'E), estos últimos, a diferencia de los anteriores, basados en datos experimentales horarios, son superiores, variando entre 7.0 y 9.4% (Ogunjobi et al., 2004).

Por lo que respecta a España, Cañada et al. (2003) calculan y comparan los porcentajes de radiación horaria ultravioleta respecto a la total para Córdoba (37°51'N, 4°48'W) y Valencia (39°29'N, 0°23'W). En el primero de los casos, a partir de las medidas horarias experimentales registradas desde enero de 1996 a diciembre de 1998, el cociente oscila entre el 3.9 y 4.5%. Por otra parte, en Valencia, mientras que este estudio (Cañada et al., 2003), utilizando datos horarios registrados desde enero de 1996 a diciembre de 1998, obtiene valores que varían entre 4.4 y 5.6%, el porcentaje medio anual calculado por Martínez Lozano et al. (1999) a partir de medidas experimentales registradas cada diez minutos desde abril de 1991 hasta diciembre de 1996, es del 3.2%.

Diversos autores (Ogunjobi et al., 2004; Cañada et al., 2003) afirman que las discrepancias encontradas entre los distintos emplazamientos, se justifica en base a las diferentes condiciones atmosféricas y climatológicas de los emplazamientos escogidos en cada estudio, así como a los periodos de medidas y los instrumentos utilizados en cada caso.

Por otra parte, diversos autores han estudiado la dependencia de este cociente respecto a los diferentes parámetros que afectan a la radiación ultravioleta a su paso por la atmósfera. Así, por ejemplo, se ha verificado que la influencia del ozono estratosférico en el cociente $\frac{H_{UV}}{H_G}$ es mínima, ya que este gas atmosférico afecta principalmente a la componente UV-B, mientras que el 95% de la radiación ultravioleta medida con los radiómetros utilizados comúnmente es UV-A (Martínez-Lozano et al., 1996).

Por lo que respecta a la variabilidad diurna del cociente $\frac{H_{UV}}{H_G}$, Foyo-Moreno et al. (1998) observan, a partir de datos de radiación horarios registrados durante dos años en Granada (37.18°N, 3.58°W) para días sin nubosidad, que ésta presenta el mismo patrón de oscilación que la radiación está íntimamente relacionada con la variación del ángulo cenital solar a lo largo del día. De esta forma, a medida que va avanzando el día, mientras que el ángulo cenital solar disminuye, el cociente $\frac{H_{UV}}{H_G}$ aumenta, alcanzado su valor máximo al mediodía, coincidiendo con el mínimo del ángulo cenital solar. Por el contrario, a lo largo de la tarde, mientras que el ángulo cenital solar aumenta, el cociente disminuye, pudiendo llegar a alcanzar valores más bajos que los registrados durante la mañana, como consecuencia del aumento de los niveles de turbiedad (Zavodska and Reichrt, 1985). De acuerdo con estos resultados, podemos afirmar que, los procesos de absorción y

dispersión debido a la presencia de partículas en la atmósfera, cuya probabilidad crece con el ángulo cenital solar, al aumentar el camino que los fotones recorren a través de la atmósfera, afectan en mayor medida a las radiaciones de longitud de onda menor, contribuyendo a un menor porcentaje de radiación ultravioleta respecto a la total.

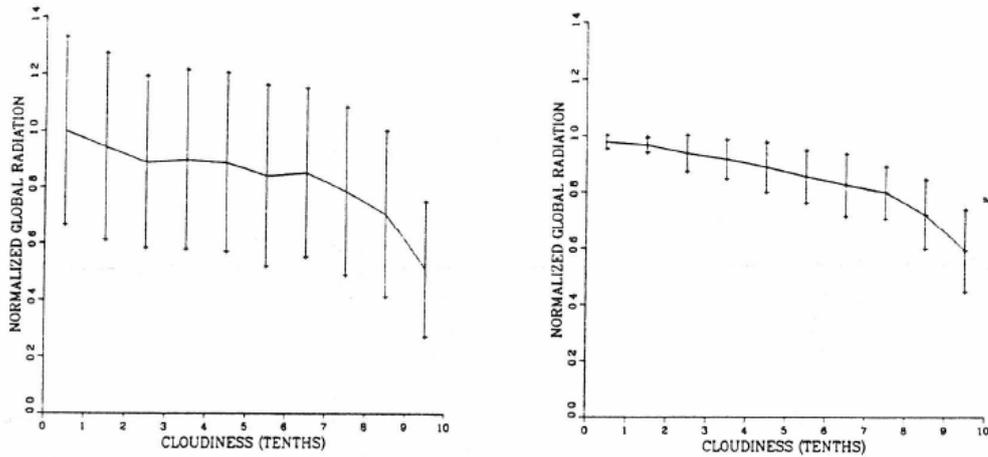


Figura 5.4.1. Dependencia de la radiación solar total respecto a las nubes (Ambach et al., 1991)

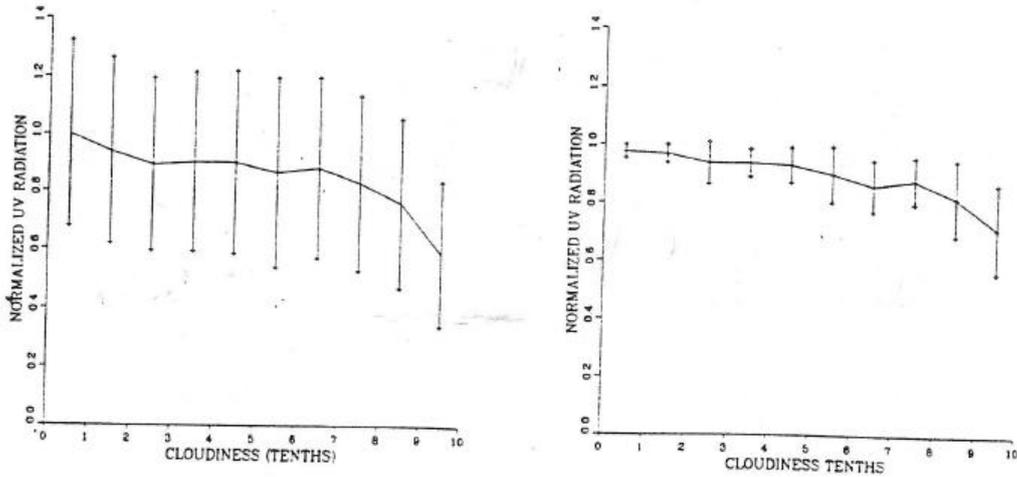


Figura 5.4.2.: Dependencia de la radiación solar ultravioleta respecto a las nubes (Ambach et al., 1991)

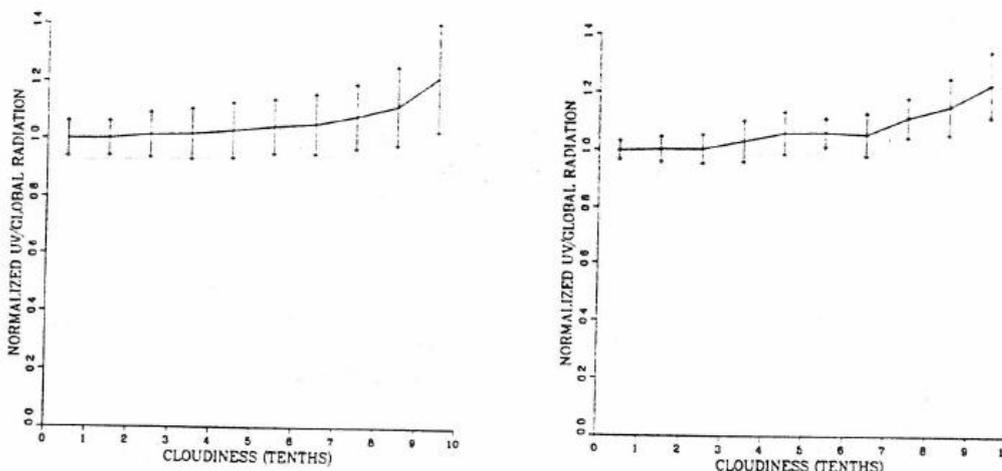


Figura 5.4.3. Dependencia del cociente entre la radiación solar ultravioleta y total respecto a las nubes (Ambach et al., 1991)

No obstante, en presencia de nubes, la situación anteriormente descrita varía significativamente (Elhadidy et al., 1990; Ambach et al., 1991; Feister and Grasnick, 1992; Sadler, 1992). Medidas experimentales recogidas en Fairbanks (Alaska) y Jungfrauoch (Suiza), demuestran que, aunque tanto la radiación ultravioleta como la total disminuyen a medida que aumenta el espesor de las nubes (figuras 5.4.1 y 5.4.2), el cociente entre ambas aumenta (figura 5.4.3).

Igualmente, para días con distintas condiciones de nubosidad en Estambul, Dilmac et al. (1996) presentan la radiación ultravioleta y total, así como el cociente entre ambas, observando que el cociente alcanza valores superiores en los días con nubosidad que en los claros (23 de enero).

Por otra parte, Nagaraja Rao et al. (1984) encontró una ligera dependencia entre la fracción solar, FS (cociente entre horas de sol medidas y número máximo de horas de sol diarias) y la razón $\frac{H_{UV}}{H_G}$ (tabla 5.4.2), de tal manera que los días con $FS < 0.15$ presentan mayor valor medio diario de $\frac{H_{UV}}{H_G}$ (0.063) que los días con $FS > 0.85$ ($\frac{H_{UV}}{H_G} = 0.046$).

| Parámetro | FS<0.15 | 0.15<FS<0.85 | FS>0.85 |
|--------------------------|---------|--------------|---------|
| $(\frac{H_{UV}}{H_G})_m$ | 0.063 | 0.051 | 0.046 |
| σ | 0.006 | 0.004 | 0.002 |
| n | 289 | 544 | 169 |

Tabla 5.4.2.: Razón entre la radiación diaria ultravioleta y total para el agrupamiento basado en las condiciones de cielo en Corvalis, USA, siendo $(H_{UV} / H_G)_m$ la razón promedio, σ la desviación estándar de la razón H_{UV} / H_G y n el número de medidas (Nagaraja Rao et al., 1984)

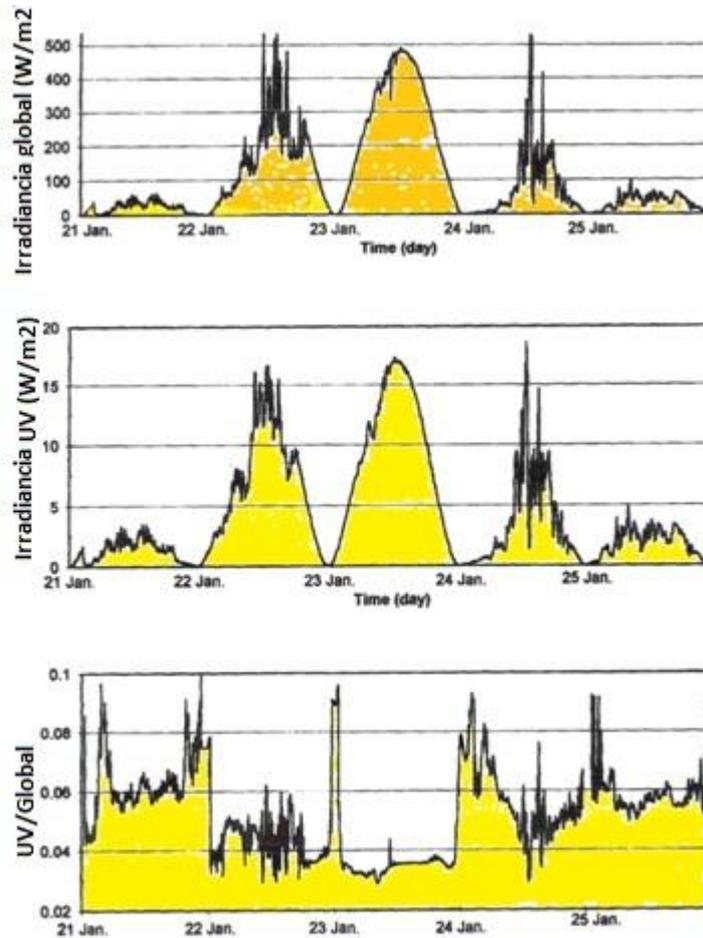


Figura 5.4.4. : Irradiancia solar ultravioleta y total y cociente entre ambas para días con distintas condiciones de nubosidad en Estambul (Dilmac et al., 1996)

Asimismo, Feister and Grasnack (1992) encontraron que, mientras para días claros en Postdam, el porcentaje de radiación solar diaria ultravioleta frente a la total, varía entre el 3 y el 4%, para días con nubes puede llegar a alcanzar valores del 5-6%. Análogamente, Foyo-Moreno et al. (1998) observaron como para un mismo mes, el cociente porcentual de $\frac{H_{UV}}{H_G}$ puede llegar a variar de un 3% a un 5% al cambiar de condiciones de cielos claros a cielos cubiertos, mientras que variaciones del ángulo cenital solar, en similares condiciones de nubosidad, representan incrementos de un 3.5% a un 4.2%.

Estos resultados se deben a que las nubes presentan una mayor transmitancia al intervalo ultravioleta y a que la absorción por parte del vapor de agua es mucho mayor en la región del infrarrojo que en los intervalos con longitud de onda menor (Zavodska and Reichrt, 1985; Ambach et al., 1991; Feister and Grasnack, 1992; Lenoble, 1993; Justus and Murphy, 1994; Cañada et al., 2003; Ogunjobi et al., 2004).

Por lo tanto, podemos concluir, que en general, el factor más influyente en el cociente $\frac{H_{UV}}{H_G}$ es la nubosidad, si bien, particularizando a situaciones ideales de cielos despejados, la altura solar ejerce una influencia máxima en el cociente entre la radiación solar ultravioleta y total $\frac{H_{UV}}{H_G}$.

5.5 Modelos para la Radiación Ultravioleta en función de la Radiación Solar Global.

Como una de las hipótesis de este estudio es comprobar el compartamiento de da la radiación ultravioleta en función de la radiación global se obtuvo la gráfica correspondiente para cada periodo estacional, y se observa en cada una de estas gráficas que existe una dependencia en el comportamiento entre ambas variables.

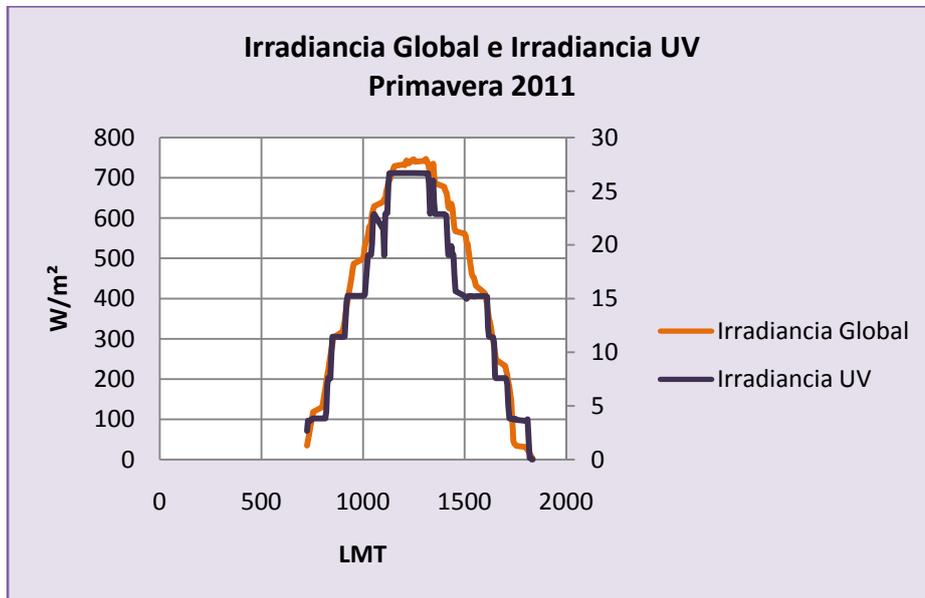


Figura 5.5.1. Irradiancia Global e Irradiancia UV, primavera

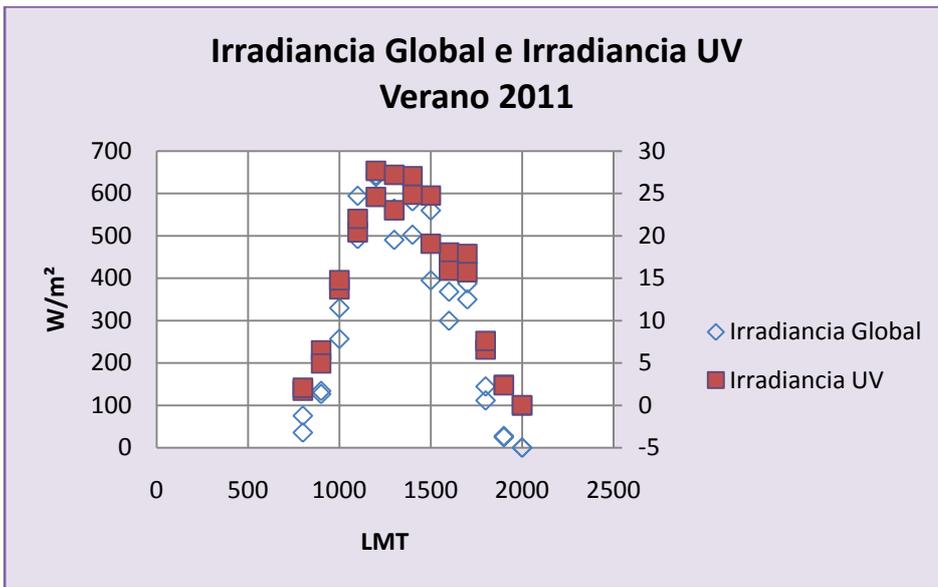


Figura 5.5.2. Irradiancia Global e Irradiancia UV, verano

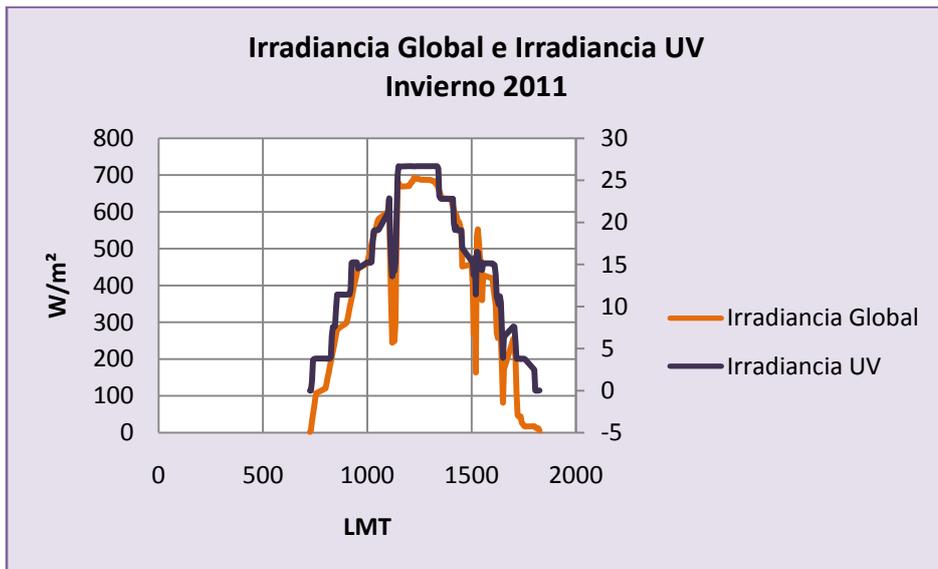


Figura 5.5.3. Irradiancia Global e Irradiancia UV, invierno

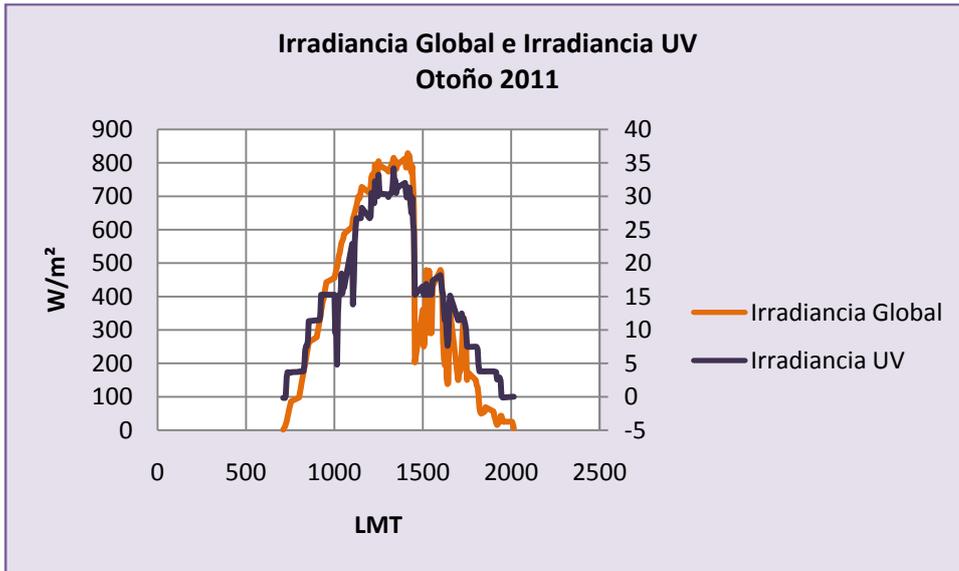


Figura 5.5.4. Irradiancia Global e Irradiancia UV, otoño

Como se observa en las figuras 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3, 5.5.4 el comportamiento de la radiación global y ultravioleta siguen las mismas secuencias de oscilación; lo que comprueba la hipótesis de que se pueden establecer relaciones empíricas entre ambas variables. Diversos estudios han comprobado que la radiación solar global así como la radiación solar ultravioleta tiene una relación de tipo lineal representada por la ecuación 5.5.1.

$$H_{UV} = m \cdot H_G \dots\dots\dots(5.5.1)$$

Para el caso del Distrito Federal se busco la correlación de linealidad estacional para los años 2010 y 2011; y se encontraron los siguientes resultados:

| Estación del Año | m | r | R ² | Error típico | Ajuste |
|------------------|---------|----------|----------------|--------------|--|
| Primavera | 0.03628 | 0.993160 | 0.986368 | 2.109 | $H_{UV} = 0.03628 \cdot H_G \pm 2.109$ |
| Verano | 0.03898 | 0.984252 | 0.964768 | 2.900 | $H_{UV} = 0.03898 \cdot H_G \pm 2.9$ |
| Otoño | 0.03468 | 0.94045 | 0.8843 | 6.33 | $H_{UV} = 0.03468 \cdot H_G \pm 6.33$ |
| Invierno | 0.0329 | 0.99995 | 0.9989 | 0.4625 | $H_{UV} = 0.0329 \cdot H_G \pm 0.4625$ |

Tabla 5.5.1. Modelos lineales entre radiación Global y la radiación Ultravioleta en el Distrito Federal.

Se obtuvieron pendientes de 0.0329 a 0.03628 y los coeficientes de correlación (r) indican que para el caso de la primavera existe una dependencia entre la radiación ultravioleta con la radiación global de un 98.6%, y un 1.4 % depende de otros agentes como pueden ser la nubosidad, los aerosoles u otros factores que contribuyen a la atenuación de la radiación ultravioleta ver figura 5.5.5.

En el caso del Verano la dependencia entre la radiación ultravioleta con respecto a la radiación global resulta de un 96.47% por lo tanto un 3.53% dependerá de otros factores, ver figura 5.5.6.

En el Otoño se registro un coeficiente de determinación (R²) de un 88.43% por lo que un 11.57% será debido a los demás factores que influyen en la atenuación o incremento de la radiación ultravioleta, ver figura 5.5.7.

En el invierno como se muestra en la tabla 5.5.1 se observa que el coeficiente de determinación es alto ya que la relación entre radiación ultravioleta y global es de un 99.89% y sólo un 0.11% dependerá de otros factores, ver figura 5.5.8.

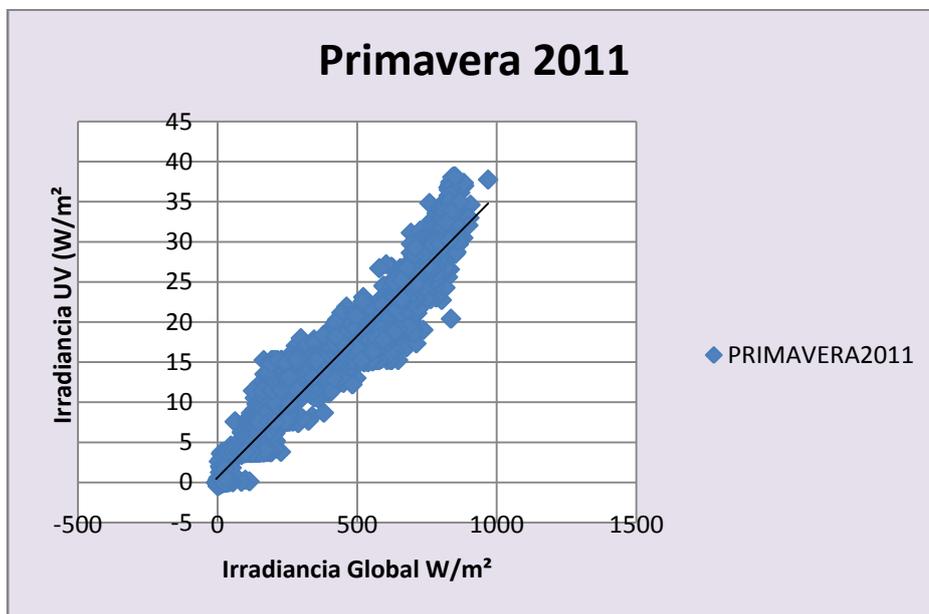


Figura 5.5.5. Modelo lineal de la Radiación Ultravioleta como función de la Radiación Global, primavera.

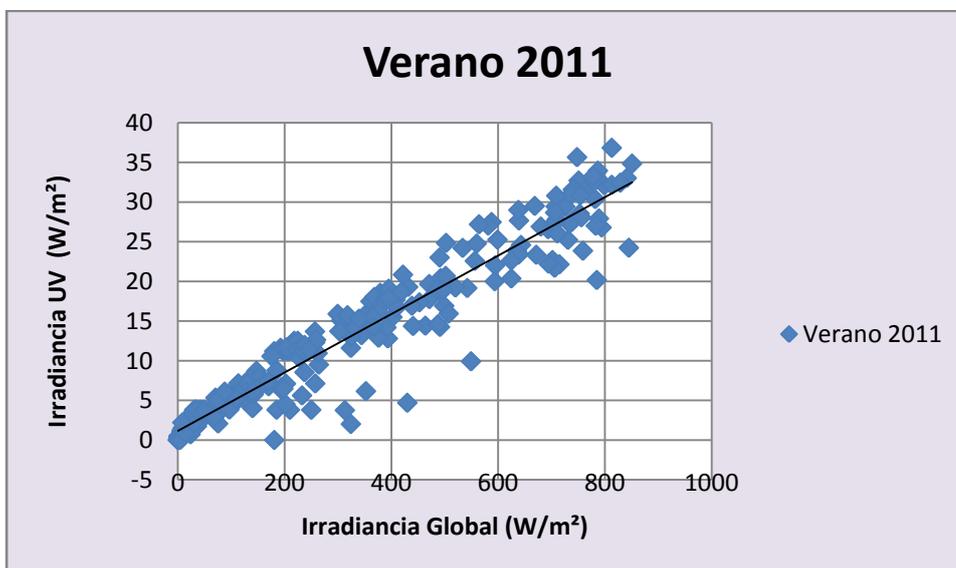


Figura 5.5.6. Modelo lineal de la Radiación Ultravioleta como función de la Radiación Global, verano

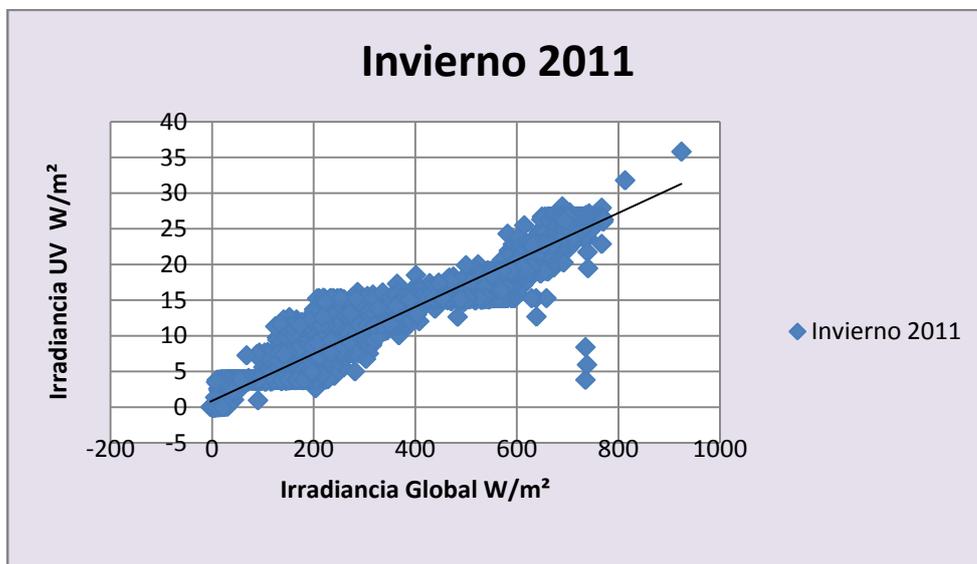


Figura 5.5.7. Modelo lineal de la Radiación Ultravioleta como función de la Radiación Global, invierno.

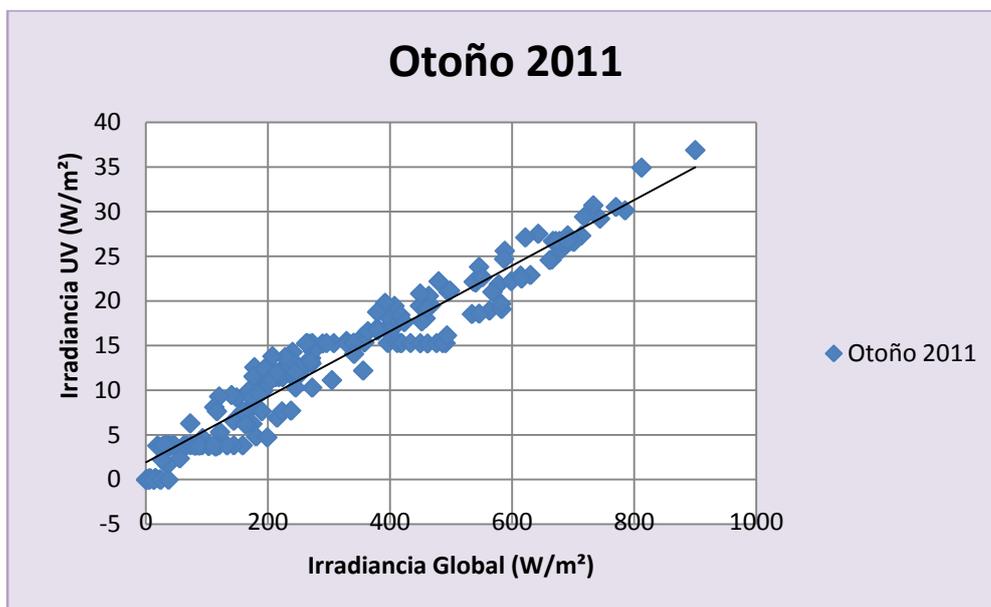


Figura 56.5.8. Modelo lineal de la Radiación Ultravioleta como función de la Radiación Global, otoño.

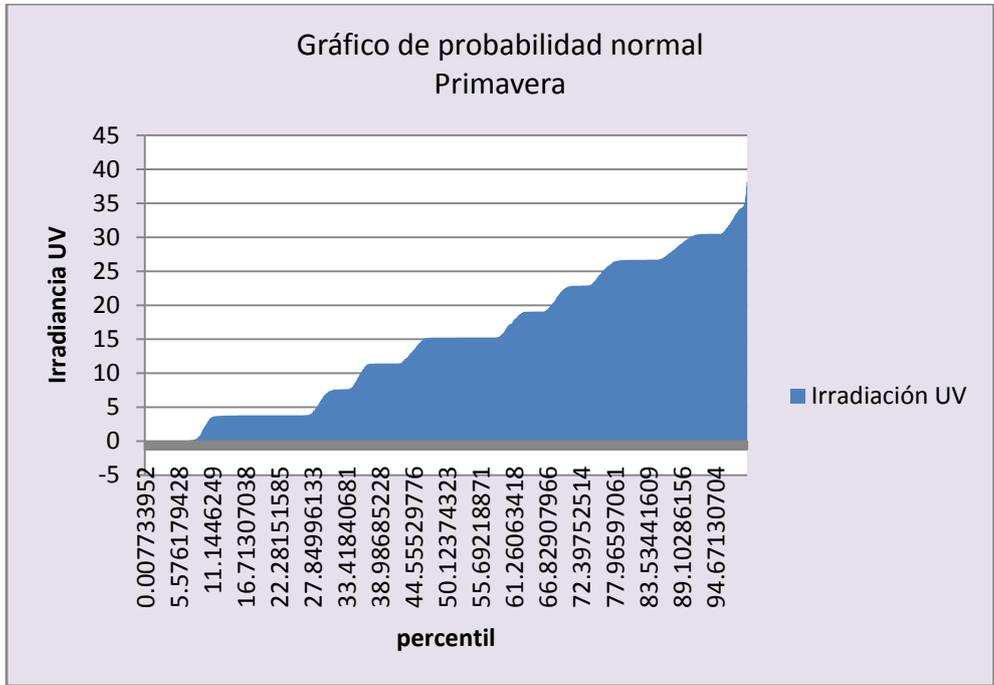


Figura 5.5.9. Gráfico de probabilidad normal, primavera

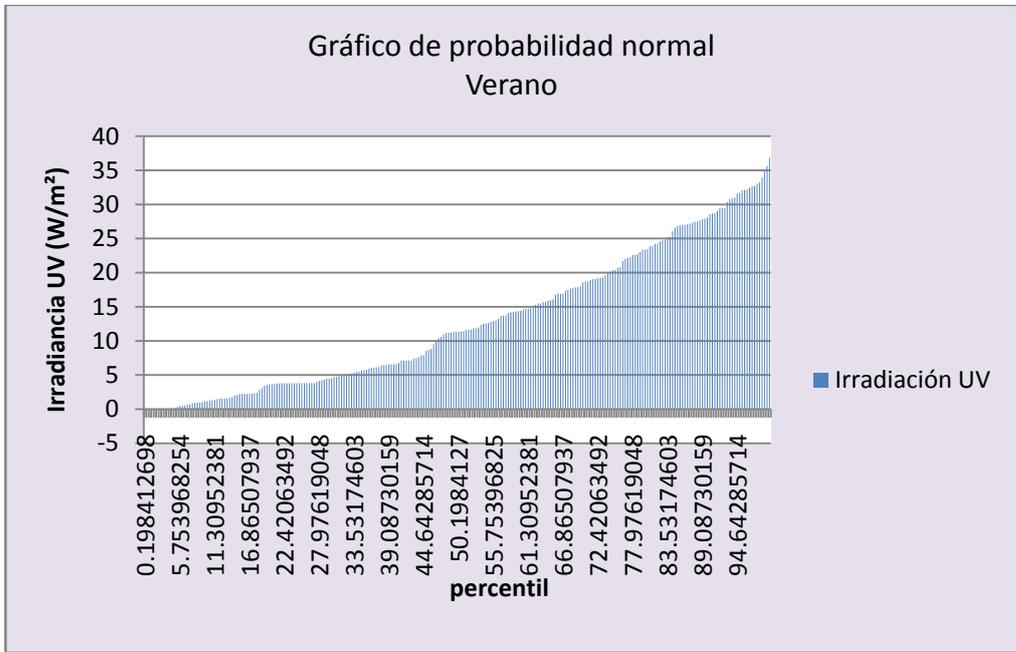


Figura 5.5.10. Gráfico de probabilidad normal, verano

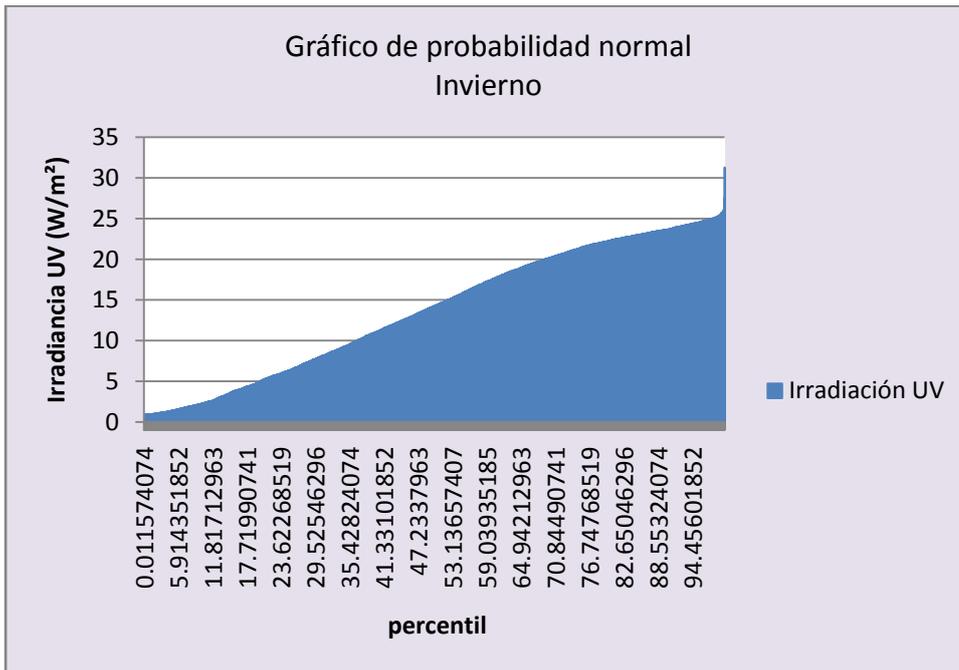


Figura 5.5.11. Gráfico de probabilidad normal, invierno

Como conclusión de este estudio se tiene que en la ciudad de México, la radiación Ultravioleta corresponde a un 3.57% de la irradiancia global horizontal; por lo tanto se deduce la siguiente ecuación (ecuación 5.5.2) que para calcular la radiación ultravioleta horaria.

$$H_{UV}^h = 0.0357 \cdot H_G^h \dots\dots\dots(5.5.2)$$

Otros autores han obtenido relaciones similares; por ejemplo para el caso de España se obtuvo que en Granada la Irradiancia UV representa un 4% de la Irradiancia global y en Almería este valor es de un 3.7% (Foyo-Moreno et al., 1999).

5.6 Estudio Estadístico de los valores de Irradiancia Ultravioleta de los datos obtenidos con la estación Radiométrica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería.

Este estudio se realizó con los datos obtenidos de la estación radiométrica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, y se obtuvo la siguiente información:

El valor máximo se registro en el mes de agosto con un valor de 41.94 W/m^2 y un mínimo en el mes de diciembre con un valor de 26.68 W/m^2 . Los valores máximos ocurrieron en el verano mientras que los valores mínimos en los meses de invierno. La variación estacional es resultado de factores como la masa óptica de aire debido al ángulo cenital y otros factores atmosféricos como la nubosidad y los aerosoles.

Para determinar el valor máximo, mínimo y los cuartiles se graficaron las respectivas cajas de bigotes para cada mes del año 2011. Ver figuras

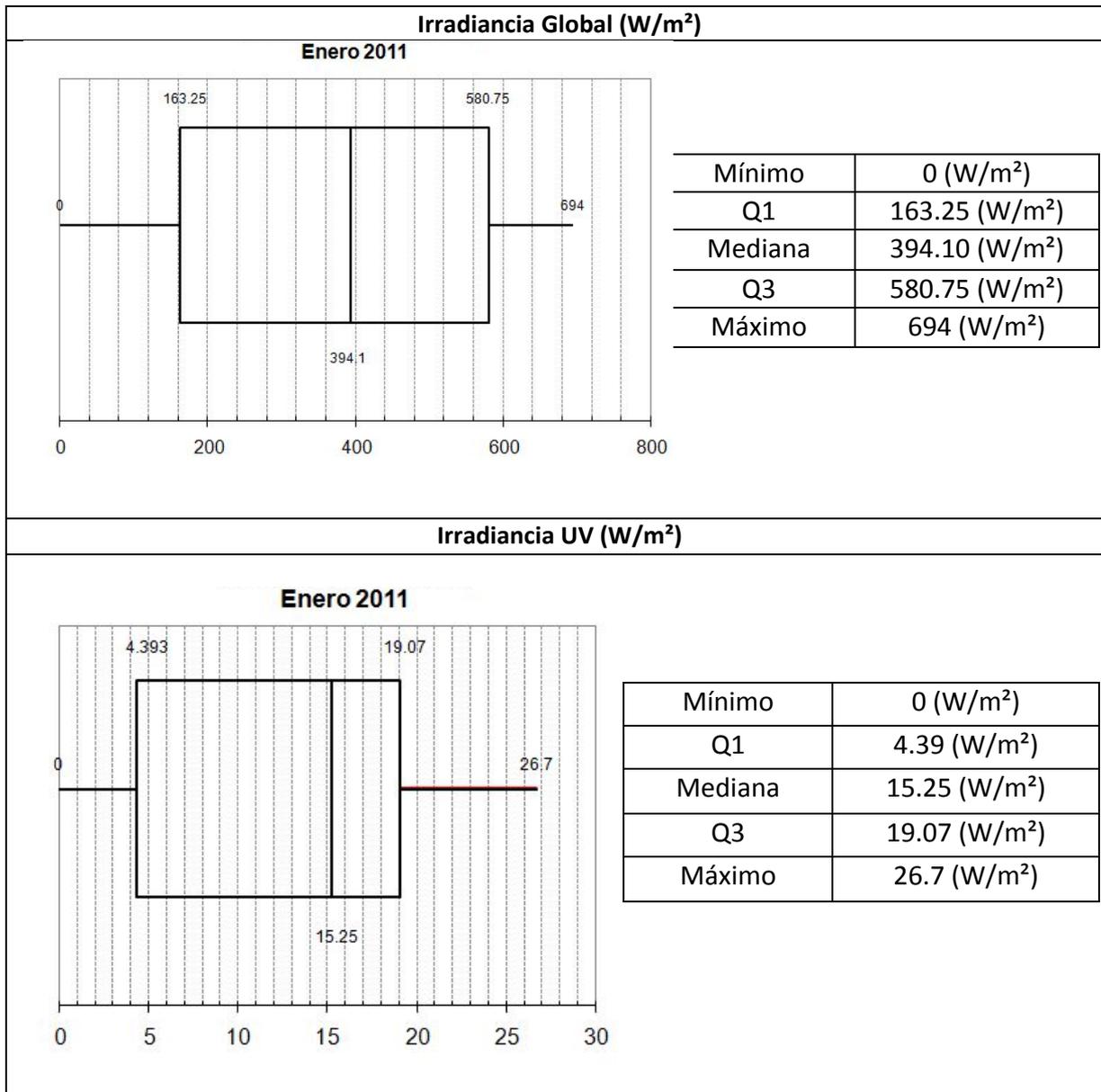


Figura 5.6.1 Cajas de Bigotes mes de Enero.

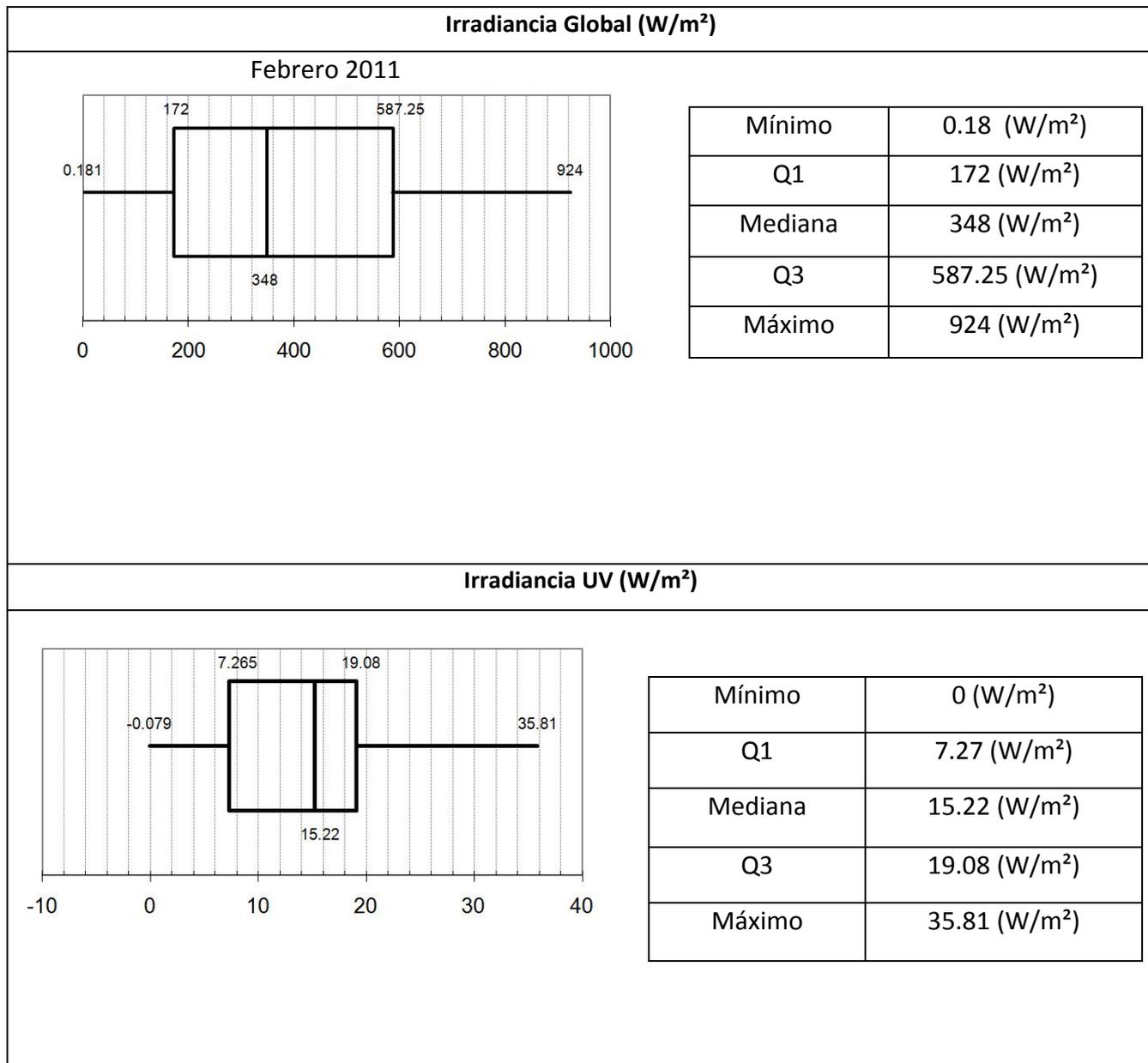


Figura 5.6.2. Caja de Bigotes Mes de Febrero.

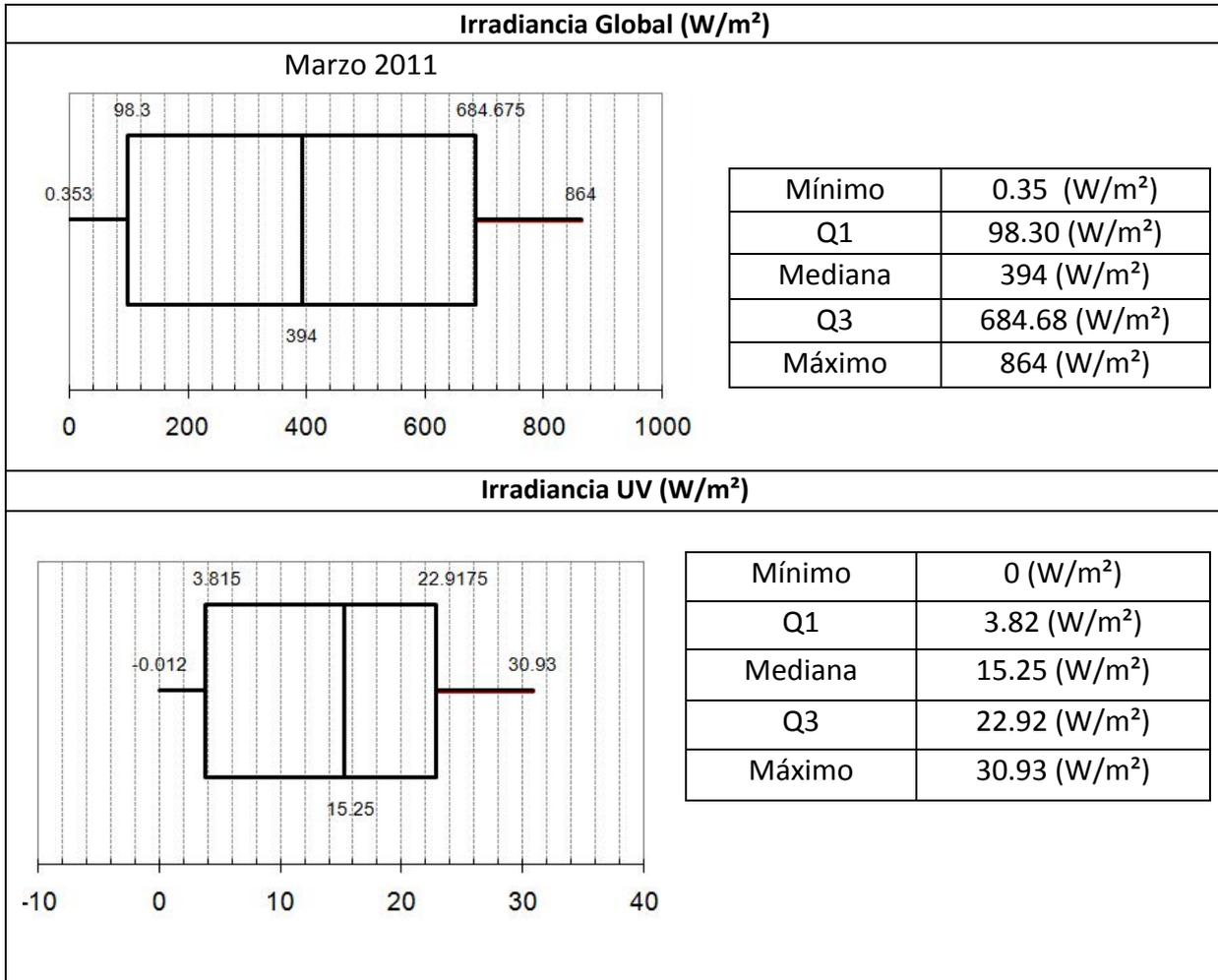


Figura 5.6.3. Diagrama de Caja de Bigotes mes de Marzo.

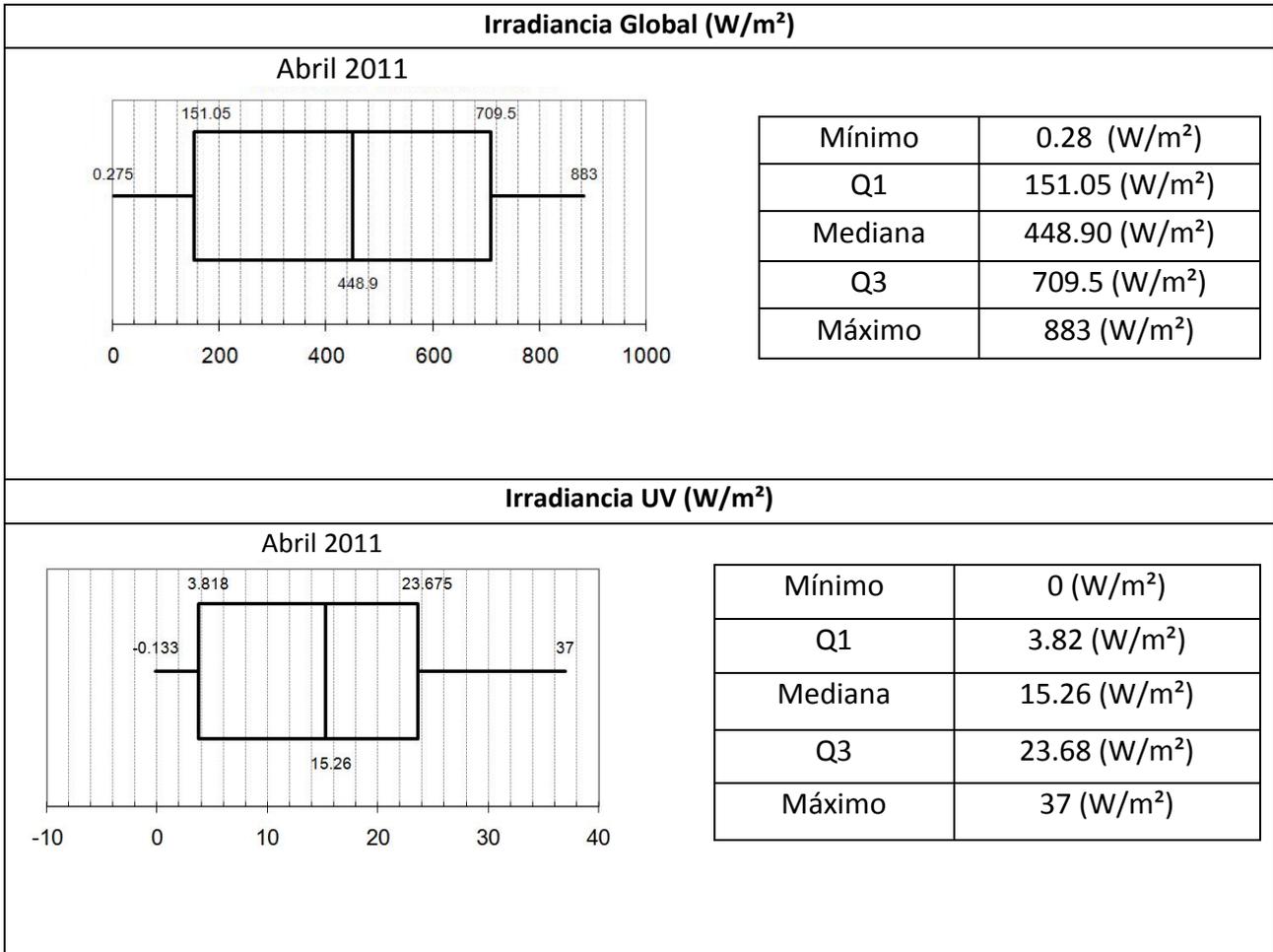


Figura 5.6.4. Caja de Bigotes Mes de Abril.

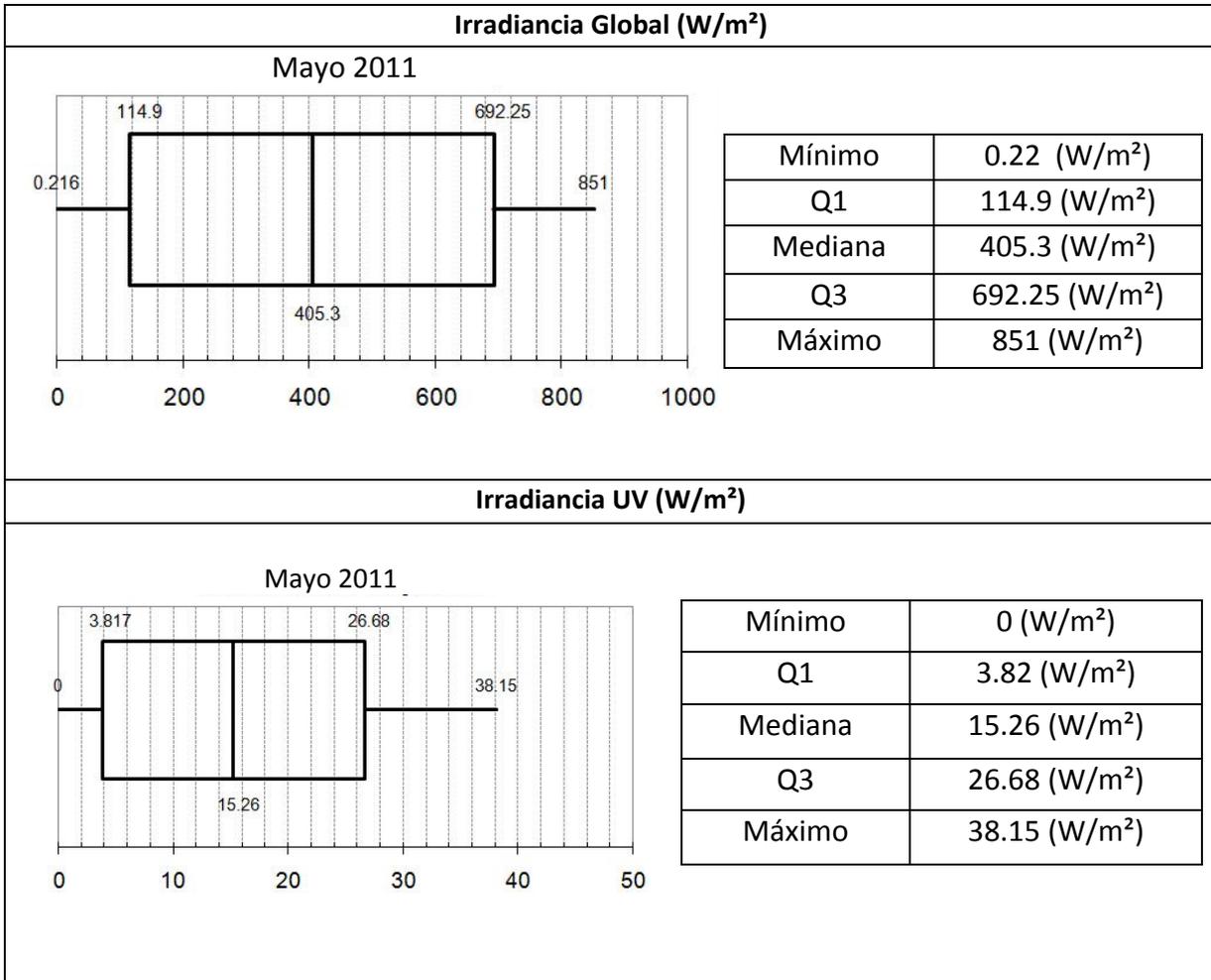


Figura 5.6.5. Caja de Bigotes Mes de Mayo.

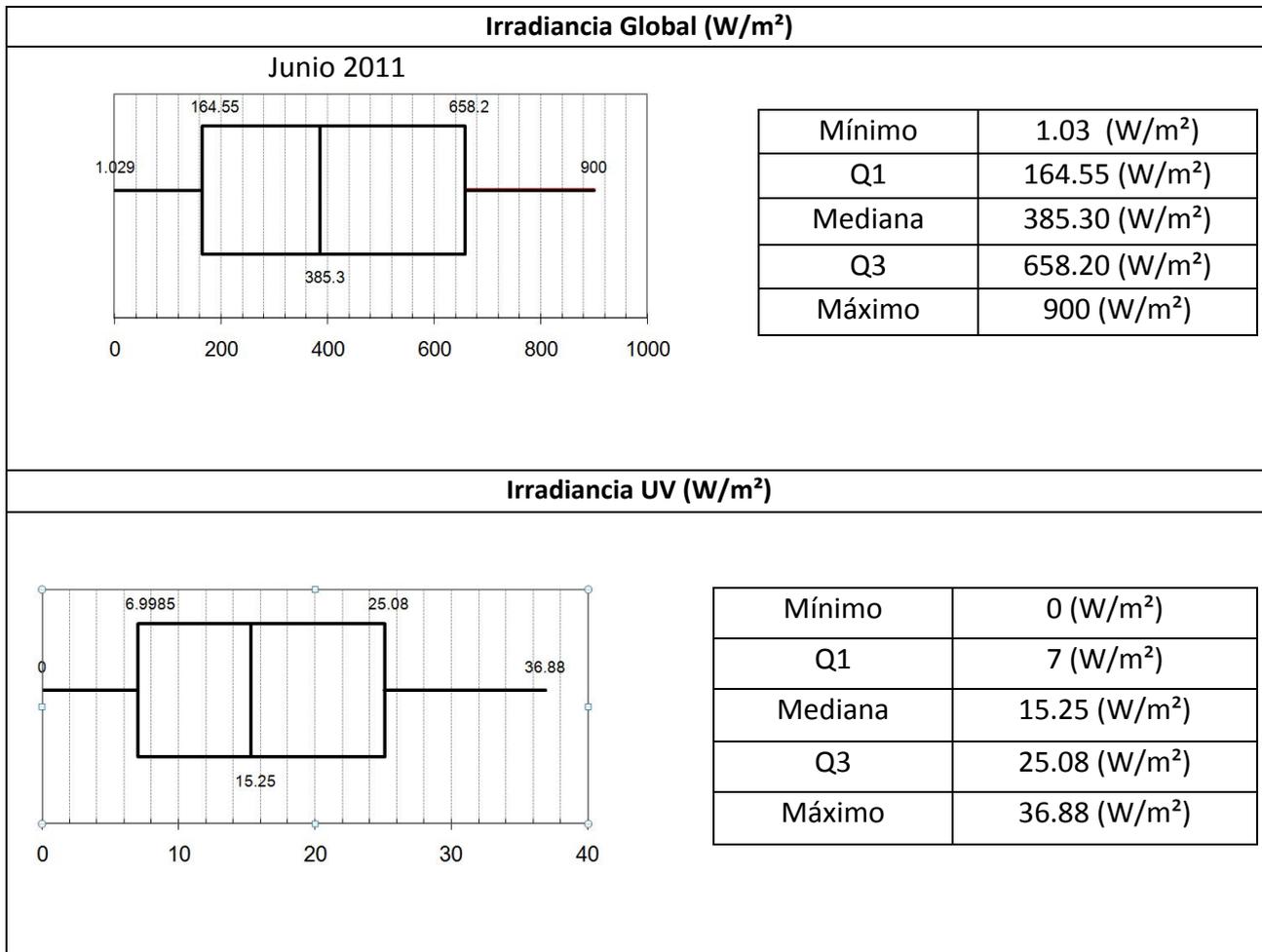


Figura 5.6.6. Caja de Bigotes Mes de Junio.

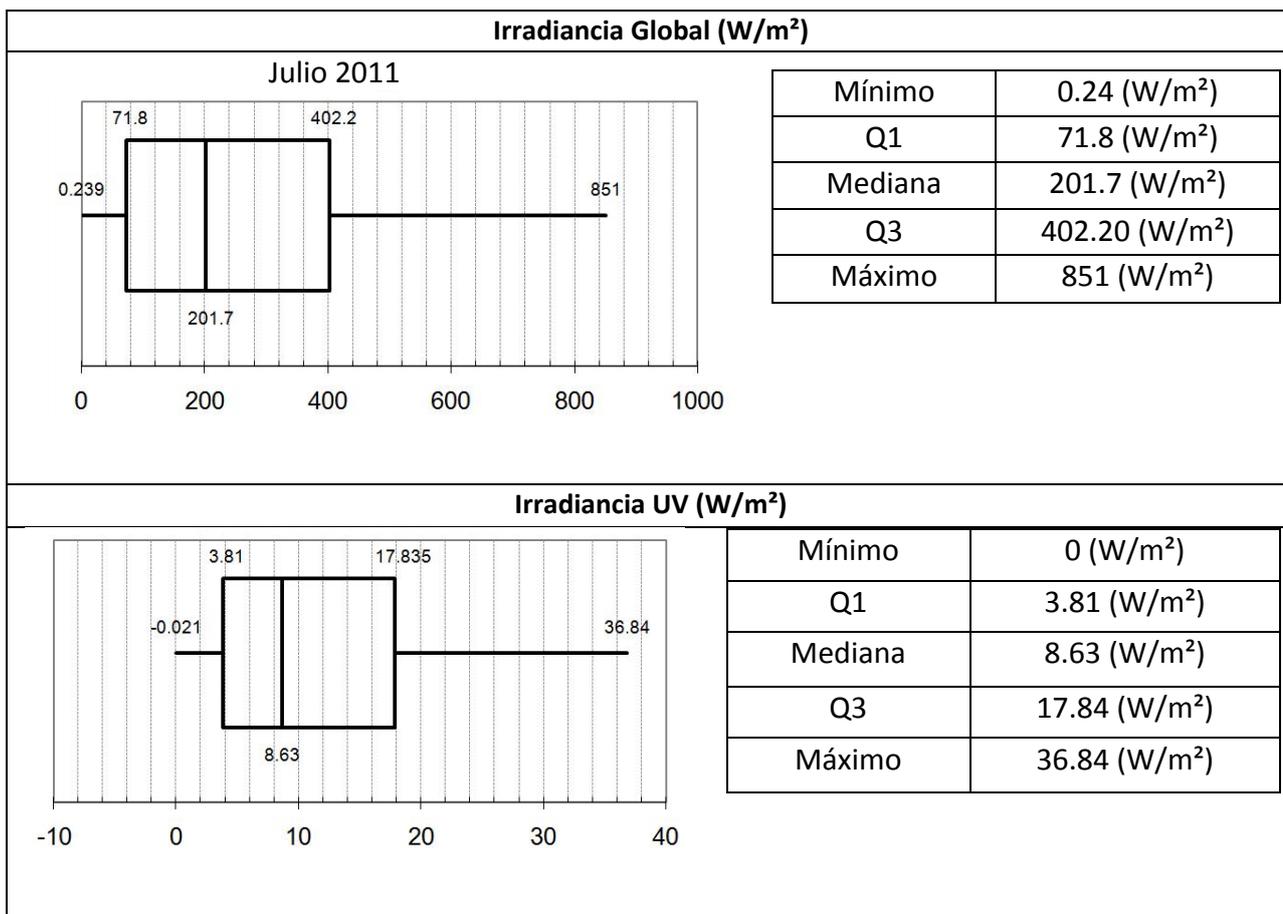


Figura 5.6.7. Caja de Bigotes Mes de Julio.

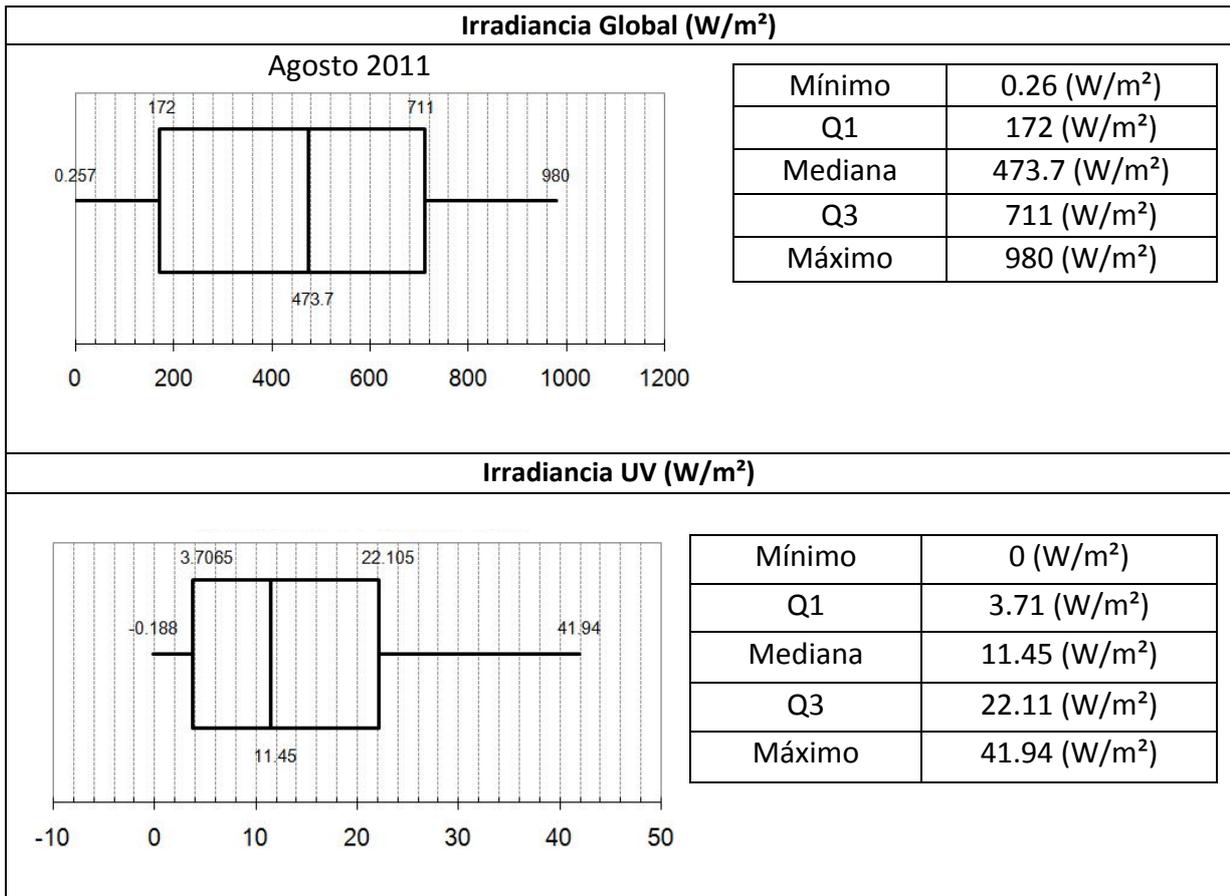


Figura 5.6.8. Caja de Bigotes Mes de Agosto.

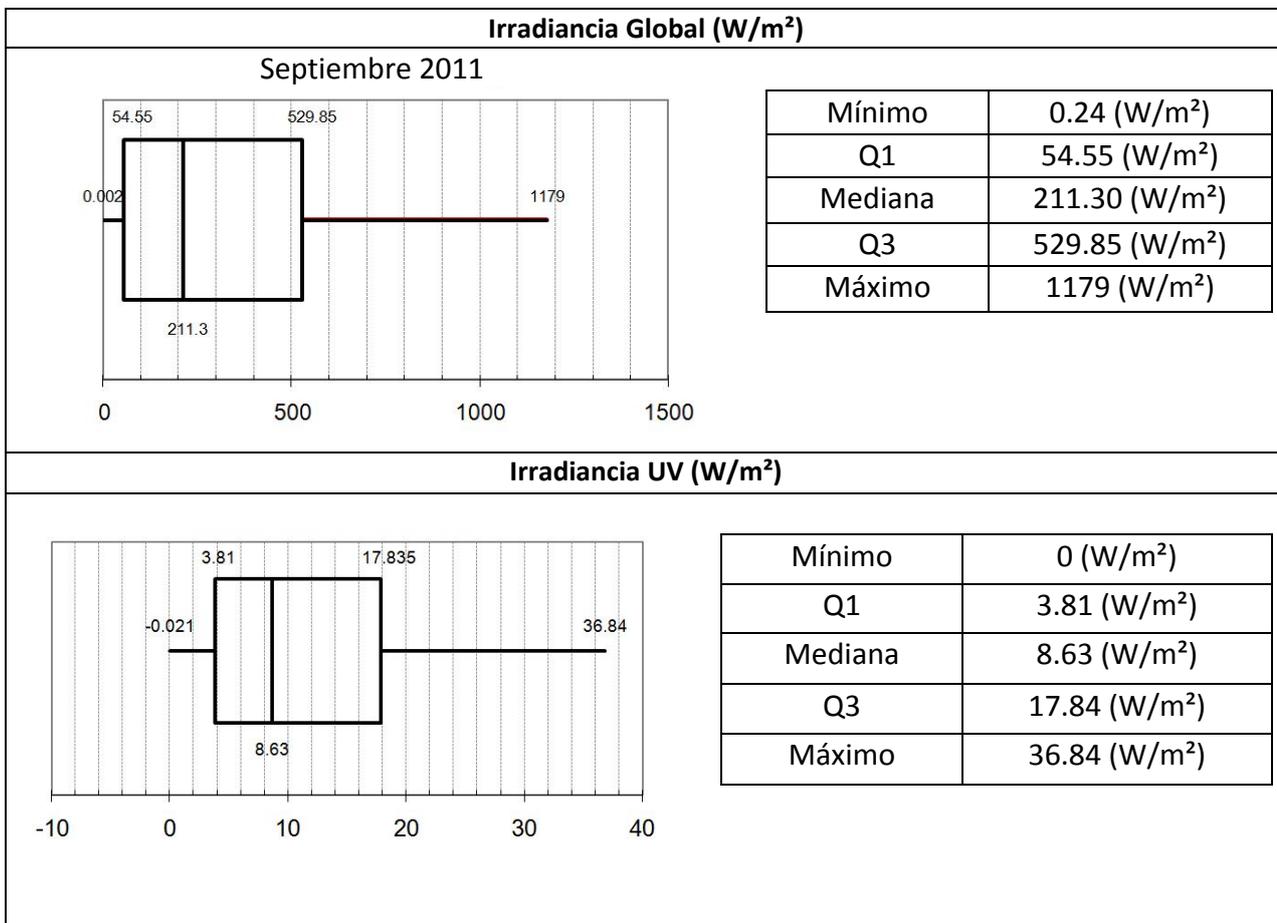


Figura 5.6.9. Caja de Bigotes Mes de Septiembre.

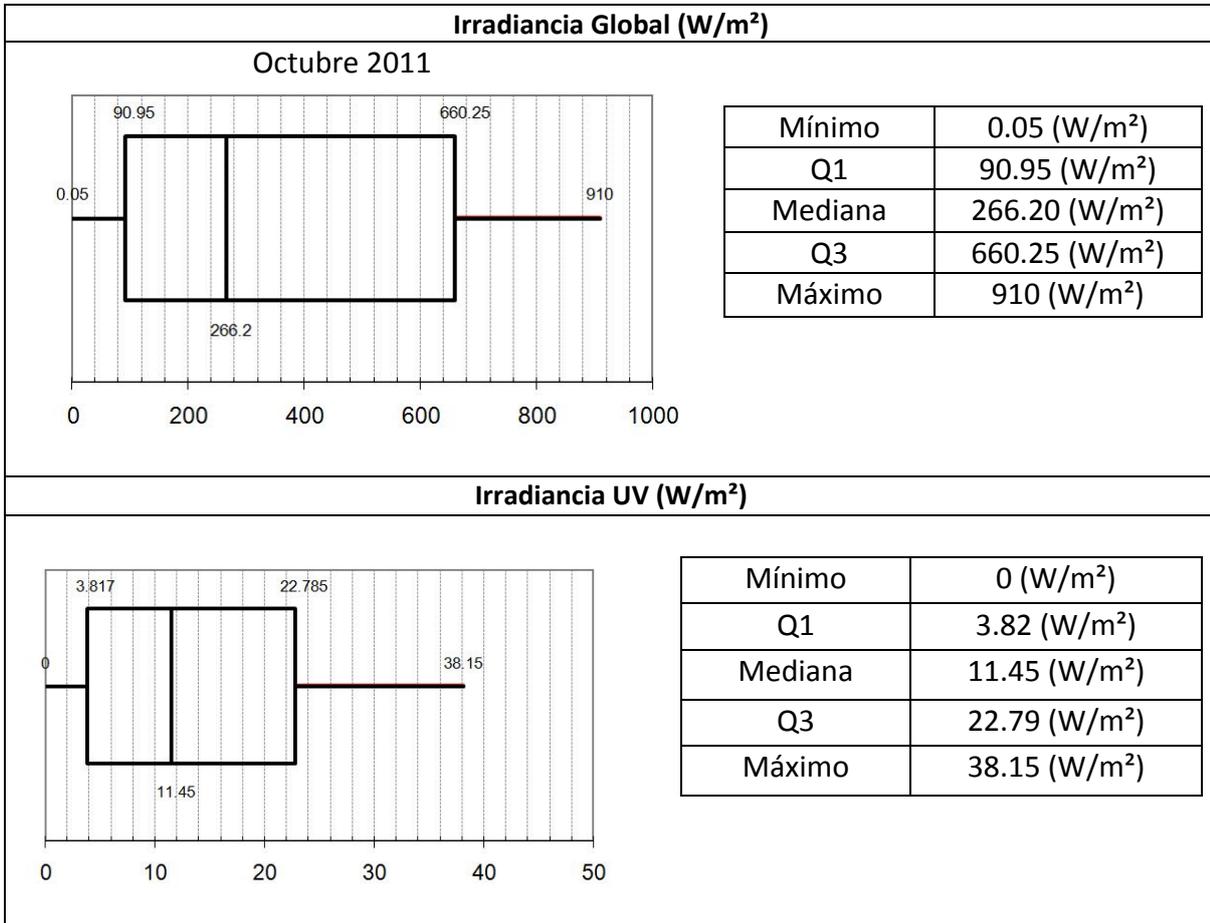


Figura 5.6.10. Caja de Bigotes Mes de Octubre.

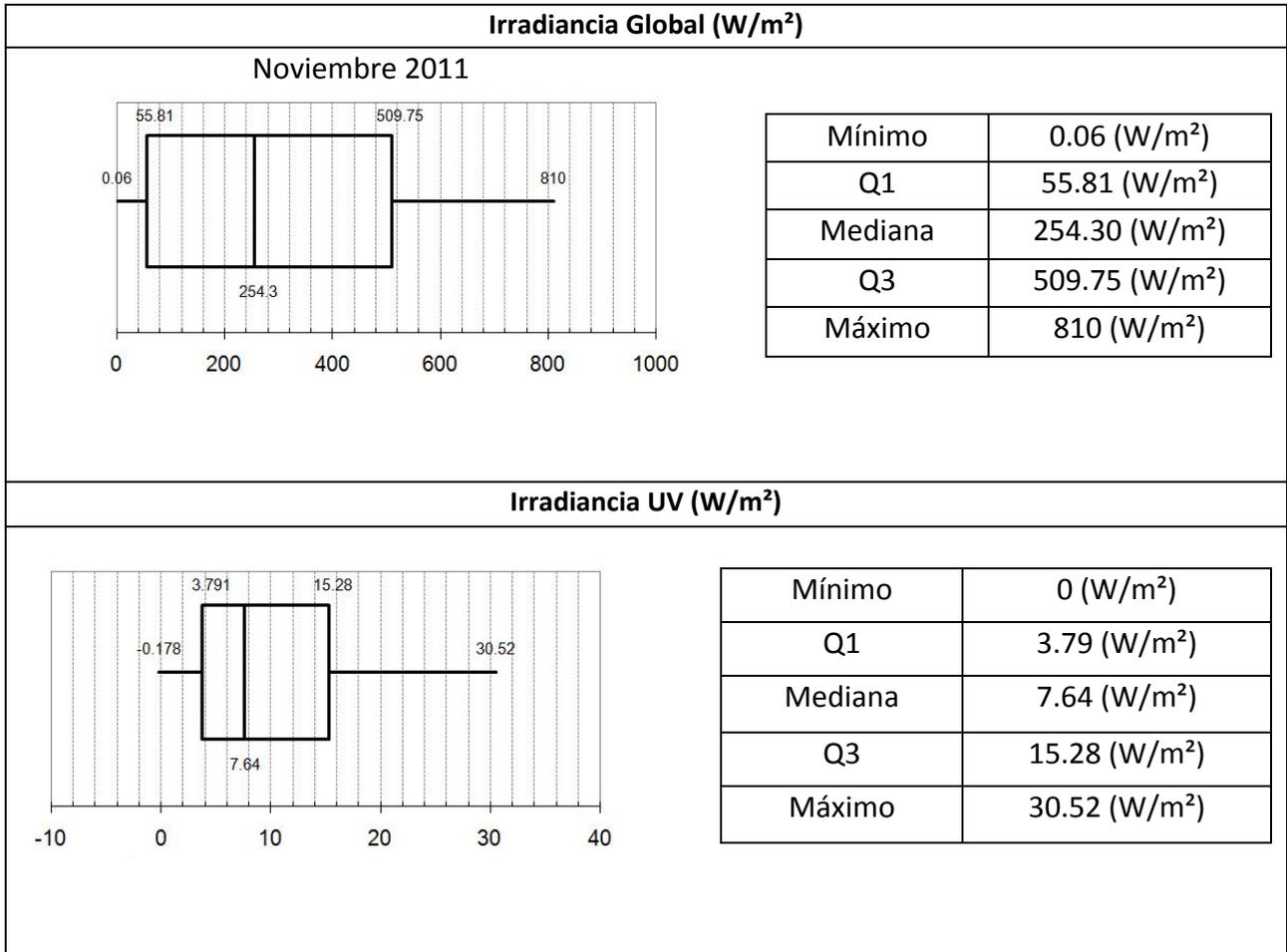


Figura 5.6.11. Caja de Bigotes Mes de Noviembre.

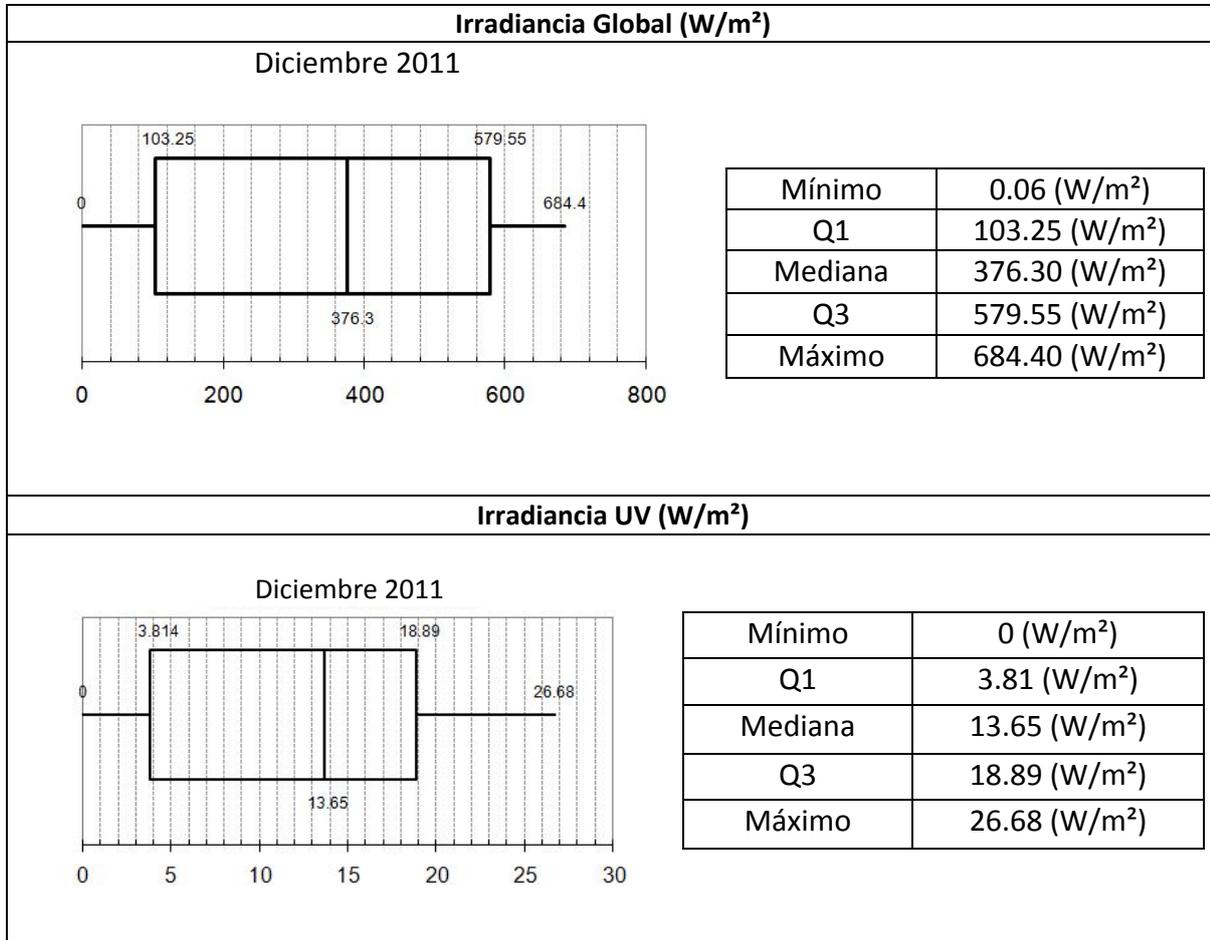


Figura 5.6.12. Caja de Bigotes Mes de Diciembre.

Para la Irradiancia Global, el mes de Abril es en donde se registró el valor máximo con un valor de 1117 W/m², (ver figura 6.6.4). Los valores promedio más bajos se registraron en el mes de Julio y Septiembre. Para el caso de la Irradiancia Ultravioleta el mes de Agosto es cuando se registro el valor máximo; con un valor de 41.94 W/ m² (ver figura 5.6.13)

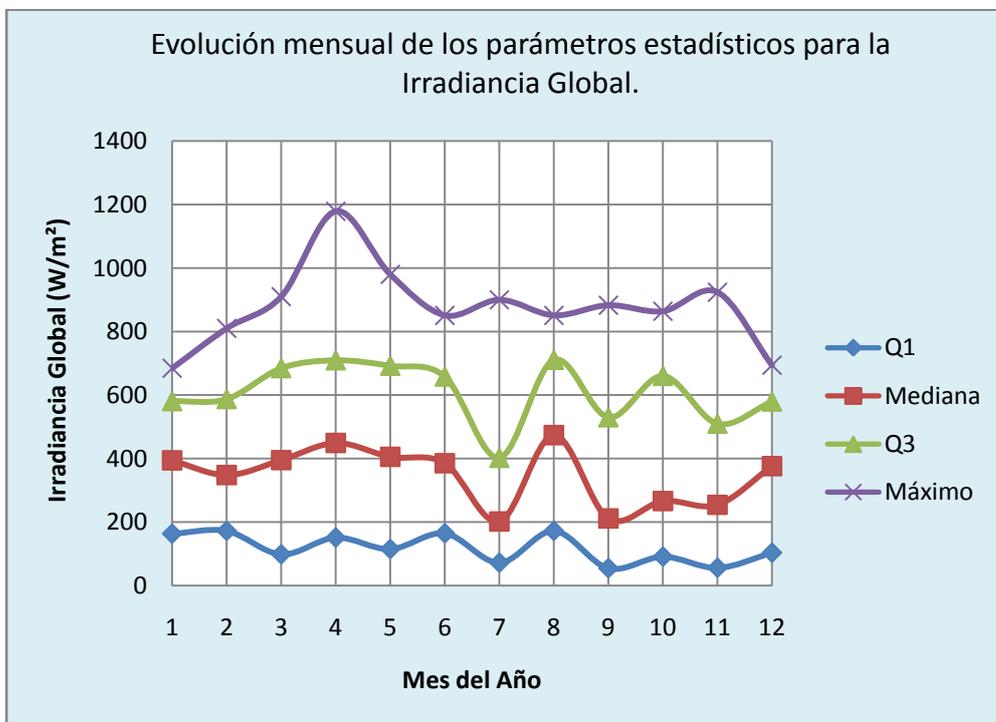


Figura 5.6.13.

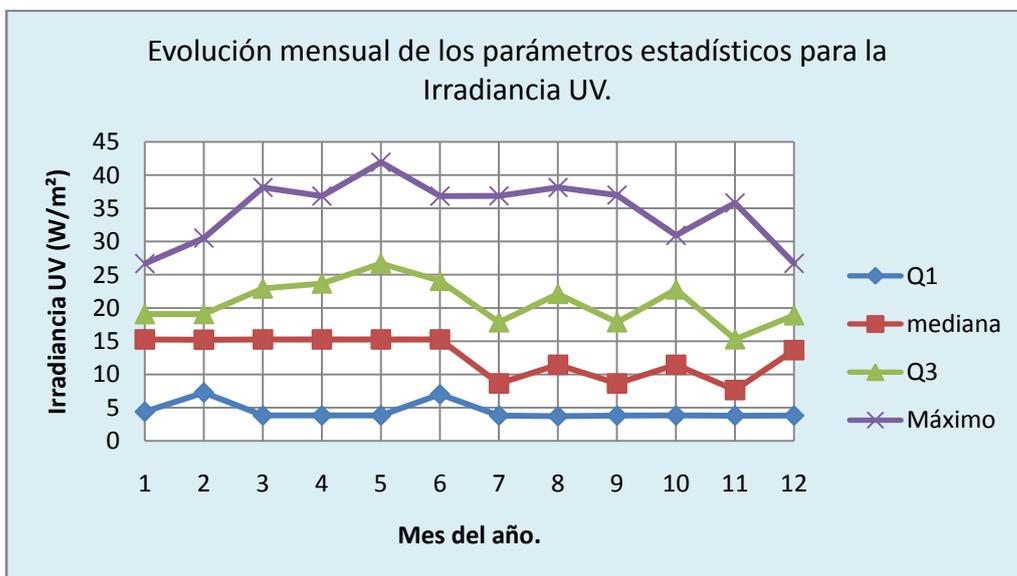


Figura 5.6.14.

5.7 Índice de Claridad.

Las variaciones estacionales y diarias de la radiación solar son descritas por una relación astronómica. En lapsos cortos, el uso de la radiación solar es seguido por parámetros estocásticos: frecuencia y altura de las nubes así como sus propiedades ópticas, aerosoles atmosféricos, albedo, vapor de agua y turbiedad atmosférica. (Woyte et al. 2007). Como consecuencia, la irradiancia solar puede ser considerada como la suma de dos componentes: determinísticos y estocásticos. Aislando los componentes estocásticos se pueden definir el índice de claridad instantáneo siguiendo la siguiente ecuación.

$$K_t = \frac{G}{I_{0h}} = \frac{G}{I_{0n} \cos\theta_z} = \frac{G}{I_{SC} E_0 \cos\theta_z} \dots\dots\dots(5.7.1)$$

Donde G es la irradiancia global horizontal en tierra; I_{0h} es la irradiancia solar horizontal extraterrestre; $I_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$, la llamada constante solar; E_0 es el denominado factor de corrección de excentricidad y θ_z es el ángulo cenital.

Tanto como el factor de corrección de excentricidad (E_0) y el ángulo cenital (θ_z) dependen nada más de relaciones astronómicas, pueden ser determinadas analíticamente cada instante de tiempo (Iqbal 1983). El índice de claridad instantáneo K_t es importante debido a que su cuantificación permitirá el análisis de las fluctuaciones de la irradiancia solar, ya que el índice de claridad proporciona el radio de la energía recibida a nivel del suelo en relación a la energía recibida en el superficie de la atmósfera, por lo tanto, indica la transparencia de la atmósfera. Bajo el mismo concepto se pueden definir el índice de claridad para las componentes difusa y directa de la radiación, respectivamente.

$$K_d = \frac{G}{I_{0h}} = \frac{G}{I_{0n} \cos\theta_z} \dots\dots\dots(5.7.2)$$

K_d , es conocido como la fracción difusa de la radiación (coeficiente de radiación difusa) y se define como el ratio de la irradiancia difusa sobre la superficie terrestre en relación de la irradiancia global horizontal extraterrestre.

$$K_b = \frac{I_n \cos \theta_z}{I_{0n}} = \frac{I_n}{I_{0n}} \dots \dots \dots (5.7.3)$$

K_b , es conocido como fracción directa y se define como la proporción de la irradiancia directa horizontal en relación con la irradiancia global horizontal extraterrestre.

Tomando en cuenta la ecuación, $G = I_n \cos \theta_z + D$, se deduce que:

$$K_t = K_d + K_b \dots \dots \dots (5.7.4)$$

Para determinar la correlación que existe entre la radiación ultravioleta y la nubosidad del cielo se decidió estudiar el índice de claridad horario k_t^h ; por lo tanto se considera la siguiente clasificación del cielo (ver tabla 5.7.1)

| Categoría | Característica | Descripción |
|-----------|--------------------------|---|
| 1 | $k_t^h \leq 0.35$ | La componente de la radiación solar global en la superficie es prácticamente cero; sin embargo la radiación global y la radiación difusa son iguales. El cielo estará cubierto totalmente por nubes. Cielo totalmente nublado. |
| 2 | $0.35 < k_t^h \leq 0.55$ | La radiación Solar Global en la superficie terrestre está compuesta por una proporción mayor de la componente difusa a la proporción de la radiación directa de la radiación solar global. Bajo estas condiciones el cielo es definido como parcialmente nublado con la predominancia de radiación difusa. |
| 3 | $0.55 < k_t^h \leq 0.65$ | La radiación solar global está compuesta por una proporción de la componente directa que aumenta y la fracción difusa disminuye. El cielo en estas condiciones está parcialmente nublado con predominancia de la componente de radiación directa. |
| 4 | $k_t^h > 0.65$ | La radiación global en la superficie de la tierra está compuesta en mayor proporción por la componente directa de la radiación solar y la contribución de la radiación difusa es mínima; esto indica que no existe nubosidad significativa y se puede hablar de cielo despejado. |

Tabla 5.7.1. Clasificación del cielo según índice de claridad (Escobedo Joao F., Gomes Eduardo N., "Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil" Applied Energy 86 (2009) 299-309).

5.8 Análisis del Índice de claridad en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería.

Haciendo una división de tipo estacional para el análisis de los índices de claridad; se obtuvieron los siguientes resultados:

En la figura 5.8.1 se observa la distribución de frecuencias del índice de claridad para la estación del año Invernal y se deduce lo siguiente: en esta época es cuando predominan índices de claridad $k_t^h > 0.65$ por lo que dominaron los cielos despejados por tanto la radiación global en la superficie de la tierra está compuesta en mayor proporción por la componente directa de la radiación solar y la contribución de la radiación difusa es mínima; como el índice de claridad predominó en la región tipo 4, la nubosidad no fue un factor determinante para la predicción de la radiación Ultravioleta. En el caso de la primavera, predominaron los días del tipo 1, 2 y 3; por lo que la nubosidad si es un factor en el comportamiento del flujo de radiación ultravioleta (ver figura 5.8.2). En el verano ocurre un efecto interesante ya que predominan los días del tipo 3, en donde a pesar de que hay nubosidad, aumenta la componente directa de la radiación global; por tanto este es un factor que afectará directamente al flujo de la radiación ultravioleta (ver figura 5.8.3). El otoño tiene mayor prevalencia de días despejados; por tanto la nubosidad fue necesariamente un factor que interfiriera sobre el flujo de la radiación ultravioleta (ver figura 5.8.4).

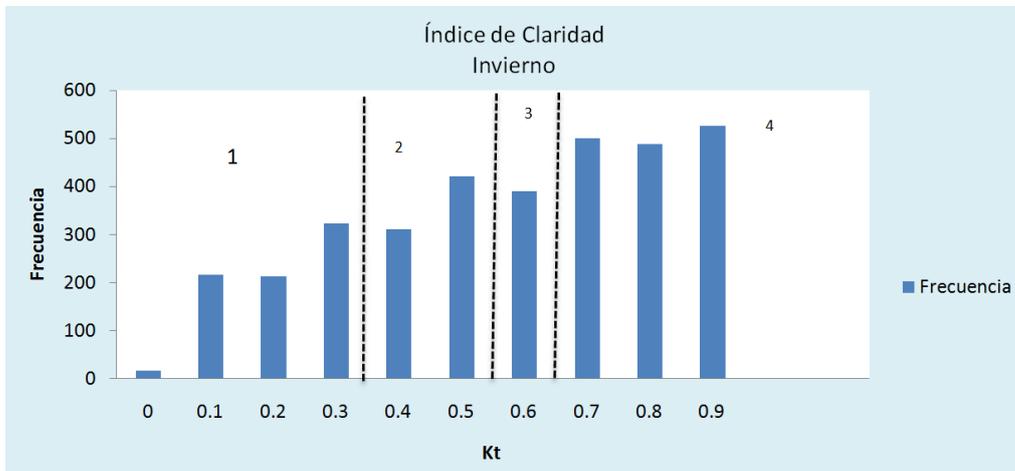


Figura 5.8.1. Distribución de frecuencias del índice de claridad, invierno.

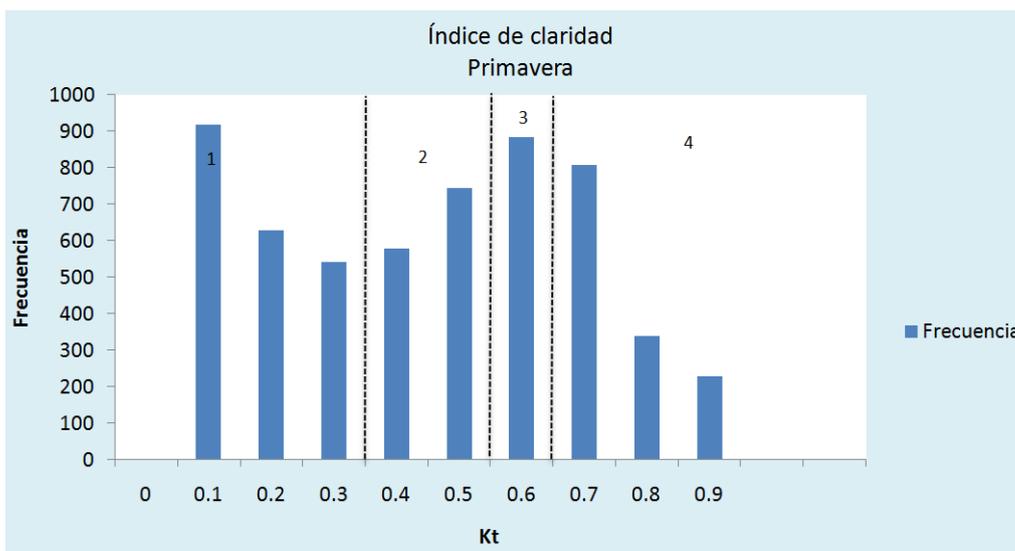


Figura 5.8.2. Distribución de frecuencias del índice de claridad, primavera.

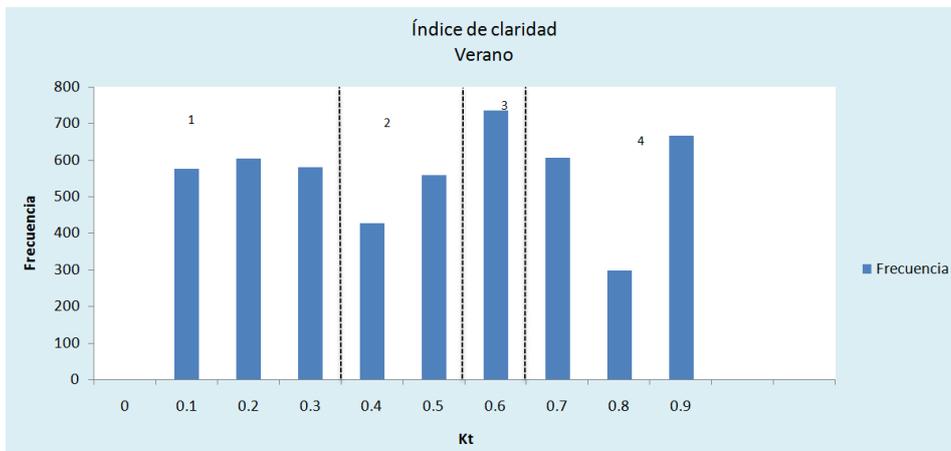


Figura 5.8.3. Distribución de frecuencias del índice de claridad, verano.

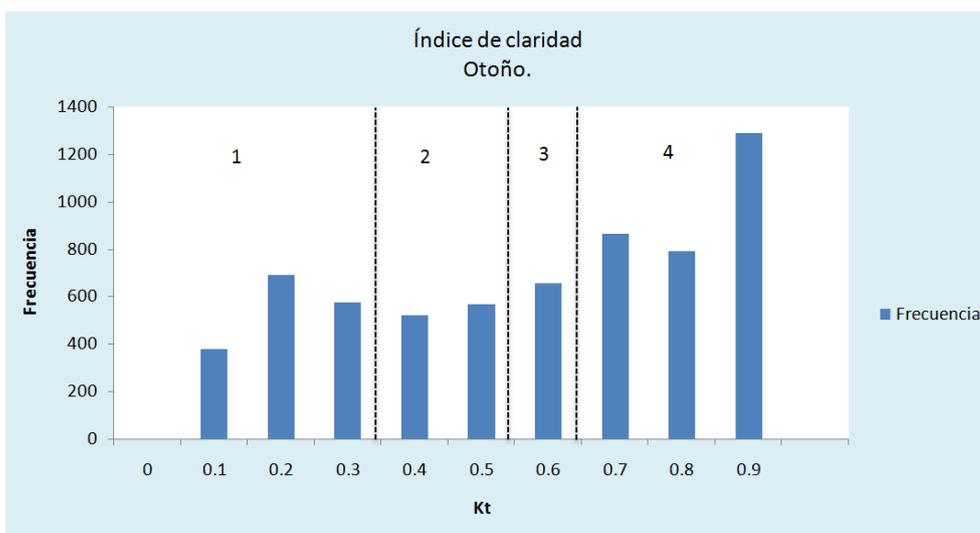


Figura 5.8.4. Distribución de frecuencias del índice de claridad, otoño.

VI Conclusiones.

Con este estudio se concluye lo siguiente:

1.- Los valores máximos de radiación ultravioleta ocurrieron en la estación veraniega, principalmente en el mes de agosto; de acuerdo a los datos analizados, este valor máximo se atribuye que aunque haya habido presencia de nubosidad, los cielos fueron del tipo 3 en donde existe una fracción mayor de la componente directa de la radiación global respecto de la radiación difusa; lo que ocasiona que la radiación ultravioleta alcance valores más altos, que si hubiera un cielo totalmente despejado. Esto es debido a que ocurre un efecto espejo que aumenta la reflexión de la radiación UV, por tanto la cantidad de radiación UV recibida en la superficie terrestre será mayor. El valor máximo de alcanzado de radiación UV fue de 41.94 W/m^2 a las 14:45hrs y se registro el día 10 de agosto de 2011.

2.- A partir del estudio estadístico preliminar de la radiación solar total y ultravioleta se extrae que: Se podrían comprobar o comparar con datos de otras localidades, se hace una hipótesis a comprobar si los mínimos absolutos de radiación no son representativos de la radiación, mientras que los máximos absolutos sí lo son. Las distribuciones presentan el mayor grado de estabilidad durante el periodo de verano y, nuevamente, en el caso de la radiación horaria, en las horas centrales del día.

Con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se obtuvo un modelo lineal para la obtención de la radiación ultravioleta a partir de datos de radiación global con un grado de aproximación alto, principalmente para la época de invierno donde se presenta un error sistémico de ± 0.4 ; con este modelo se podrán deducir valores de radiación ultravioleta con un alto grado de aproximación; por lo tanto será un herramienta para la continuación de un algoritmo más complejo que abarcará más localidades de la República Mexicana. Esto permitirá construir una base de datos robusta, con lo que se contará con una herramienta que permitirá evaluar y validar modelos paramétricos y espectrales como SMART'S, diseñado por Chris Gueymard, para las condiciones de la República Mexicana con datos medidos en tierra.

Esta investigación abre la puerta para que se realice un modelo que tome en cuantas más variables de entrada como son: los datos provenientes de los satélites, el albedo, la columna de ozono, la altitud y las condiciones topográficas de las regiones; para así obtener un modelo con mayor precisión. Como se mencionó en la introducción, la medición y el modelado de la radiación ultravioleta tiene relevancia porque este tipo de energía tiene importancia: en la degradación de materiales, en la oxidación fotocatalítica (la radiación ultravioleta activa un semiconductor en presencia de oxígeno) y en la predicción del índice eritemático, por mencionar algunos.

Como ejemplo de las aplicaciones del modelo aquí propuesto, para el campo de la construcción y la instalación de paneles fotovoltaicos es importante tomar en cuenta la cantidad de energía en forma de onda corta que recibirá el material, para determinar el tiempo de envejecimiento del material expuesto. Por otra parte, en materia de la oxidación fotocatalítica, el modelo contribuirá a proporcionar datos de radiación UV para determinar donde sería un lugar propicio para la instalación de plantas de desintoxicación de agua contaminada.

A lo largo de la investigación, se constató la importancia del modelo en aplicaciones de tipo ingenieril, sin embargo, es necesario resaltar el impacto que tendrá la prevención de enfermedades como: melanoma, cataratas y depresión del sistema inmunológico. Lo que permitirá, diseñar programas en materia de salud que consideren el índice eritemático, para determinar la adecuada protección de sistema cutáneo, oftálmico e inmunológico y así mejorar la calidad de vida de la población mexicana

VIII. Referencias.

- [1] Kerr J.B., Seckmeyer "Surface Ultraviolet Radiation: Past and Future" J. Geophys. Res., 107(D23)
- [2] Gueymard C. "SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment", December 1995.
- [3] Jacovides C.P., Kaskaoutis "Application of SPCTRAL2 parametric model in estimating spectral solar irradiances over polluted Athens atmosphere" Renewable Energy 29(2004) 1109-1119.
- [4] Murillo W., Cañada J. "Correlation between global ultraviolet (290-385nm) and global irradiance in Valencia and Cordoba (Spain)" Renewable Energy 28 (2003) 409-418
- [5] Barbero F.J., López G. "Determination of daily solar ultraviolet radiation using statistical models and artificial neural networks" Annales Geophysicae 24 (2006) 2105-2114.
- [6] Sabburg J.M., Parisi A.V. "Enhanced spectral UV irradiance: a 1 year preliminary study" Atmospheric Research 66(2003) 261-272
- [7] Gröbner J., Vergaz R., "Intercomparison of aerosol optical depth measurements in the UVB using Brewer spectrophotometers and a Li-Cor spectrophotometer" Geophysical Research Letter 28 (2001) 1691-1694
- [8] Foyo-Moreno I., Vida J. "Ground based Ultraviolet (290-385 nm) and broadband solar radiation measurements in south-eastern Spain" International Journal of Climatology 18 (1998) 1389-14000
- [9] Madkour M.A. El-Metwally M. "Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere" Renewable Energy 31 (2006) 361-382
- [10] Foyo-Moreno I., Vida J. "Estimating solar ultraviolet irradiance (290-385 nm) by means of the spectral parametric models: SPCTRAL2 and SMARTS2" Annales Geophysicae 18 (2000) 1382-1389

- [11] Gueymard C., Myers D., "Proposed reference irradiance spectra for Solar Energy system testing" *Solar Energy* 73 No 6 (2002) 443-467
- [12] Gueymard C., "Direct solar transmittance and irradiance prediction with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment" *Solar Energy* 74(2003) 355-379
- [13] Blumthaler M. Ambach W. "Increase in solar UV radiation with altitude" *Journal of Photochemistry and photobiology* 39 (1997) 130-134
- [14] Kent Tobiska W. "Recent Solar Extreme Ultraviolet Irradiance Observations and Modeling: A review" *Journal of geophysical research*, vol. 98 (1993) 879-893
- [15] Myres D., "Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality" *Energy* 30 (2005) 1517-1531
- [16] Escobedo Joao F., Gomes Eduardo N., "Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil" *Applied Energy* 86 (2009) 299-309.
- [17] Quiñones A., Almanza R. "Transmitancia de la radiación ultravioleta en diferentes medios para su aplicación en proyectos de energía solar" Tesis de Licenciatura UNAM 2009.
- [18] Quiñones A., Almanza R. "Modernización de la Estación Meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería UNAM" *Ingeniería de la Energía Solar Series del Instituto de Ingeniería* 2010.
- [19] Liou K.N., "An Introduction to Atmospheric Radiation", *International Geophysics Series*, Vol. 84, 1990