

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

VALORACIÓN DE LA CLARIDAD ATMOSFÉRICA EN EL SECTOR CENTRO-ORIENTE DE BOGOTÁ CON BASE A MEDIDAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

Sergio Andres Amado Holguin

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ciencias y Educación
Licenciatura en Física
Bogotá, Colombia
Febrero 2023

VALORACIÓN DE LA CLARIDAD ATMOSFÉRICA EN EL SECTOR CENTRO-ORIENTE DE BOGOTÁ CON BASE A MEDIDAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

Sergio Andres Amado Holguin

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Licenciado en Física

Director: Nelson L. Forero Ch.
Doctor Ciencias - Física

Línea de Investigación:
Medida de parámetros de radiación solar
Grupo de Investigación:
Física del medio ambiente y energía solar - FMAES

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ciencias y Educación
Licenciatura en Física
Bogotá, Colombia
Febrero 2023

Dedicatoria

A mis padres Sergio Amado y Helena Holguin que con su amor y valores han influido y apoyado en mi educación y persona.

A mi director de trabajo de grado Nelson Forero por brindarme sus ideas y conocimientos para lograr la culminación de este trabajo.

A la universidad Distrital Francisco José de Caldas quien influyo en mi desarrollo académico, a cada uno de mis maestros y finalmente a mis amigos de carrera quienes muy seguramente serán amigos de vida.

Agradecimientos

Especial agradecimiento al IDEAM, entidad gubernamental seccional, en especial al Ingeniero Químico Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, Magíster en Meteorología encargado de estudios de radiación solar y de química de la atmósfera, en la subdirección de Meteorología quien gentilmente gestiono y proporcionó el acceso a la base de datos con mediciones de radiación solar global hora, con la cual se realizó este trabajo de grado.

Resumen

La radiación solar es la principal fuente de energía para la vida en nuestro planeta esta se ve atenuada por diferentes fenómenos físicos y químicos al interactuar con la atmósfera, el estudio de la energía disipada y/o transformada permite establecer un panorama sobre el estado atmosférico local, todo esto cuantizado a través del índice de claridad atmosférico. En este sentido, en este trabajo se realizó el análisis estadístico - descriptivo del índice de claridad atmosférico para la estación del IDEAM BOGOTA - CENTRO localizada en el sector centro - oriente de bogotá en la localidad la candelaria con la finalidad de compararlo primero con la distribución de curvas diseñada por Badescu en la cual se hallan las medidas de forma (curtosis y asimetría) para el índice de claridad atmosférico diario y segundo con la escala de Iqbal la cual define el tipo de día basado en el índice de claridad atmosférico. Todo esto desarrollado para el periodo comprendido entre el 01 de diciembre del 2013 al 30 de septiembre del 2018.

Para el desarrollo del trabajo se estudio los aspectos generales de la atmósfera y los fenómenos físicos de atenuación de la radiación solar que aparecen al interactuar con esta. Para la obtención del índice de claridad atmosférico, primero se calculó la radiación solar extraterrestre para cada día del año en la zona de estudio anteriormente mencionada, posteriormente se depuran los datos de radiación solar global y se ajustan para cada uno de los días del año. Se hallo el promedio mensual y anual del índice de claridad atmosférica y se obtuvieron las medidas de forma (curtosis y asimetría).

Por último, se realiza un recuento de las diferentes fuentes de contaminación atmosférica y los principales contaminantes con el objetivo de observar los diferentes efectos en la salud, los ecosistemas y en el aprovechamiento de la energía solar que estos producen. Todo esto enfocado a evidenciar las bondades y beneficios de tener una atmósfera limpia.

Palabras clave: Atmósfera, claridad atmosférica, gases contaminantes, estadística descriptiva, radiación solar.

Abstract

Solar radiation is the main source of energy for life on our planet, it is attenuated by different physical and chemical phenomena when interacting with the atmosphere, the study of the energy dissipated and/or transformed allows establishing an overview of the local atmospheric state, all this quantized through the atmospheric clarity index. In this sense, in this work the statistical - descriptive analysis of the atmospheric

clarity index was carried out for the IDEAM BOGOTA - CENTRO station located in the central - eastern sector of Bogota in the town of La Candelaria with the purpose of comparing it first with the distribution of curves designed by Badescu in which the shape measures (kurtosis and asymmetry) for the daily atmospheric clarity index are found and second with the Iqbal scale which defines the type of day based on the atmospheric clarity index. All this development for the period between December 1, 2013 and September 30, 2018.

For the development of the work, the general aspects of the atmosphere and the physical phenomena of attenuation of solar radiation that appear when interacting with it were studied. To obtain the atmospheric clarity index, the extraterrestrial solar radiation was first calculated for each day of the year in the aforementioned study area, then the global solar radiation data is refined and adjusted for each day of the year. The monthly and annual average of the atmospheric clarity index was found and the shape measurements (kurtosis and asymmetry) were obtained.

Finally, a count of the different sources of air pollution and the main pollutants is made in order to observe the different effects on health, ecosystems and the use of solar energy that they produce. All this focused on highlighting the benefits and the benefits of having a clean atmosphere.

Keywords: Atmosphere, atmospheric clarity, polluting gases, descriptive statistics, solar radiation

Contenido

Lista de Figuras

Lista de Tablas

1 Introducción

A continuación se presenta los antecedentes, planteamiento del problema, justificación y objetivos que sustentan el presente trabajo.

1.1. Antecedentes

Organismos multilaterales internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), entre otras, adelantan proyectos de vigilancia e investigación enfocados a resolver problemas originados por la contaminación atmosférica y promover medidas que subsanen en alguna medida el deterioro ambiental y eviten un mayor impacto en la salud pública y de las condiciones ambientales y climáticas.

La afectación ambiental evidenciada particularmente por el calentamiento global, conlleva a su vez otros tantos efectos, como lo expresan estas entidades internacionales, como el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (https://www.ipcc.ch/reports/, 2021), de tal manera que facilitan no solo información, sino también evaluación teórico-experimental acerca del estado actual del medio ambiente (Organización mundial meteorológica, https://public.wmo.int/es/media/ 2021).

En este orden de ideas, las actividades humanas, procesos industriales en general y el consumismo de la sociedad desde finales de siglo XIX hasta el presente, han originado efectos sobre el planeta, como contaminación atmosférica por CO2 y de otros gases y compuestos, causando degradación y destrucción de ecosistemas, sumada con la contaminación con plásticos y combustibles fósiles, extraídos de manera invasiva usando fuentes hídricas y, llevando a la extinción de diversas especies animales. Ahora y desde un punto de vista opuesto, es fácil de entender los beneficios para el planeta y la humanidad en todos los órdenes, que trae el tener una atmósfera limpia y clara, así como un ambiente en general sano y libre de contaminación. Existen múltiples formas y mecanismos de contribuir para sanearlo y mejorarlo a partir de reducción de desechos y de emisión de gases. Esto último en particular puede hacerse con uso y aplicación de energías renovables, en particular la energía solar.

Es en este sentido que el Grupo de Investigación Física del Medio Ambiente y Energía Solar FMAES de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ha venido desa-

rrollando medidas, estudios y aplicaciones de la energía solar en diversos sectores del país y en particular en el sector centro oriente de Bogotá, donde opera la estación de medición de variables ambientales y variables atmosféricas y en este caso en particular, este trabajo va dirigido a valorar la claridad atmosférica, desde medidas de intensidad de la radiación solar global en una región determinada, además de la de dimensionar las bondades y beneficios de la calidad del aire y de la atmósfera en general.

1.2. Planteamiento del problema

Se estudian y se conocen históricamente los efectos que causa la contaminación atmosférica en la salud humana, pero también en la vida de plantas y animales, esto es, en los ecosistemas en general. Una política establecida por algunas de las entidades citadas anteriormente, conocida como *"gestión de la contaminación atmosférica"* pretende eliminar, o reducir hasta niveles aceptables agentes gaseosos y material particulado en suspensión presentes en la atmósfera que afectan a la vez, su claridad y que es evidencia de la calidad del aire. Es por ello, que en el grupo FMAES, se pretende realizar estudios y análisis que evidencien, no solo, que uno de los mecanismos a emplear para reducir la contaminación atmosférica y mitigar y subsanar sus efectos, es el uso de energías renovables y en particular la solar, sino también, estimar y dimensionar las bondades y beneficios de tener una atmósfera limpia, por ello nos planteamos ¿cómo **"valorar la claridad atmosférica con base a medidas de radiación solar global obtenidas en el sector centro-oriente de Bogotá?**

1.3. Justificación

Aunque por características naturales la atmósfera terrestre presenta ciertos niveles de claridad, también es cierto que la presencia de contaminantes y el incremento de la concentración de gases y partículas alteran su claridad y la calidad del aire. El aumento en la concentración de partículas y gases presentes en la atmósfera por encima de lo normal, atenúa en mayor grado la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, sin desconocer que la contaminación del aire se ha convertido en una preocupación de salud pública, a nivel mundial y cuya exposición por parte de la población, en particular en zonas urbanas, se ha vinculado con el aumento de mortalidad y morbilidad, fundamentalmente por Enfermedades Respiratorias Agudas (CEPIS, 2005).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Valorar la claridad atmosférica en el sector centro-oriente de Bogotá, con base a medidas de radiación solar global, además de establecer bondades y beneficios de una atmósfera limpia.

1.4.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general se debe:

- Recopilar, seleccionar y analizar literatura relacionada con el tema del trabajo.
- Realizar la gestión correspondiente ante entidades del estado, encargadas de establecer las condiciones climatológicas y de generar pronósticos para las diferentes regiones del país, como el IDEAM, a fin de obtener datos correspondientes a medidas de radiación solar global para los años 2013 al 2018.
- Obtenida la información y/o datos de parte del IDEAM, verificar, clasificar y depurar la base de datos obtenida de radiación solar global.
- Hacer estudio estadístico descriptivo de los niveles de radiación solar global y sus características.
- Hacer una valoración y/o estimación de la claridad atmosférica a partir de las medidas de radiación solar global.
- Establecer criterios que evidencien bondades y beneficios de una atmósfera limpia en el sector descrito.
- Elaboración del trabajo final y sustentación.

2 Aspectos Generales

2.1. La atmósfera terrestre

Es una cobertura gaseosa que rodea nuestro planeta. Formada por la desgasificación que sufrió el planeta durante su proceso de enfriamiento desde las primeras etapas de su formación. Por consecuencia de la atracción gravitatoria y la compresibilidad de los gases, la mayor parte de la masa de la atmósfera se encuentra cerca de la superficie de la Tierra, en los primeros 15 km se encuentra el 95 % del total de su masa. El límite superior se considera cerca de los 10.000 km de altura donde la concentración de gases es tan baja que se asemeja al espacio exterior.

2.1.1. Composición de la atmósfera

Esta ha variado a través de la historia de la Tierra hasta consolidarse la mezcla de gases y aerosoles actual distribuidos en diferentes proporciones. Estos se clasifican en dos grupos: los permanentes y los variables.

Los gases permanentes mantienen una proporción casi constante en la atmósfera: los más abundantes son el nitrógeno (78.08 %), el oxígeno (20.95 %) y el argón (0.93 %). Mientras, los gases variables son los que cambian en mayor proporción: los más importantes son el vapor de agua y el dióxido de carbono. Los diferentes gases que componen la atmósfera del planeta se pueden observar en la *tabla* **2-1**

Gas	Fórmula Química	Porcentaje (Por volumen)
Gases Permanentes		
Nitrógeno	N_2	78.08
Oxígeno	O_2	20.95
Argón	Ar	0.93
Neón	Ne	0.0018
Helio	He	0.0005
Hidrógeno	H_2	0.00006
Xenón	Xe	0.000009
Gases Variables		
Vapor de agua	H_2O	0 a 4
Dióxido de carbono	CO_2	0.036
Metano	CH_4	0.00017
Óxido nitroso	N_2O	0.00003
Ozono	O_3	0.000004
Partículas (polvo, etc)		0.000001
Clorofluorocarbonos (CFC)		0.00000002

Tabla 2-1: Proporción de gases permanentes y variables en la atmósfera.[**?**]

2.1.2. Estructura de la atmósfera

Es conveniente dividir la atmósfera en cuatro capas según la variación de la temperatura con la altura: tropósfera, estratósfera, mesósfera y termósfera como se puede observar en la *figura* **2-1**.

1. **Tropósfera:** Es la capa adyacente a la superficie terrestre, su límite superior la tropopausa alcanza aproximadamente una altura de 16 km sobre Colombia, concentra la mayoría de los gases de la atmósfera, aproximadamente 80 % de toda la masa de esta. La temperatura es máxima en su parte inferior de 15°C de media, a partir de allí disminuye según un gradiente térmico vertical (GTV) de 6.5°C por km ascendido hasta alcanzar un valor entre -75°C y -80°C en la tropopausa.

2. **Estratósfera:** Es la región que se extiende por encima de la tropopausa hasta una altura cercana a 50 km. En esta capa se genera la mayor parte del ozono atmosférico concentrado entre los 15 y 30 km de altura, llamado habitualmente capa de ozono. En la parte inferior de la capa hasta los 20 km de altura, la temperatura es prácticamente isotérmica, después, aumenta hasta alcanzar valores

cercanos a los 0°C en la estratopausa, debido a la absorción por el ozono de la radiación solar ultravioleta (fenómeno conocido como inversión térmica).

3. **Mesósfera:** Tiene un espesor aproximado de 35 km. Aquí la temperatura disminuye regularmente hasta alcanzar los -95°C en la mesopausa, en esta capa el aire es extremadamente fino y la presión atmosférica es baja. Es la zona más fría de la atmósfera. La mesosfera, que se extiende entre los 50 y 80 km de altura, concentra sólo cerca del 0.1 % de la masa total de la atmósfera. Tiene relevancia dada la ionización y las reacciones química que ocurren en ella.

4. **Termósfera:** En esta capa la temperatura va ascendiendo con la altura al absorber las radiaciones de alta energía. Aquí la composición de la atmósfera es distinta, gran parte de las moléculas presentes están ionizadas por la absorción de rayos gamma, rayos X y parte de la radiación ultravioleta, provocando que el nitrógeno y el oxígeno pierdan electrones quedando ionizados con carga (+), originando campos eléctricos por toda la capa.

   Se extiende desde los 80 km a los 600 km, aproximadamente. A esta altura, el aire es muy tenue y la temperatura cambia con la actividad solar. Está constituida por gran cantidad de partículas con carga eléctrica.

5. **Exosfera:** Es la capa de la atmósfera en la que los gases poco a poco se dispersan hasta que la composición se asimila a la del espacio interplanetario. Se localiza, aproximadamente a unos 600 km de altura, en contacto con el espacio exterior, donde está prácticamente el vacío. En esta capa la temperatura no varía y los gases pierden sus cualidades fisicoquímicas.

La ionósfera es, en cierto sentido, la última frontera de nuestro planeta y está integrada por las regiones de la termósfera y mesósfera, constituidas por iones y electrones, que se extiende hasta confundirse con el gas interplanetario extremadamente ligero. A 500 o 600 kilómetros de altitud aproximadamente, la atmósfera es tan poco densa que son extremadamente raras las colisiones entre las partículas neutras. A partir de los 500 Km, y hasta una altura indeterminada, se halla la exosfera. En ella, abunda el hidrógeno ionizado y hay una pérdida de partículas (protones y electrones) que escapan al espacio exterior, pérdida que se ve compensada por el aporte de partículas en forma de viento solar.[**?**]

2.2. Aspectos generales sobre radiación solar

La radiación solar es la energía emitida mediante ondas electromagnéticas que se propagan en todas las direcciones a través del espacio, generándose a partir de las

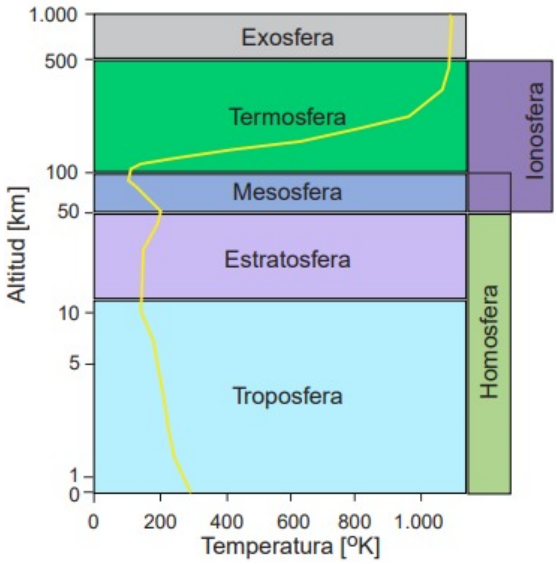


Figura 2-1: Capas de la atmósfera, según la variación de la temperatura con la altura.[?]

reacciones químicas en el núcleo solar por fusión nuclear y es emitida por la superficie solar, produciendo una energía de salida de aproximadamente 64 millones W/m^2, de la cual, nuestro planeta intercepta 1367 W/m^2. El sol emite energía en forma de radiación de onda corta, principalmente en la banda del ultravioleta, visible e infrarrojo cercano (200 a 3.000 nm) *figura* **2-2**. De la radiación emitida por el sol, el área del ultravioleta está comprendida entre los 100 - 400 nm, el infrarrojo cercano entre los 700 - 4.000 nm y la visible entre los 400 - 700 nm, a cada región le corresponde una fracción de la energía total que incide en la región superior de la atmósfera: 7.2 % ultravioleta, 47.2 % visible y 45.6 % infrarrojo.[?]

2.2.1. Interacción de la radiación solar con la atmósfera

En el espacio exterior no existe pérdida de radiación electromagnética por interferencia con ningún medio material, únicamente se produce el fenómeno de atenuación debido a la disminución del flujo radiante con el inverso del cuadrado de la distancia.

La radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre sufre un proceso de atenuación debido a tres fenómenos físicos principalmente: absorción, dispersión y reflexión producidos al entrar en contacto las ondas electromagnéticas con las diferentes componentes de la atmósfera.[?] Las consecuencias más evidentes son la reducción en la potencia recibida en la superficie terrestre debido a los fenómenos anteriormente mencionados, cambio en el contenido espectral debido a la mayor dispersión o absorción de algunas longitudes de onda, introducción de una componente difusa de la radiación solar y las

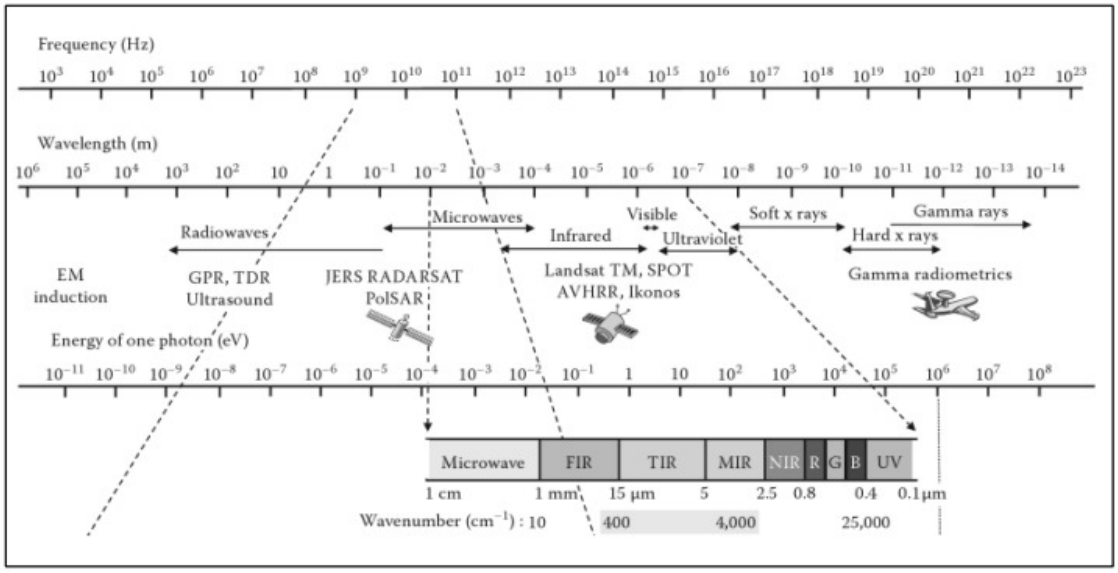


Figura 2-2: Bandas del espectro electromagnético.[?]

variaciones locales de la atmósfera los cuales tienen efectos adicionales sobre la potencia incidente, el espectro y la direccionalidad.

2.2.1.1. Dispersión

También conocida como scattering, es el proceso en el cual pequeñas partículas y moléculas dispersan parte de la radiación solar incidente en direcciones aleatorias, sin alteración de su longitud de onda. En este fenómeno se reduce la cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre. Una parte importante de radiación de onda corta dispersada es enviada de nuevo al espacio exterior. La "cantidad" de dispersión que se presenta en la atmósfera terrestre depende de dos factores: la longitud de onda de la radiación incidente y el tamaño de las partículas o moléculas que la dispersan.[?] Esto quiere decir, partículas y moléculas con tamaños relativamente pequeñas comparadas con la longitud de onda de la radiación incidente causa que esta se disperse en todas las direcciones (dispersión de Rayleigh). Aerosoles cuyos tamaños son comparables o exceden a las longitudes de onda de la radiación incidente, hacen que ésta no se disperse en todas las direcciones sino mayormente hacia adelante (dispersión de Mie).[?]

1. **Dispersión de Rayleigh:** Cuando el tamaño de las partículas es mucho menor que la longitud de onda de la radiación incidente, concretamente, con radio inferior a 0.33 λ (partículas dispersantes esféricas) y además cada partícula dispersa de forma independiente respecto de las demás, se puede modelar a través de la ley obtenida por Lord Rayleigh en 1871, según la cual la dispersión por moléculas



Figura 2-3: Esquema de la dispersión de Rayleigh y Mie.[**?**]

de gases es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Por tanto, será una dispersión selectiva (no todas las longitudes de onda se dispersan por igual), siendo dominante las longitudes de onda más cortas. Además, encontró que la dispersión es máxima en la dirección de propagación de la radiación incidente y mínima en la dirección perpendicular *figura* **2-3**.[**?**]

2. **Dispersión de Mie:** Cuando el tamaño de las partículas es comparable a la longitud de onda de la radiación incidente, se modela a partir de las investigaciones realizadas por Mie en 1908, basada en series matemáticas que contienen todos los tamaños de las partículas, siendo el primer término de la serie el correspondiente a la dispersión de Rayleigh.[**?**] Este fenómeno apenas depende de la longitud de onda (dispersión no selectiva), sobre todo para las partículas de mayor tamaño, de modo que la luz dispersada continuaría siendo blanca. Esta dispersión produce un patrón como un lóbulo de antena, con un lóbulo delantero más nítido y más intenso en las partículas más grandes *figura* **2-3**.

3. **Dispersión no selectiva:** Normalmente se produce en la atmósfera baja, no dependen de la longitud de onda de la radiación incidente y las partículas existentes en esa parte de la atmósfera son mayores que la radiación que incide. Generalmente esta se produce por las gotas de agua en la atmósfera.

Ambos modos de dispersión se caracterizan porque su radiación dispersada tiene diferente geometría. En la dispersión de Rayleigh, el proceso es idéntico hacia adelante que hacia atrás (presentando un mínimo a 90° de la línea de incidencia). En la dispersión de Mie, en cambio, hay más energía dispersada hacia adelante que hacia atrás, y esta diferencia se acentúa con el tamaño de las partículas.[**?**] Por último, la radiación dispersada por una partícula (fenómeno denominado dispersión simple) choca con otras partículas presentes en el medio, que la dispersan nuevamente, y este proceso continúa en la atmósfera; es lo que se conoce como dispersión múltiple.

2.2.1.2. Absorción

Debido a que algunos gases y partículas que componen la atmósfera tienen la capacidad de absorber la radiación recibida, la atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda. Este fenómeno se da cuando la frecuencia de la radiación solar es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas; cuando este gas absorbe energía, esta se convierte en energía molecular en movimiento, es decir, un incremento en la temperatura.

Como se dijo anteriormente, la atmósfera está constituida por diferentes gases y cada uno de ellos absorbe energía de manera distinta (selectivamente para diferentes longitudes de onda), en algunos casos son transparentes para ciertos rasgos del espectro.[**?**] Los gases que son responsables de dicha absorción son, fundamentalmente:

1. **Oxígeno (O_2):** Tiene la capacidad de absorción de la radiación ultravioleta por debajo de 100 nm.

2. **Ozono (O_3):** Tiene una gran influencia sobre la biosfera por su eficiente absorción de la radiación solar ultravioleta. Esta absorción se clasifica en:

   a) **Ultravioleta tipo A:** Comprendida entre 320 y 400 nm.

   b) **Ultravioleta tipo B:** Comprendida entre 290 y 320 nm.

   c) **Ultravioleta tipo C:** Comprendida entre los 100 y 290 nm.

   La última es la más perjudicial para los seres vivos. Afortunadamente, el O_3 absorbe totalmente la radiación UV-C y parcialmente las otras, solo recibe la superficie el 10 % de la UV-B y el 90 % de la UV-A.

3. **Vapor de agua (H_2O):** Tiene la capacidad de absorber la radiación infrarroja de onda larga procedente de la Tierra en torno a 6 μm.

4. **Dióxido de carbono (CO_2):** Absorbe radiación alrededor de 15 - 17.5 μm

En este sentido, aparecen una serie de regiones en el espectro en las que la radiación es absorbida por uno o varios de los gases; llamadas bandas de absorción. Por otro lado, regiones en las que no se produce absorción; se conocen como ventanas atmosféricas, como la zona espectral de la luz visible que se comporta de forma casi transparente. En la *figura* **2-4** se muestra como los diferentes gases que componen la atmósfera terrestre absorben la radiación solar a distintas longitudes de onda.

2.2.1.3. Reflexión

También conocida como albedo, este fenómeno se da cuando la radiación solar incidente cambia de sentido tras colisionar con una partícula de la atmósfera. Este proceso

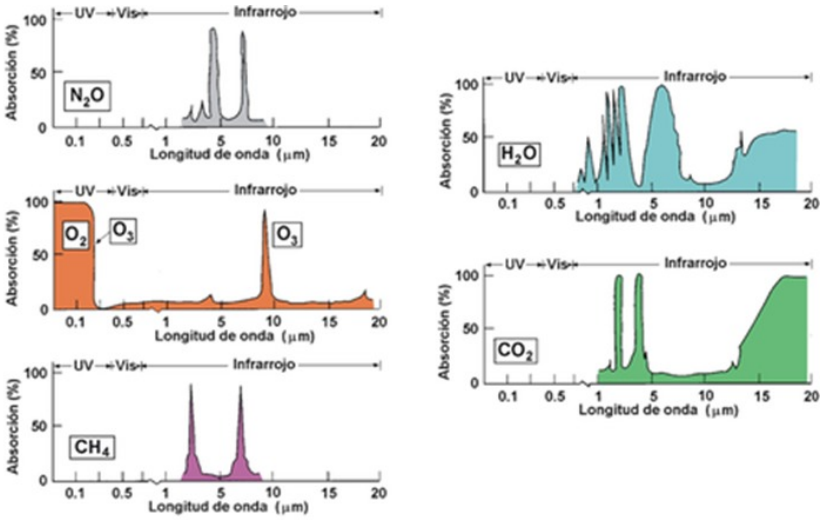


Figura 2-4: Coeficientes de absorción (en %) por gases atmosféricos, en función de la longitud de onda.[**?**]

causa una importante atenuación de la radiación incidente, ya que gran parte de ella es reenviada de vuelta al espacio. La reflexión atmosférica es en promedio de un 30 %, se puede expresar en porcentaje como la *ecuación* 2-1:

$$A\,\% = \frac{R}{H} * 100 \tag{2-1}$$

Donde $A\,\%$ correspondería a la reflexión atmosférica, R es el flujo de radiación reflejada y H es el flujo total incidente. Este valor es variable de un lugar a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, entre otras. En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menos que las claras y lisas ver *tabla* **2-2**. Además, al aumentar la humedad del suelo, este absorbe mayor cantidad de radiación.[**?**]

SUPERFICIE	*REFLEXIÓN (%)*
Nieve fresca	80 - 85
Arena	20 - 40
Pasto	20 - 25
Bosque	5 -10
Suelo seco	15 - 25
Barro húmedo	5
Agua (Sol cerca del horizonte)	50 - 80
Agua (Sol cerca del cenit)	3 - 5
Nube gruesa	70 - 80
Nube delgada	25 - 30
Tierra y atmósfera global	30

Tabla 2-2: Reflexión de la radiación solar con algunas superficies.

2.2.2. Componentes de la radiación solar

La radiación solar que llega a la superficie terrestre después de efectos de atenuación se clasifica en radiación directa, difusa y global ver *figura* **2-5**.

2.2.2.1. Radiación solar directa

Es la radiación solar que alcanza la superficie terrestre sin ser modificada por ninguno de los tres procesos de interacción con la atmósfera anteriormente descritos. Esta radiación llega a la superficie sin cambios de dirección. Sobre la superficie de la tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores:[**?**]

1. Constante solar.
2. Altura del sol sobre el horizonte.
3. Transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

2.2.2.2. Radiación solar difusa

Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre después de haber sido alterada por los diferentes procesos anteriormente mencionados al atravesar la atmósfera. La radiación solar difusa diaria es la cantidad de radiación difusa entre las seis de la

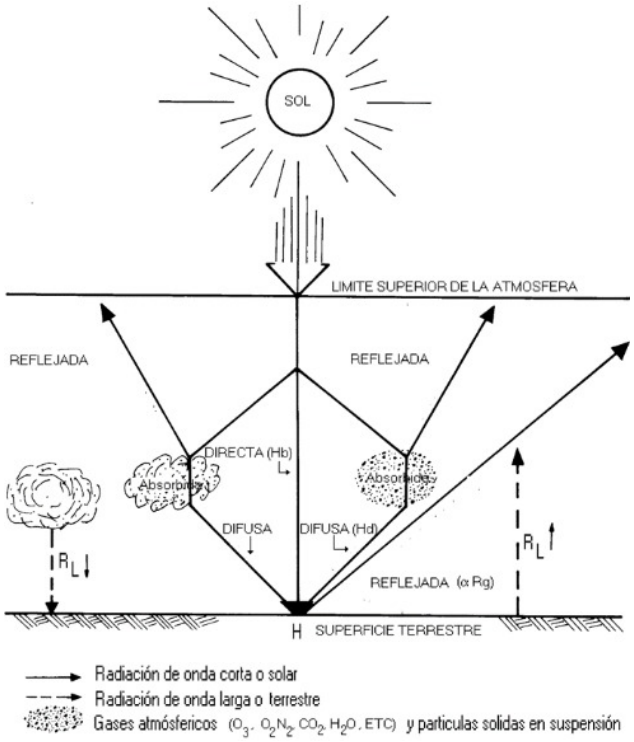


Figura 2-5: Diferentes componentes de radiación solar.[**?**]

mañana y las seis de la tarde, sus valores oscilan entre 300 y 5.500 $\frac{Wh}{m^2}$ al día. Esta depende de:

1. La altura del sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa.

2. Nubosidad. Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.

3. Cantidad de partículas en la atmósfera. A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente, aumenta con la contaminación.

4. Altura sobre el nivel del mar. Al aumentar la altura, la componente de radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

2.2.2.3. Radiación solar global

Es el conjunto de la radiación directa y la difusa, es toda la radiación solar que llega a superficie terrestre. El aporte de cada componente a la radiación global varía con la altura del sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

2.3. Claridad atmosférica

El estudio constante del comportamiento de la radiación solar en los diferentes procesos físicos al atravesar la atmósfera permiten dar información de la energía disipada y/o transformada en los diferentes lugares del planeta. Además, que permite estructurar un panorama sobre el estado atmosférico local. Todo esto, cuantificado en el índice de claridad atmosférica.

2.3.1. Radiación solar extraterrestre (H_o)

La radiación solar extraterrestre es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. Este valor se define a partir de la constante solar, con algunas correcciones. Debido a que la constante solar es un valor definido como la cantidad de radiación que alcanza en la parte superior de la atmósfera una superficie perpendicular a los rayos solares y a una distancia del sol - tierra media, sabemos que esta distancia varía a lo largo del año. Por lo cual, podemos expresar esta radiación a través de la *ecuación* 2-2 [**?**]:

$$H_o = \left(\frac{24}{\pi}\right) * I_{sc} * E_0 * \cos(\varphi) * \cos(\delta) \left[\sin(w_s) - \left(\frac{\pi}{180}\right) * w_s * \cos(w_s)\right] \tag{2-2}$$

Donde:

- I_{sc}: Constante solar, es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera, perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a una distancia media sol - tierra de una unidad astronómica: $1{,}496 * 10^{11}$ m. El valor medio de I_{sc} es de 1.967 $\frac{calorias}{cm^2 * minuto}$ ó 1366 $\frac{W}{m^2}$.[**?**]

- E_o: Es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra. Es una medida de que tan lejos o que tan cerca es la distancia tierra - sol, en determinada época del año con respecto a un valor constante, ver *ecuación* 2-3 [**?**]:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0{,}333 * \cos\left(\frac{360 * d_n}{365}\right) \tag{2-3}$$

  Donde r_0 corresponde a la distancia media sol - tierra y r es la distancia sol - tierra en determinado día del año.

- φ: Latitud terrestre en el lugar de análisis.

- δ: Es la declinación solar, corresponde a la posición angular que se forma entre el plano del ecuador y la línea que une centro del sol con el centro del planeta en

determinada época del año. Su rango de variación es $-23{,}45° \leq \delta \leq +23{,}45°$ y se puede expresar como la *ecuación* 2-4:

$$\delta = 23{,}45° * \sin\left[\frac{360 * (d_n + 284)}{365}\right] \tag{2-4}$$

Donde d_n corresponde al día del año que se quiere estudiar.

- w_s: Ángulo horario, es el ángulo formado en el polo norte por el cruce entre el meridiano del punto de medición y el meridiano formado por la trayectoria del sol y se expresa como la *ecuación* 2-5 [**?**]:

$$w_s = \arccos\left(-\tan\varphi * \tan\delta\right) \tag{2-5}$$

2.3.2. Radiación solar terrestre (H_G)

Es la radiación promedio solar diaria que incide sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre [**?**]. A diferencia de H_o estos valores son obtenidos a través de medición directa por medio de un pirómetro (instrumento de medición de radiación solar global), donde este equipo solo mide irradiancia ($\frac{W}{m^2}$), se debe tener en cuenta que el valor de la radiación solar terrestre (H_G) corresponde es al valor del promedio diario de energía acumulada por unidad de área ($\frac{Wh}{m^2}$). [**?**]

2.3.3. Índice de claridad atmosférica (K_T)

Es la relación entre la radiación solar en la superficie de la tierra H_G y la radiación en la superficie extraterrestre. Este índice muestra una medida de la transparencia de la atmósfera terrestre. Esto quiere decir, que si hay mucha contaminación entonces el índice de claridad será muy cercano a **0**. Por otro lado, si el índice se acerca a **1** indicaría que hay poca contaminación. Además muestra la energía en forma de ondas electromagnéticas que se transforma por los diferentes fenómenos físicos descritos anteriormente, ver *sección* 2.2, al atravesar la atmósfera. El índice de claridad atmosférica se define como la *ecuación* 2-6:

$$K_T = \frac{H_G}{H_O} \tag{2-6}$$

Iqbal en 1983 postuló ciertos límites para definir los tipos de días basado en K_T, ver *tabla* **2-3** [**?**]:

Índice de claridad	**Tipo de día**
$K_T \geq 0{,}6$	Días claros
$0.3 < K_T < 0.6$	Días parcialmente nublados
$K_T \leq 0{,}3$	Días nublados

Tabla 2-3: Escala de Iqbal definiendo el tipo de día basado en K_T.

2.4. Estudio (estadístico - descriptivo)

La aplicación del tratamiento estadístico tiene dos fases fundamentales:

1. Organización y análisis inicial de los datos recogidos.
2. Extracción de conclusiones válidas y toma de decisiones razonables a partir de ellos.

Los objetivos de la estadística descriptiva son los que se abordan en la primera de estas fases. Es decir, su misión es ordenar, describir y sintetizar la información recogida. Es este proceso será necesario establecer **medidas descriptivas** que reduzcan a un número manejable de parámetros el conjunto. La realización de gráficas también forma parte de la estadística descriptiva dado que proporciona una manera visual directa de organizar la información.[**?**]

2.4.1. Medidas descriptivas

Son valores numéricos calculados a partir de la muestra y que nos resumen la información contenida en ella.[**?**]

2.4.1.1. Medidas de centralización

Indican el valor promedio de los datos, o en torno a que valor se distribuyen estos.

1. **Media aritmética ($\bar{x}$):** Suponiendo que se tiene una muestra de tamaño N, donde la variable estadística x toma los valores x_1, x_2 ... x_N, la media o promedio ($\bar{x}$) se define como la *ecuación* 2-7:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \tag{2-7}$$

   Es la suma de todos los valores x_i dividido sobre la cantidad total de datos N, generando de esta manera un único valor que en la mayoría de los casos representa

de la mejor manera al conjunto de datos. Para datos agrupados se calcula a partir de la *ecuación* 2-8:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i * f_i}{N} \tag{2-8}$$

Donde f_i representa a la frecuencia absoluta.

2. **Mediana (M_e):** Es el punto medio del total de observaciones, luego de que han sido ordenados y que deja al mismo número de observaciones por debajo de su valor, así como por arriba de él. Cuando el conjunto de datos sigue una distribución asimétrica, la media llega a no ser el valor más adecuado como medida de tendencia central y se recomienda utilizar la mediana. Para datos agrupados se calcula a partir de la *ecuación* 2-9:

$$Me = L_i + \frac{\frac{N}{2} - f_{i-1}}{f_i} * Amp \tag{2-9}$$

Donde L_i representa al limite inferior de la clase mediana, f_{i-1} es la frecuencia absoluta acumulada anterior a la clase mediana, f_i es la frecuencia absoluta de la clase mediana y Amp corresponde a la amplitud de cada uno de los intervalos de la muestra.

3. **Moda (M_o):** Corresponde al número que más se repite dentro de un conjunto de datos, y esta es la medida de tendencia central menos útil en la práctica ya que puede haber múltiples modas dentro de un mismo conjunto y este valor no aporta mucha información sobre el resto de los datos. Para datos agrupados se calcula a partir de la *ecuación* 2-10:

$$Mo = L_i + \frac{f_i - f_{i-1}}{(f_i - f_{i-1}) + (f_i - f_{i+1})} * Amp \tag{2-10}$$

Donde L_i en este caso corresponde al limite inferior de la clase modal, $f_i - f_{i-1}$ es la diferencia entre la frecuencia absoluta modal y la frecuencia absoluta pre-modal y $f_i - f_{i+1}$ es la diferencia entre la frecuencia absoluta modal y la frecuencia absoluta post-modal.

2.4.1.2. Medidas de dispersión

Indican la variabilidad de los datos en torno a su valor promedio, es decir si se encuentran muy o poco esparcidos en torno a su centro. Se pueden definir entonces, diversas medidas de desviación o dispersión, siendo éstas fundamentales para la descripción estadística de la muestra.

1. **Recorrido:** También llamado rango es la diferencia entre el valor máximo y mínimo que toma la variable estadística. El valor obtenido nos brinda la información en relación al intervalo entre los valores límites en los que se observaron los datos.

2. **Desviación media:** Es la medida de dispersión que mide más exactamente el grado de dispersión de un conjunto de datos con relación a la media aritmética. En otras palabras es la medida que nos determina en cuantas unidades en promedio los datos se hallan desviados o alejados de la media aritmética. La expresión de la desviación media será, ver *ecuación* 2-11:

$$D\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |x_i - \bar{x}|}{N} \tag{2-11}$$

3. **Varianza y desviación típica:** Está basada en un valor promedio de las desviaciones respecto a la media. En este caso, en vez de tomar valores absolutos de las desviaciones, para evitar así que se compensen desviaciones positivas y negativas, se usan los cuadrados de las desviaciones. Esto hace además que los datos con desviaciones grandes influyan mucho en el resultado final. Se define entonces la varianza de una muestra como la *ecuación* 2-12:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \tag{2-12}$$

   Para tener un valor que indique la dispersión de los datos, que este tenga las mismas unidades de la media y sea sencillo de interpretar, se utiliza la desviación estándar, que cuantifica la dispersión promedio de los elementos en relación a la media y se calcula como la raíz positiva de la varianza para datos agrupados en intervalos, ver *ecuación* 2-13.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 * f_i}{N}} \tag{2-13}$$

4. **Coeficiente de variación:** Con la finalidad de comparación con otras muestras (con unidades diferentes), se definen unas medidas de dispersión relativas, que son independientes de las unidades usadas. Entre estas se destacan el coeficiente de variación de Pearson, definido como el coeficiente entre la desviación típica y la media aritmética, ver *ecuación* 2-14:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \tag{2-14}$$

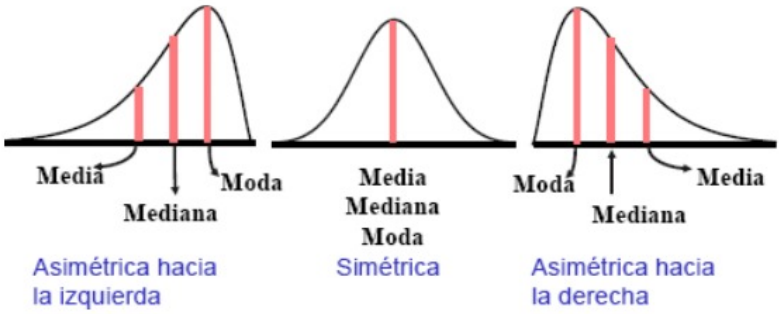


Figura 2-6: Relación de la media ($\bar{x}$), la mediana (M_e) y la moda (M_o) con la asimetría.[?]

2.4.1.3. Medidas de forma

Son valores que representan o dan a conocer la manera en que los datos se hallan distribuidos en relación a la media aritmética y toman como referente de comparación a la distribución normal o campana de Gauss, en lo que hace relación al sesgo y a la curtosis. [?]

1. **Coeficiente de asimetría (A_S):** La distribución de medidas es simétrica cuando valores de la variable equidistantes, a uno y otro lado, del valor central tienen la misma frecuencia, esto significa que la mitad de la distribución derecha se refleja en la mitad izquierda, tomando como eje de simetría la línea vertical que pasa por la media aritmética.
   Se dice que una distribución de medidas es simétrica, en el caso donde los valores de media aritmética, mediana y moda coinciden ($\bar{x} = M_e = M_o$). En el caso que no haya simetría, debido a la presencia de valores extremos bien bajos o bien altos. La presencia de estos valores influye en la $\bar{x}$ y por lo tanto toma un valor o menor o mayor a la M_e. Se tendrá asimetría a la derecha (o positiva) o a la izquierda (o negativa). En el caso de una distribución asimétrica, la media, mediana y moda no coinciden, siendo ($\bar{x} \geq M_e \geq M_o$) para una asimetría positiva y ($\bar{x} \leq M_e \leq M_o$) para una asimetría negativa, ver *figura* **2-6**.

   Existen dos coeficientes principales, aunque no son los únicos:

   a) **Coeficiente de asimetría de Fisher (CA_F):** Evalúa la proximidad de los datos a su media $\bar{x}$, se expresa como la *ecuación* 2-15:

   $$CA_F = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3}{s^3 N} \tag{2-15}$$

   En el caso de una distribución simétrica, el coeficiente de asimetría será nulo ($CA_F = 0$). En caso contrario, CA_F tendrá valores positivos para una

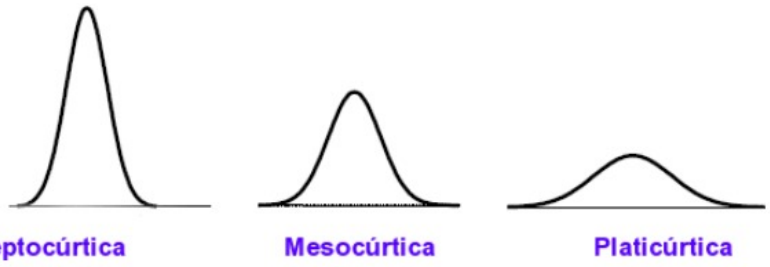


Figura 2-7: Diferentes curvas de distribución basadas en el coeficiente de curtosis.[**?**]

asimetría positiva (a la derecha) y negativos para una asimetría negativa (a la izquierda).

b) **Coeficiente de asimetría de Pearson (CA_P):** Mide la diferencia entre la media $\bar{x}$ y la moda M_o respecto a la dispersión del conjunto, ver *ecuación* 2-16:

$$CA_P = \frac{\bar{x} - M_o(x)}{s} \tag{2-16}$$

Su interpretación es similar a la del coeficiente de Fisher, siendo nulo para una distribución simétrica (en ese caso media y moda coinciden) y tanto más positivo, o negativo, cuando más sesgada esté la distribución hacia la derecha, o hacia la izquierda.

2. **Coeficiente de curtosis (K):** Indica el grado de apuntamiento de una distribución, al compararse con una distribución normal con la misma media y varianza [**?**], de forma tal que si da como resultado un mayor apuntamiento ($K > 3$) significará una concentración mayor de valores en torno a la media en comparación a la campana de gauss (leptocúrtica), si por el contrario, el coeficiente da como resultado un bajo apuntamiento ($K < 3$), significará que los valores están más dispersos y hay menor concentración en torno a la media en comparación a la distribución normal (platicúrtica) y por ende esta medida de tendencia central será menos representativa. Si el valor del coeficiente de apuntamiento da un valor central ($K = 3$), significará que habrá una concentración en torno a la media similar a la campana de gauss (mesocúrtica), ver *figura* **2-7**. [**?**].

   Para hallar este coeficiente se puede utilizar la *ecuación* 2-17.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4 * f_i}{s^4 N} \tag{2-17}$$

Los coeficientes de asimetría y curtosis se pueden utilizar para definir el tipo de distribución de una base de datos en particular. Los tipos de distribución en función a los coeficientes de asimetría y curtosis están conglomerados en la *tabla* **2-4**. [**?**]

Tipo de distribución	**Curva de distribución**	**Asimetría (A_s)**	**Curtosis (K)**
I	Normal	$-0{,}4 < A_s < 0{,}4$	$-0{,}8 < K < 0{,}8$
II	Casi normal con cola positiva	$A_s \geq 0{,}4$	$K \leq -0{,}8$
III	Pico estrecho con cola positiva	$A_s \geq 0{,}4$	$K \geq 0{,}8$
IV	Casi normal con cola negativa	$A_s \leq -0{,}4$	$-0{,}8 < K < 0{,}8$
V	Pico estrecho con cola negativa	$A_s \leq -0{,}4$	$K \geq 0{,}8$
VI	Bimodal, simétrica con pico plano	$-0{,}4 < A_s < 0{,}4$	$K \leq -0{,}8$

Tabla 2-4: Clasificación de las curvas de distribución en función de los coeficientes de asimetría y curtosis.[?], [?]

Según [?], los tipos de distribución más adecuados para los sistemas de conversión de energía solar, en orden descendente, son los siguientes: $V > IV > I > VI > II$ y III.

2.5. Contaminación atmosférica

Es la presencia en el aire de materias o formas de energía en concentraciones elevadas sobre su nivel ambiental normal como para que impliquen un riesgo a los seres humanos, los animales, la vegetación, entre otros [?]. Dicho de otra manera, es el mayor riesgo ambiental en términos de salud, afectación de los ecosistemas y uso de la energía solar fotovoltaica. Por esta razón Colombia ha venido generando diferentes marcos normativos y políticas en la prevención y control de la contaminación del aire, *ver* [?].

2.5.1. Fuentes de contaminación atmosférica

Las contaminantes pueden ser naturales o artificiales estas pueden presentarse sólidas, líquidas y gaseosas:

1. **Natural:** Comprende las debidas a la actividad biológica de la biosfera, a la actividad geológica de la tierra (erupciones volcánicas fundamentalmente) y a otros procesos naturales como impactos de meteoritos, incendios forestales de origen natural, entre otros.

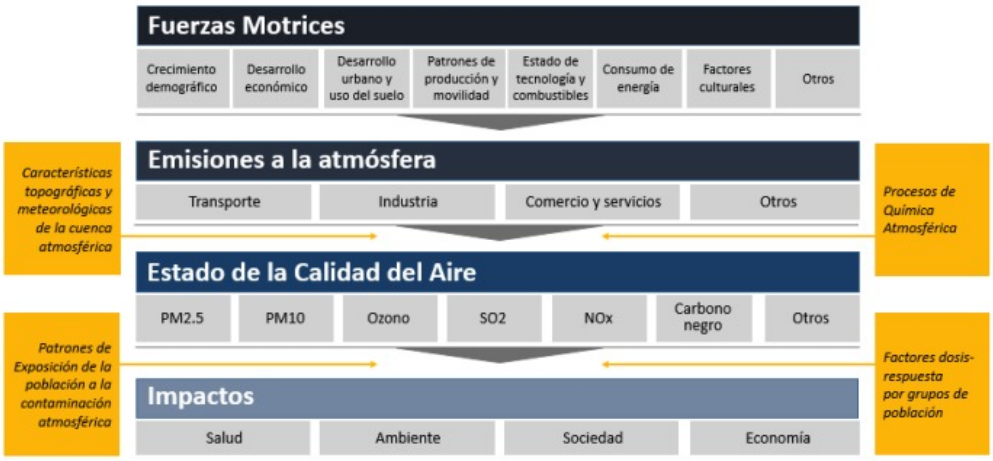


Figura 2-8: Diferentes factores que influyen en la calidad del aire.[**?**]

2. **Antrópica:** Son las que se originan como consecuencia de la actividad humana, debido a la industrialización, urbanización e intensificación de las actividades de transporte motorizado. Según Clean Air Institute "los problemas de calidad de aire son el resultado de las interacciones y sinergias entre fuerzas motrices o estructurales interrelacionadas", En la *figura* **2-8**, la conjunción de las diferentes fuerzas motrices da como resultado la emisión de agentes contaminantes provenientes principalmente del transporte, industria, servicios, hogares, entre otros. A su vez, los contaminantes liberados al aire están sujetos a procesos de dispersión, transporte, transformación y remoción de la atmósfera bajo la influencia de las características del terreno, las condiciones atmosféricas (dirección e intensidad de viento, humedad, precipitación pluvial, estabilidad de la atmósfera, intensidad de la radiación solar, entre otras); y diversos procesos químicos que ocurren en la atmósfera. Dependiendo de la concentración de contaminantes y los tiempos de exposición, el deterioro de la calidad del aire afecta a la salud y el ambiente (agua, agricultura, bosques y biodiversidad). [**?**]

2.5.2. Tipos de contaminantes atmosféricos

Pueden ser de dos tipos: primarios y secundarios.

2.5.2.1. Contaminantes primarios

Son los que se emiten directamente desde las fuentes y son responsables de la mayor parte de la contaminación, ver *tabla* **2-5**.

Tabla 2-5: Principales gases contaminantes primarios. [?]

CONTAMINANTES PRIMARIOS	
CONTAMINANTE	**DESCRIPCIÓN GENERAL**
MATERIAL PARTICULADO	Consiste en una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Varían de tamaño, las de tamaño mayor a 10 μm se llaman partículas sedimentables y precipitan pronto, las de menor tamaño se llaman partículas en suspensión debido a que pueden permanecer más tiempo en la atmósfera, son eliminadas por la lluvia.
COMPUESTOS DE AZUFRE	SO_2: Dióxido de azufre, es un gas incoloro, no inflamable, con olor picante e irritable. Se origina principalmente en la combustión de productos petrolíferos y la quema de carbón en centrales eléctricas y calefacciones centrales. Existen también algunas fuentes naturales, como es el caso de los volcanes.
	SO_3: Trióxido de azufre, se puede formar igual que el SO_2 es sólo un intermediario en la formación del ácido sulfúrico H_2SO_4.
	H_2SO_4: Ácido sulfúrico, es un líquido denso, aceitoso y muy corrosivo. Es el compuesto químico que más se produce en el mundo debido a sus amplias aplicaciones.
COMPUESTOS DE NITRÓGENO	N_2O: Óxido nitroso, es un gas volátil, incoloro, de olor dulce y de ligera toxicidad. Procede casi en su totalidad de la desnitrificación bacteriana y las combustiones.
	NO_2: Dióxido de nitrógeno, es un gas contaminante que resulta de la combustión efectuada a alta temperatura (antrópica y natural). Es tóxico e irritante.
	NO: Monóxido de nitrógeno, es incoloro, inodoro, no inflamable y tóxico que se oxida con rapidez convirtiéndose en NO_2.
COMPUESTOS DE CARBONO	CO: Monóxido de carbono, es un gas inoloro, incoloro, tóxico e inflamable. Es el contaminante más abundante, se origina en la quema de combustibles y biomasa.
	CO_2: Dióxido de carbono, es incoloro, inodoro, no tóxico se origina a partir de la combustión de combustibles fósiles y de biomasa, erupciones volcánicas e incendios forestales.

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

Tabla 2-5: Principales gases contaminantes primarios. [?]

CONTAMINANTES PRIMARIOS	
CONTAMINANTE	**DESCRIPCIÓN GENERAL**
HIDROCARBUROS	Son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. La mayoría son de origen natural como la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, produciendo metano CH_4. Los de origen antrópico se forman en arrozales, depuradoras, evaporación de disolventes orgánicos (pinturas, barnices, lacas).
COMPUESTOS HALOGENADOS	Son sustancias que contienen cloro y flúor, destacan: Cl_2 cloro diatómico (muy tóxico), HCl ácido clorhídrico (olor fuerte e irritante) $CFCs$ los clorofluorocarbonos y HF ácido fluorhídrico (gas incoloro y muy corrosivo). Se generan a partir de erupciones volcánicas, emisiones marinas, industrias químicas, aerosoles y automotores.
RADIACIONES IONIZANTES	Son una serie de partículas u ondas electromagnéticas que se caracterizan por producir cambios en la materia que atraviesan al ionizar los átomos que la forman. Son los rayos X, y γ (gamma) y las partículas α y β. Las más penetrantes, y por tanto, las más peligrosas son los rayos X (poder de penetración de decímetros) y gamma (metros).
METALES PESADOS	Son elementos químicos de masa atómica y densidad elevadas presentes en la atmósfera como partículas y en pequeñas concentraciones. Se consideran muy peligrosos, puesto que no se degradan ni química ni biológicamente (vida media de miles o millones de años), por lo que se acumulan en los seres vivos transfiriéndose a través de las cadenas alimentarias, entre los más nocivos destacan: Pb, Cd, Hg, Ar, Ni.

(Fin de tabla principales gases contaminantes primarios.)

2.5.2.2. Contaminantes secundarios

Son los que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y físicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera, distinguiéndose, sobre todo, la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio,

ver *tabla* **2-6**.

Tabla 2-6: Principales gases contaminantes secundarios. [**?**]

CONTAMINANTES SECUNDARIOS	
CONTAMINANTE	**DESCRIPCIÓN GENERAL**
ANHÍDRIDO SULFÚRICO SO_3 Y ÁCIDO SULFÚRICO H_2SO_4	El SO_3 formado a partir del SO_2, es un gas incoloro que participa en el smog clásico (corrosivo y peligroso para el aparato respiratorio), se condensa rápidamente reaccionando con el agua para formar el H_2SO_4 que es un contaminante secundario responsable de la lluvia ácida, junto con el HNO_3.
TRITÓXIDO DE NITRÓGENO NO_3	Procede de la oxidación del NO_2 por el ozono, juega un papel destacado en el smog fotoquímico u oxidante que irrita las vías respiratorias y daña a las plantas.
NITRATO DE PERO-XIACETILENO	Se forma a partir de los hidrocarburos mediante una reacción fotoquímica. Es una de las sustancias responsables del smog fotoquímico y como todas las otras sustancias contaminantes del smog fotoquímico es un oxidante (irrita las vías respiratorias y daña a las plantas).
OZONO TROPOSFÉRICO O_3	Es una gas azul pálido, irritante y picante. Se descompone fácilmente, lo que explica su poder oxidante. Se origina debido a la acción de la radiación UV sobre el O_2, sobre los diferentes NO_x e hidrocarburos.

(Fin de tabla principales gases contaminantes secundarios.)

2.5.3. Efectos en la salud debido a contaminantes atmosféricos

La organización mundial de la salud (OMS) considera la contaminación atmosférica como un importante riesgo medioambiental para la salud. Como se menciono anteriormente, se ha venido conociendo la complejidad de los mecanismos que generan la mezcla de contaminantes acumulados en las grandes ciudades que incluyen contaminantes primarios y secundarios. Además, las condiciones geográficas contribuyen a la acumulación de tóxicos como son las ciudades en alturas moderadas o altas, con más exposición a la luz UV, o bien lugares rodeados de montañas que dificultan la dispersión de los contaminantes, sobre todo en épocas soleadas, secas y sin vientos. [**?**]

En este sentido, la calidad del aire determina nuestra salud y esperanza de vida. La exposición a la contaminación atmosférica incrementa la posibilidad de enfermar

(morbilidad) o de morir (mortalidad) por enfermedades respiratorias o cardiovasculares, ver *tabla* **2-7**.

Tabla 2-7: Efectos en la salud de los principales gases contaminantes atmosféricos. [**?**]

PRINCIPALES CONTAMINANTES Y SU EFECTO EN LA SALUD	
CONTAMINANTE	**DAÑOS A LA SALUD Y MECANISMO**
MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE (PM_{10}, FINO $PM_{2,5}$)	Las PM_{10} irritan y bloquean las vías bronquiales, generando una amplia gama de enfermedades respiratorias.
	Las $PM_{2,5}$ son especialmente nocivas para la salud pues logran penetrar hasta las partes más profundas del sistema respiratorio aumentando los factores de coagulación de la sanggre, aumentando o agravando enfermedades isquémicas del corazón.
MONÓXIDO DE CARBONO CO	La exposición prolongada se asocia a dolor de cabeza, impedimento visual, reducción de la capacidad cognitiva y habilidad. 1. Se une a la hemoglobina interfiriendo con el transporte de oxígeno. Puede causar muerte por asfixia. 2. Bajo peso al nacer, incremento de muerte perinatal.
DIÓXIDO DE NITRÓGENO NO_2	1. Irritante para mucosas de ojos, nariz, garganta y vía respiratoria. 2. Incrementa la reactividad bronquial. La exposición por largo tiempo incrementa la susceptibilidad a infecciones, hospitalizaciones y muertes.
DIÓXIDO DE AZUFRE SO_2	Forma lluvia ácida al combinarse con agua. Los altos contenidos de este compuesto se relacionan con problemas del sistema respiratorio como tos, mucosidades, bronquitis crónica y asma. Se asocia con disminución de la función pulmonar. Incremento en la mortalidad, exacerbación de enfermedades cardíacas y pulmonares.
COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COVs)	Genera irritación ocular y de mucosas. Algunos son clasificados como carcinógenos 1.3 butadieno, benceno, estireno.

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

Tabla 2-7: Efectos en la salud de los principales gases contaminantes atmosféricos. [**?**]

PRINCIPALES CONTAMINANTES Y SU EFECTO EN LA SALUD	
CONTAMINANTE	**DAÑOS A LA SALUD Y MECANISMO**
OZONO	1. Genera estrés oxidativo e inflamación aguda y crónica en vías respiratorias y mucosas, impacto en vasos sanguíneos, inflamación y alteración del control autonómico cardiovascular y de funciones cognitivas. 2. La exposición aguda está asociada con exacerbación de enfermedades crónicas, muertes prematuras, reducción en la función pulmonar. 3. La exposición crónica con reducción en el crecimiento en función pulmonar en niños, mortalidad respiratoria, mayor gravedad de asma.

(Fin de tabla efectos en la salud de los principales contaminantes atmosféricos.)

Según la OMS el 99 % de la población mundial respira un aire que supera los límites de calidad recomendados por la OMS y pone en riesgo la salud pública, además, en todo el mundo, cerca de 7 millones de muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire en 2016. Alrededor del 88 % de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios. Esto quiere decir, que la contaminación atmosférica no sólo se relaciona con enfermedades mortales, sino también con menor índice de salud y disminución de la calidad de vida.

2.5.4. Efectos en los ecosistemas y bienes debido a contaminantes atmosféricos

La contaminación atmosférica no solo afecta a la salud humana, también supone un riesgo para la conservación de la biodiversidad, alterando la función y estructura de los ecosistemas; teniendo un gran impacto en el proceso de evolución de las plantas al evitar la fotosíntesis en muchos casos, con graves consecuencias en la purificación del aire. Además la acumulación de los gases (anteriormente descritos) en la atmósfera, pueden generar problemas ambientales como: lluvia ácida, agotamiento de la capa de ozono, calentamiento global, efecto invernadero, el smog fotoquímico, entre otros. En la *tabla* **2-8** se pueden observar los diferentes efectos en los ecosistemas debido a los principales contaminantes atmosféricos.

Tabla 2-8: Efectos en los ecosistemas y bienes debido a los diferentes gases contaminantes. [**?**]

EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS DEBIDO A LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES		
CONTAMINANTE	**EFECTOS SOBRE ECOSISTEMAS**	**EFECTOS SOBRE BIENES**
DIÓXIDO DE AZUFRE SO_2	Efectos sobre la biodiversidad, los suelos y los ecosistemas acuáticos y forestales (daños a la vegetación, degradación de la clorofila, reducción de la fotosíntesis y pérdida de especies).	Afecciones a las edificaciones a través de procesos de acidificación.
ÓXIDOS DE NITRÓGENO NO_x	1. Acidificación y eutrofización de ecosistemas. 2. Limitación del crecimiento vegetal.	Afecciones a las edificaciones a través de procesos de acidificación.
OZONO TROPOSFÉRICO O_3	1. Reducción de la producción o calidad de cosechas. 2. Reducción de la absorción de CO_2 por las plantas. 3. Disminución en la tasa de crecimiento de los árboles y una menor capacidad de respuesta frente a otros factores de estrés como la sequía y altas temperaturas.	-
PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN PM_{10} **Y** $PM_{2,5}$	Las partículas ultra-finas pueden afectar el crecimiento vegetal, y a la fauna de modo similar a los humanos.	Daños en las edificaciones.
METALES PESADOS	Pueden depositarse en suelos y aguas y acumularse en ellos (en consecuencia, en las cadenas alimenticias), con una elevada persistencia. Son tóxicos para la vida acuática.	-

(Continúa en la página siguiente)

(Viene de la página anterior)

Tabla 2-8: Efectos en los ecosistemas y bienes debido a los diferentes gases contaminantes. [**?**]

EFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS DEBIDO A LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES		
CONTAMINANTE	**EFECTOS SOBRE ECOSISTEMAS**	**EFECTOS SOBRE BIENES**
BENCENO	1. Tóxico para los organismos acuáticos y en especial, sobre los invertebrados, en los que puede producir cambios genéticos. 2. Afecciones a la vegetación o cultivos.	-
AMONIACO NH_3	1. Acidificación del medio terrestre y acuático. 2. Pérdida de biodiversidad de ecosistemas.	-

(Fin de tabla)

2.5.5. Efectos negativos en la producción de energía renovable debido a contaminantes atmosféricos

Según *Advances in Atmospheric Sciences* señala que la contaminación del aire en la producción de energía fotovoltaica tiene un efecto negativo. Ya que los diferentes gases que contaminan la atmósfera absorben y dispersan la radiación proveniente del sol, viéndose reflejado en la intensidad de radiación que llega a la superficie terrestre; esto quiere decir, que la radiación solar que llega a la superficie de la tierra depende entre otras cosas de que tan limpia esté la atmósfera. Además, concluyeron que la relación entre la radiación dispersa y la radiación global aumenta con el aumento de los niveles de contaminación.

2.6. Beneficios de tener una atmósfera limpia

1. La reducción de los contaminantes atmosféricos impacta positivamente en la salud de la población, mejorando su calidad de vida, sobre-vida y control de enfermedades crónicas.

2. Habrían consecuencias económicas favorables ya que se ahorraría en gastos médicos, se disminuiría la dosis de medicación que necesitan las personas con patologías respiratorias y cardiovasculares y se mejoraría la productividad.

3. El impacto ambiental que generaría tener una atmósfera limpia se vería en la disminución a la problemática ambiental generado por la lluvia ácida (combinación de SO_2 y NO_x con las precipitaciones) que compromete la calidad del agua o el agotamiento de la capa de ozono (filtro de la radiación UV) y la generación de ozono troposférico (nocivo para la salud) o el calentamiento global o efecto invernadero, entre otros.

4. Un mejor aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar, ya que la intensidad de radiación que llegaría a la superficie terrestre sin que existan contaminantes en la atmósfera seria mayor.

3 Aspectos Técnicos

En este capítulo se realizara el cálculo de la radiación solar extraterrestre, además de la adecuación de los datos de radiación solar terrestre suministrados por el IDEAM de la estación (IDEAM BOGOTA - AUT (21206960)), ubicada en el sector centro - oriente de Bogotá a una altura de 2,646 $msnm$, en el barrio Egipto, localidad La Candelaria, en la longitud $-74{,}07°$ y latitud $4{,}60°$, ver *figura* **3-1**.

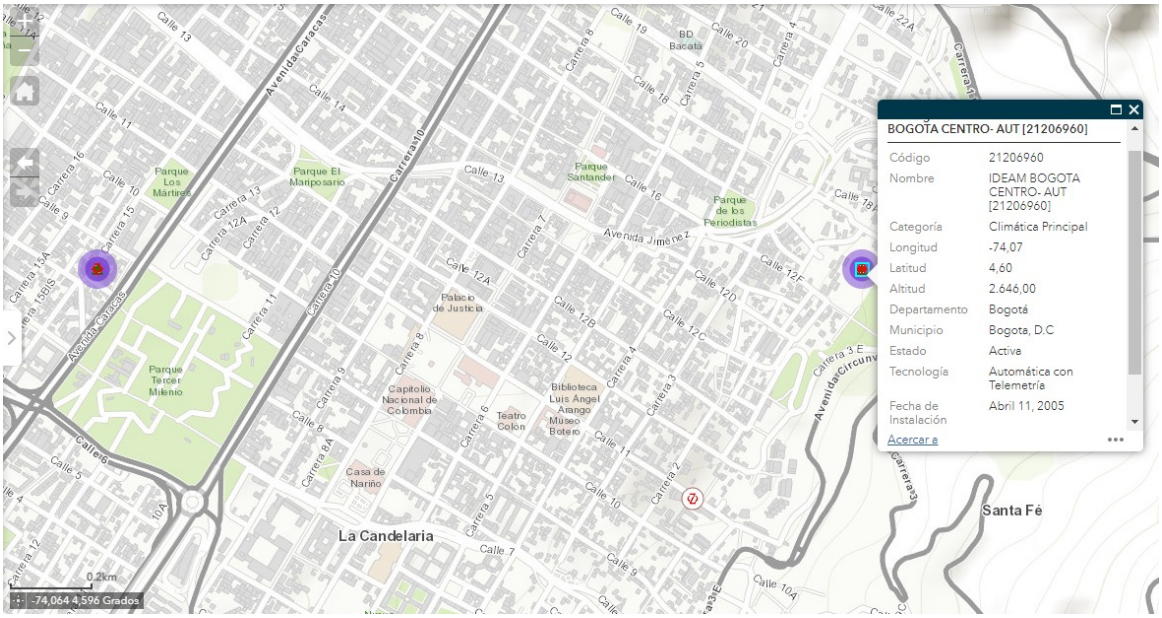


Figura 3-1: Ubicación de la estación IDEAM BOGOTÁ CENTRO con sus diferentes características.[**?**]

3.1. Cálculo de la radiación solar extraterrestre (H_o)

A partir de la *ecuación* 2-2 se calcula la radiación que incide en la parte superior de la atmósfera terrestre para la estación anteriormente mencionada. Esta ecuación depende de la latitud, declinación y el ángulo de salida del sol al amanecer, intrínsecamente esta cambia día a día. El valor promedio diario de H_o se muestra en la *figura* **3-2**.

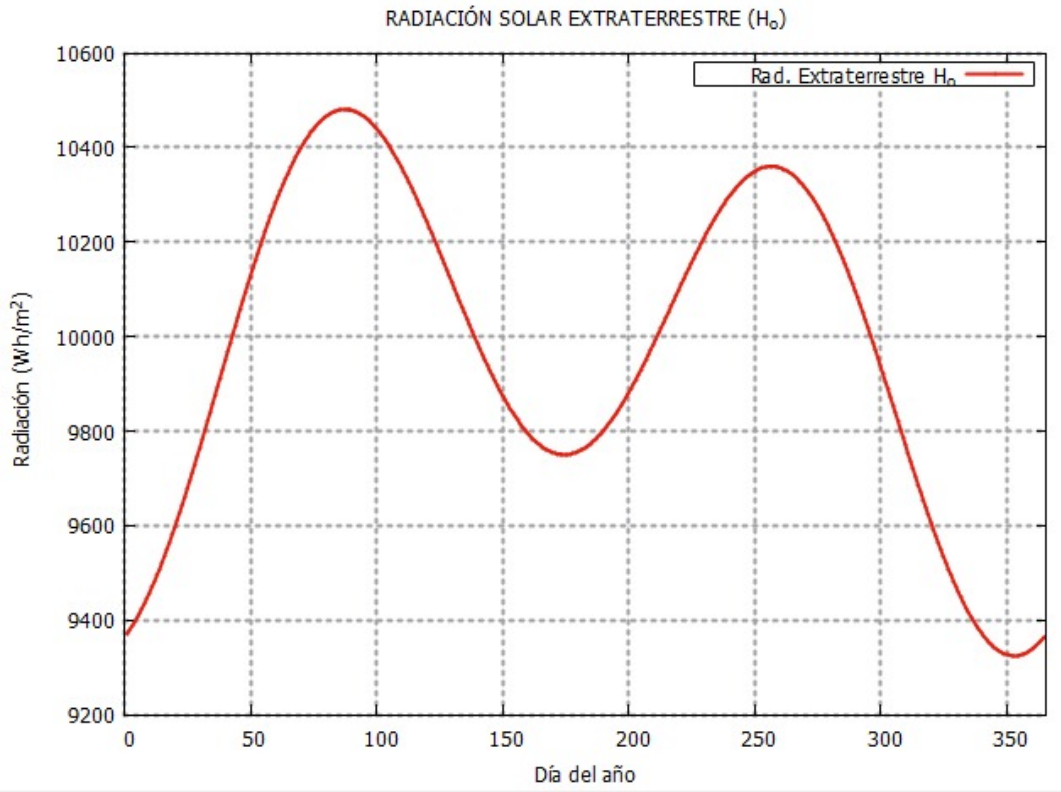


Figura 3-2: Variación de la radiación solar promedio hora diario extraterrestre con respecto al tiempo de la estación Ideam Bogotá - Centro.

El valor promedio de H_o para todo el año en la estación del ideam Bogotá - Centro es de 9972.41 Wh/m^2 y a partir de la *figura* **3-2** se evidencia que los valores de (H_o) no varían significativamente para los diferentes días del año.

3.2. Análisis de la radiación solar terrestre (H_G)

La entidad encargada como se mencionó anteriormente fue el IDEAM, esta proporcionó datos comprendidos entre el 01 de diciembre de 2013 hasta el 30 de septiembre de 2018 de radiación solar global hora a hora. Estas mediciones se realizaron a través del piranómetro CM11 de la empresa alemana ADOLF THIES GMBH & Co. en la *tabla* **3-1** se pueden observar algunas especificaciones tomadas de la página web de la empresa.

ESPECIFICACIONES PIRANÓMETRO CM11	
Rango de medición	0 - 4000 W/m^2
Sensibilidad	7 - 14 μ VW
Tipo de señal de entrada	0 - 15 mV
Rango espectral	310 - 2800 nm
No linealidad	100 - 1000 W/m^2
Resistencia interna	10 - 100
Tiempo de respuesta	1.7 s a 63 % y 2 s a 95 %
Tipo de sensor	Termo-elemento con 32 elementos individuales
Temperatura ambiente	-40 $C°$ a 80 $C°$
Conexión eléctrica	Plug con 10 m de cable
Dimensiones	150 mm x 92 mm
Masa	0.9 kg

Tabla 3-1: Especificaciones técnicas del piranómetro CM11. [**?**]

Las mediciones de radiación solar global proporcionadas por la estación IDEAM - BOGOTÁ son hora a hora, por lo cual se realizó la sumatoria de las 24 horas de cada día para así obtener el promedio hora diario que correspondería justamente a H_G. En total se examinaron 41.220 datos, donde se eliminó aquellos días en los cuales no se registrará el dato de las principales horas donde se recibe mayor radiación solar.

En la *figura* **3-3** se evidencia el comportamiento de la (H_G) para el mes de diciembre de 2013 con un valor de radiación promedio de 3318.033 Wh/m^2, en la *figura* **3-4** se evidencia para el año 2014 con un valor de radiación promedio de 3776.177 Wh/m^2, en la *figura* **3-5** se evidencia para el año 2015 con un valor de radiación promedio de 3819.949 Wh/m^2, en la *figura* **3-6** se evidencia para el año 2016 con un valor de radiación promedio de 3759.952 Wh/m^2, en la *figura* **3-7** se evidencia para el año 2017 con un valor de radiación promedio de 3581.524 Wh/m^2 y por último en la *figura* **3-8** se evidencia el comportamiento de la (H_G) desde el 01 de enero hasta el 30 de septiembre del 2018.

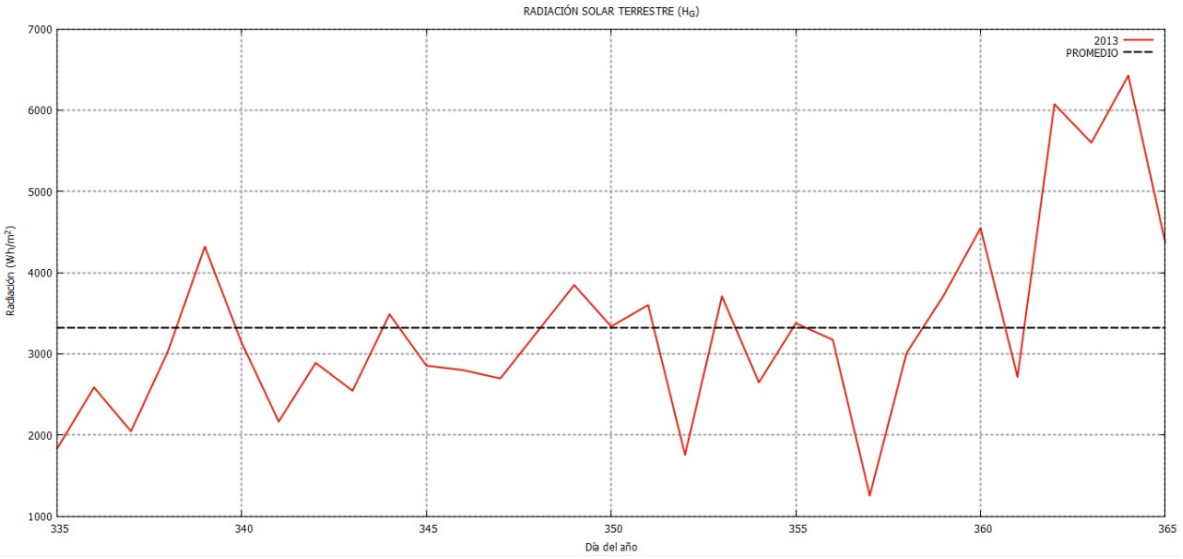


Figura 3-3: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del mes de Diciembre del año 2013.

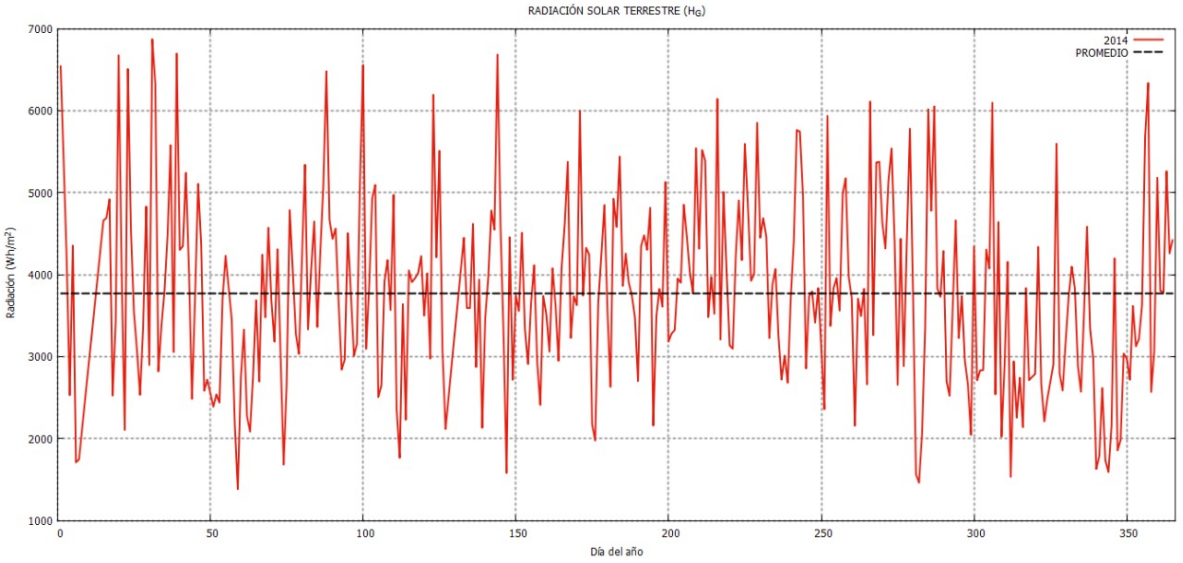


Figura 3-4: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del año 2014.

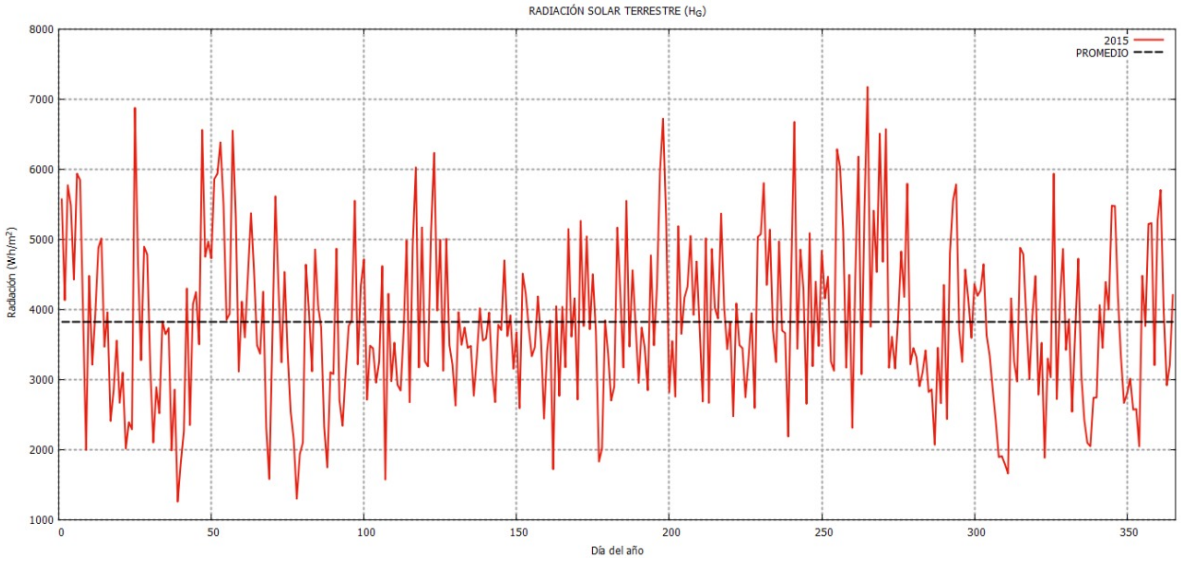


Figura 3-5: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del año 2015.

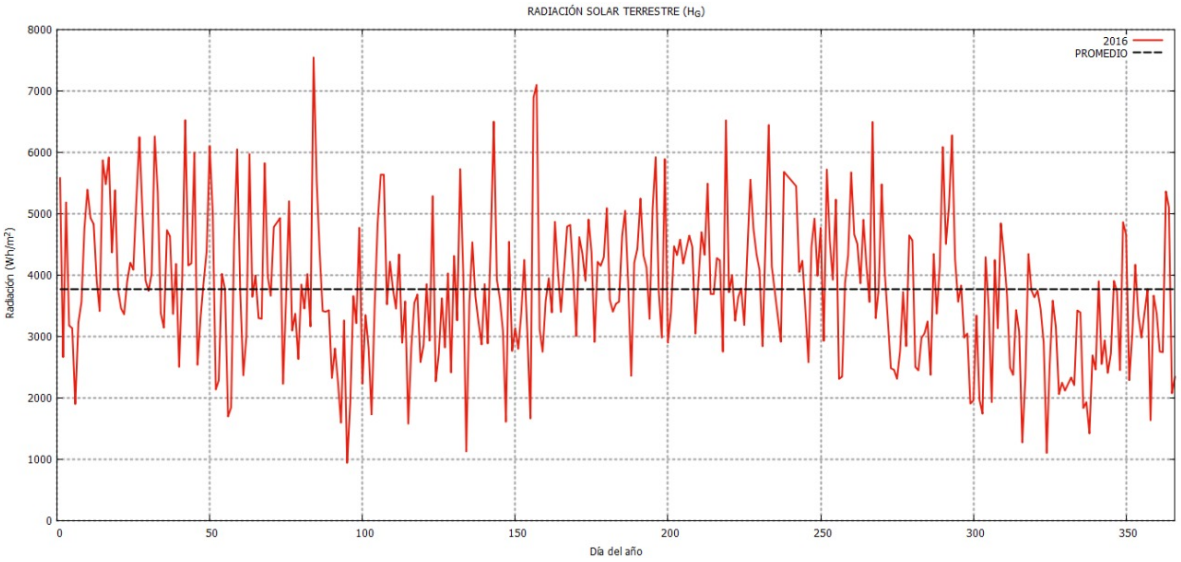


Figura 3-6: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del año 2016.

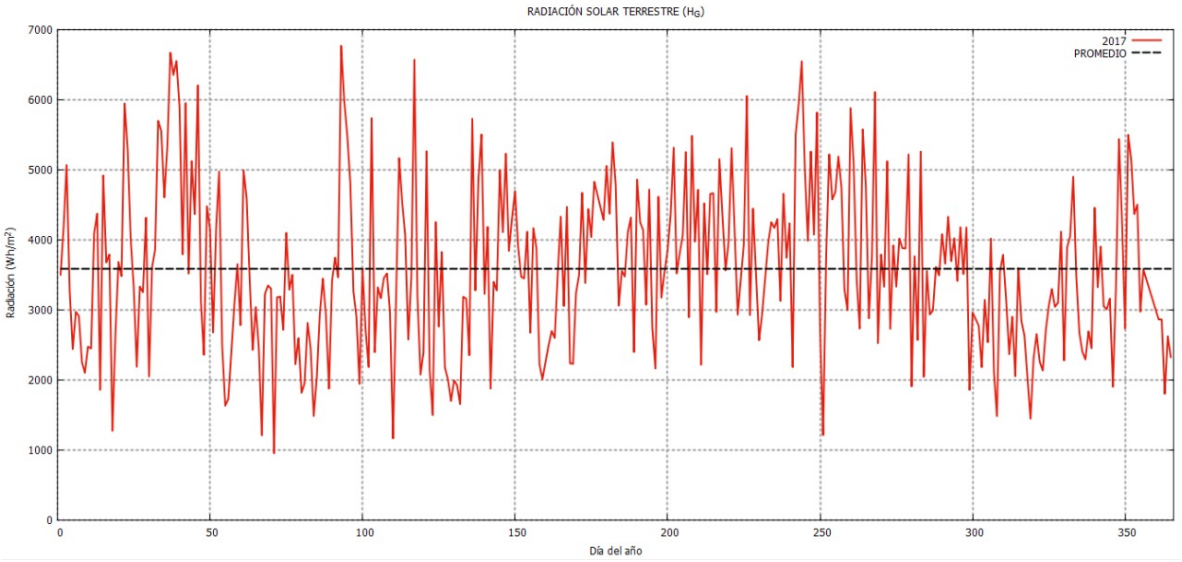


Figura 3-7: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del año 2017.

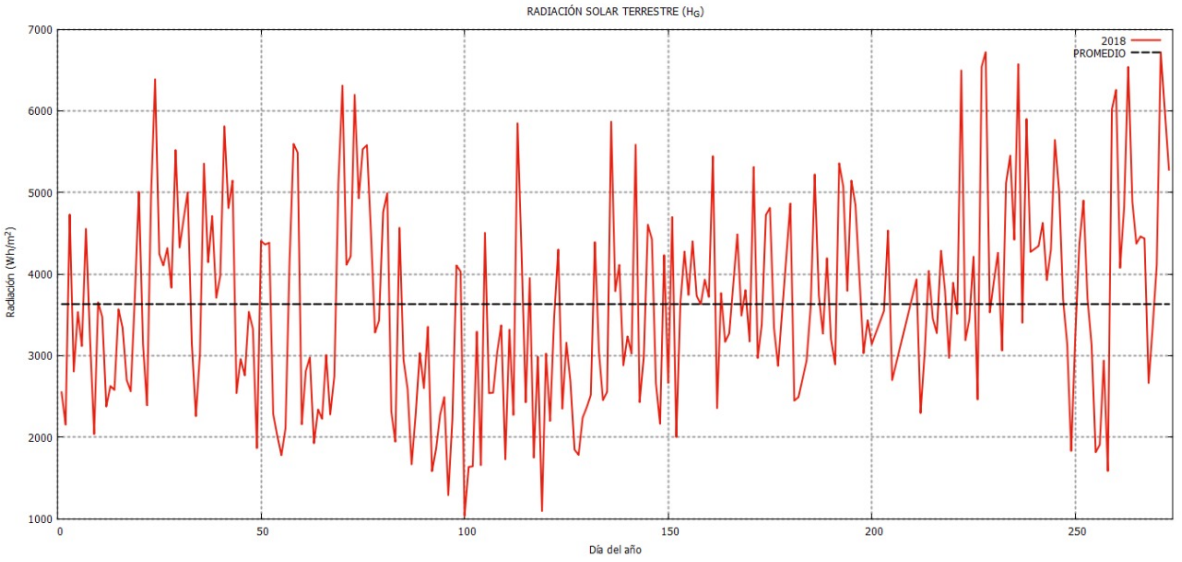


Figura 3-8: Variación de la radiación solar promedio hora diario terrestre con respecto a los días del año 2018.

3.3. Cálculo del índice de claridad atmosférica (K_T)

Luego de obtener los valores de H_o y H_G en los diferentes años de estudio para la estación del IDEAM indicada anteriormente, a partir de la *ecuación* 2-6 se calculó el

índice de claridad diario y posteriormente se realizó el promedio mensual de cada uno de los años como se observa en la *figura* **3-9**, finalmente se realizó el promedio anual para cada uno de los años, como se observa en la *figura* **3-10**, con la finalidad de brindar una perspectiva comparativa de los cambios año a año.

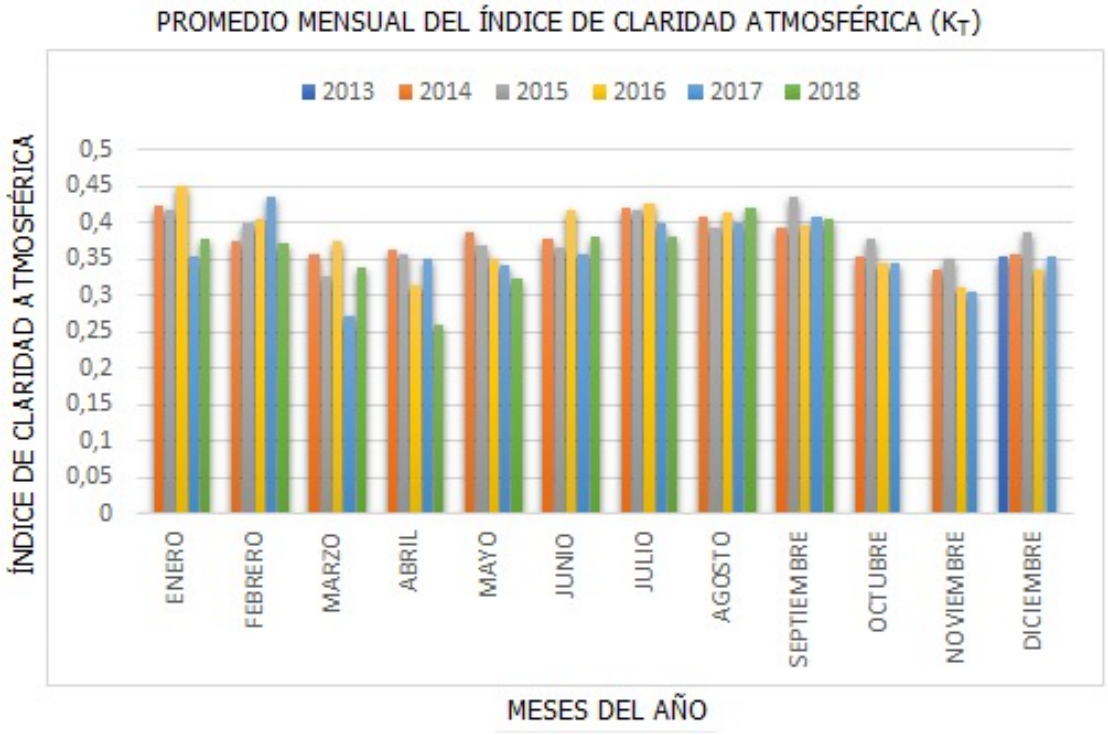


Figura 3-9: Promedio mensual del índice de claridad atmosférica para el periodo de años 2013 al 2018.

A partir de la *figura* **3-9** se observa que el mes con mayor valor de K_T es enero de 2016 con un valor de 0.45, comparándolo con la escala de Iqbal en la *tabla* **2-3** correspondería a un mes con días parcialmente nublados; además se puede observar que el mes con menor valor de K_T fue abril de 2018 con un valor de 0.26 lo que correspondería según la escala de Iqbal que es un mes con días nublados.

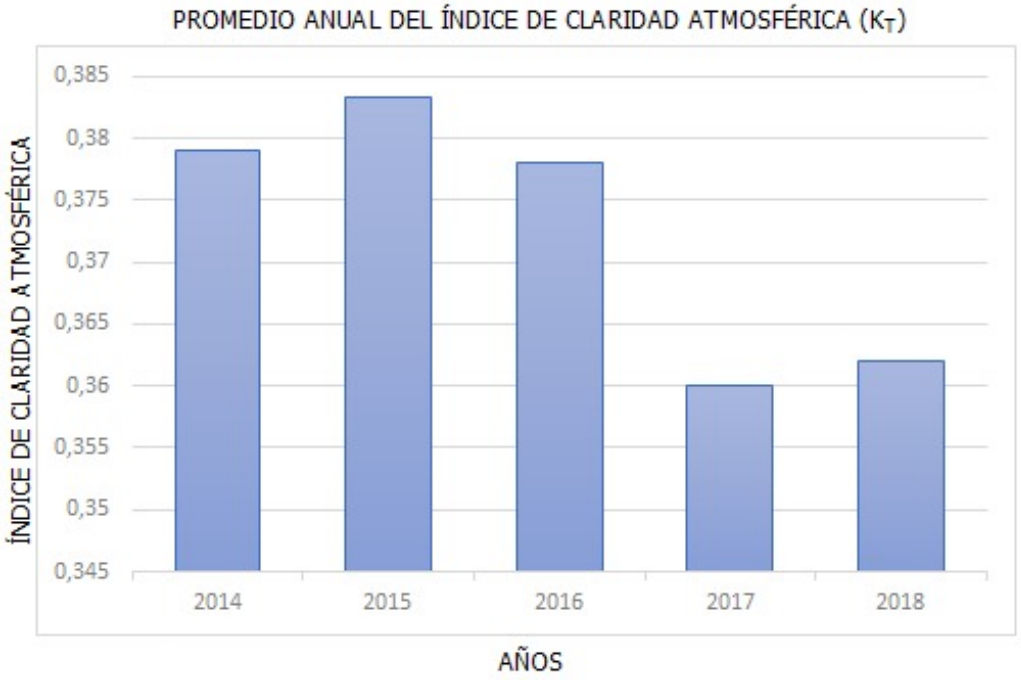


Figura 3-10: Promedio anual del índice de claridad atmosférica para el periodo de años 2014 al 2018.

En la *figura* **3-10**, se observa el promedio anual de K_T, para el año 2013 cabe recordar que solo contiene el mes de diciembre por lo cual se descarta y el año 2018 se realiza el promedio hasta septiembre, en este sentido, el año con mayor valor de K_T es el 2015 con un valor de 0.38 y el menor es el año 2017 con un valor de 0.36. Lo que hace que todos los años entren en la categoría según Iqbal de días parcialmente nublados.

3.4. Análisis estadístico - descriptivo

Badescu [**?**, **?**], propone que se puede realizar el análisis de la radiación solar mediante el tratamiento estadístico - descriptivo del índice de claridad atmosférica a través de las medidas de forma (coeficiente de asimetría y de curtosis), las cuales son utilizadas en el modelo de Badescu ver *tabla* **2-4**. Se realizó el correspondiente estudio estadístico - descriptivo de los valores de K_T promedio diario calculados en el apartado anterior para cada uno de los años, se descarto el año 2013 ya que solo contaba con el mes de diciembre y se incluyo el año 2018 ya que contaba con el 75 % de los datos del año.

3.4.1. Coeficiente de asimetría y curtosis

Para calcular el coeficiente de asimetría y curtosis se tomó los valores de K_T promedio diario para cada años con la finalidad de obtener el histograma y polígono de frecuencias. Se calculó la media, mediana y moda para datos agrupados a través de las *ecuaciones* 2-8,2-9,2-10 respectivamente. Además la desviación estándar a través de la *ecuación* 2-13 y por último el coeficiente de asimetría y curtosis a través de las *ecuaciones* 2-16, 2-17.

1. **AÑO 2014:** En la *figura* **3-11**, se observa el histograma y polígono de frecuencia y en la *tabla* **3-2** las medidas descriptivas; donde se evidencia una asimetría negativa con un A_S de $-0{,}075$ y una curva de tipo platicúrtica con un K de 2,894 que ajustado a la escala de Badescu sería de $-0{,}106$. En este caso comparándolo con la *tabla* **2-4**, seria una curva de distribución tipo I lo que correspondería a una curva normal.

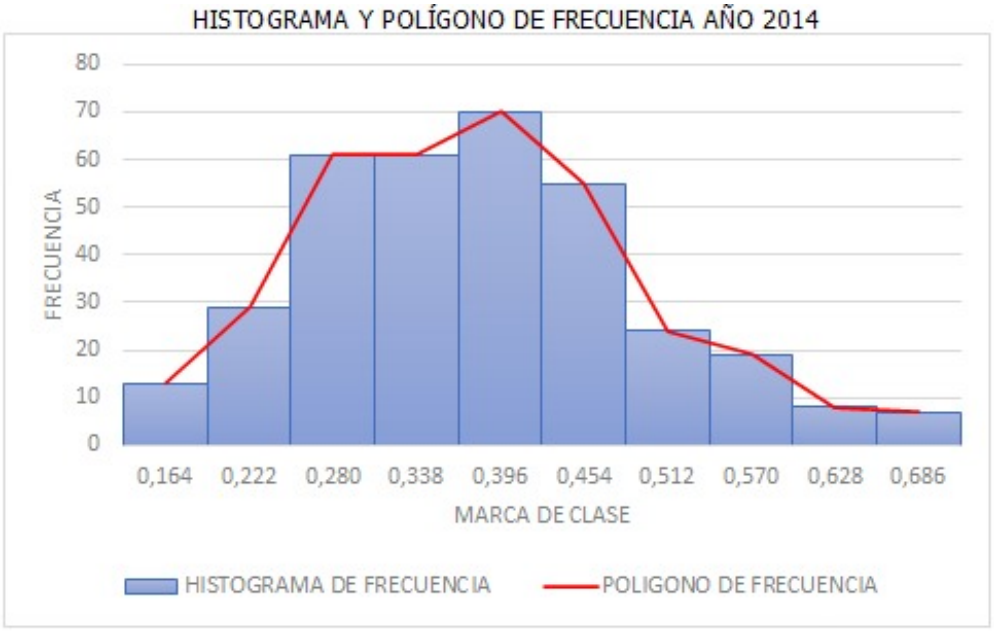


Figura 3-11: Histograma y polígono de frecuencia para el año 2014 de K_T promedio diario.

Medidas descriptivas año 2014	
Media ($\bar{x}$)	0.380
Mediana (M_e)	0.375
Moda (M_o)	0.389
Desviación estándar (s)	0.115
Asimetría (A_S)	-0.075
Curtosis (K)	2.894

Tabla 3-2: Medidas descriptivas de K_T diario para el año 2014.

2. **AÑO 2015:** En la *figura* **3-12**, se observa el histograma y polígono de frecuencia y en la *tabla* **3-3** las medidas descriptivas; donde se evidencia una asimetría positiva con un A_S de 0,297 y una curva de tipo platicúrtica con un K de 2,648 que ajustado a la escala de Badescu sería de $-0{,}352$. En este caso comparándolo con la *tabla* **2-4**, seria una curva de distribución tipo I lo que correspondería a una curva normal.

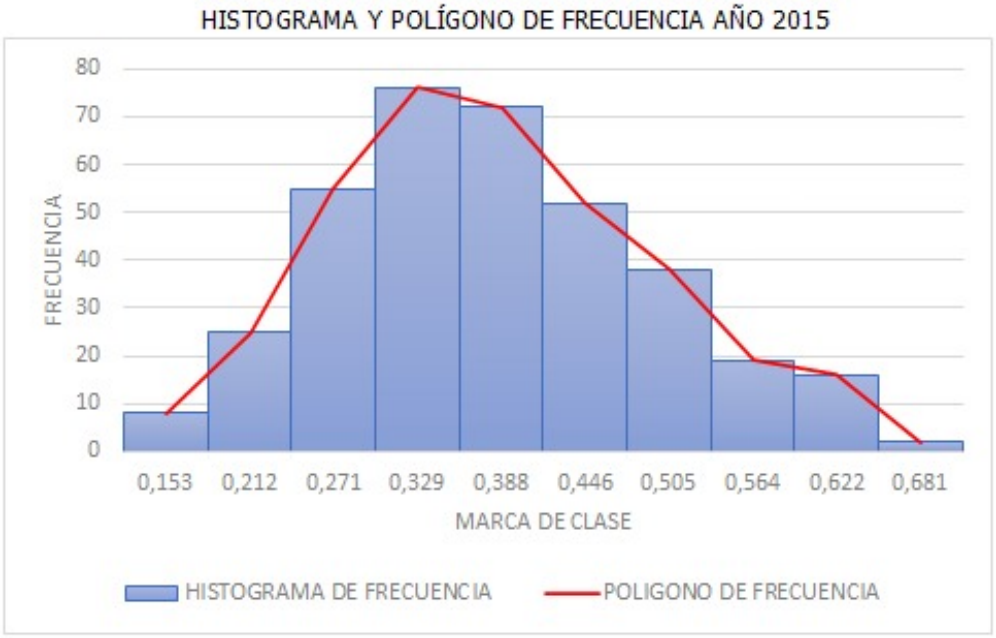


Figura 3-12: Histograma y polígono de frecuencia para el año 2015 de K_T promedio diario.

Medidas descriptivas año 2015	
Media ($\bar{x}$)	0.382
Mediana (M_e)	0.373
Moda (M_o)	0.349
Desviación estándar (s)	0.112
Asimetría (A_S)	0.297
Curtosis (K)	2.648

Tabla 3-3: Medidas descriptivas de K_T diario para el año 2015.

3. **AÑO 2016:** En la *figura* **3-13**, se observa el histograma y polígono de frecuencia y en la *tabla* **3-4** las medidas descriptivas; donde se evidencia una asimetría positiva con un A_S de 0,038 y una curva de tipo platicúrtica con un K de 2,849 que ajustado a la escala de Badescu sería de $-0{,}151$. En este caso comparándolo con la *tabla* **2-4**, seria una curva de distribución tipo I lo que correspondería a una curva normal.

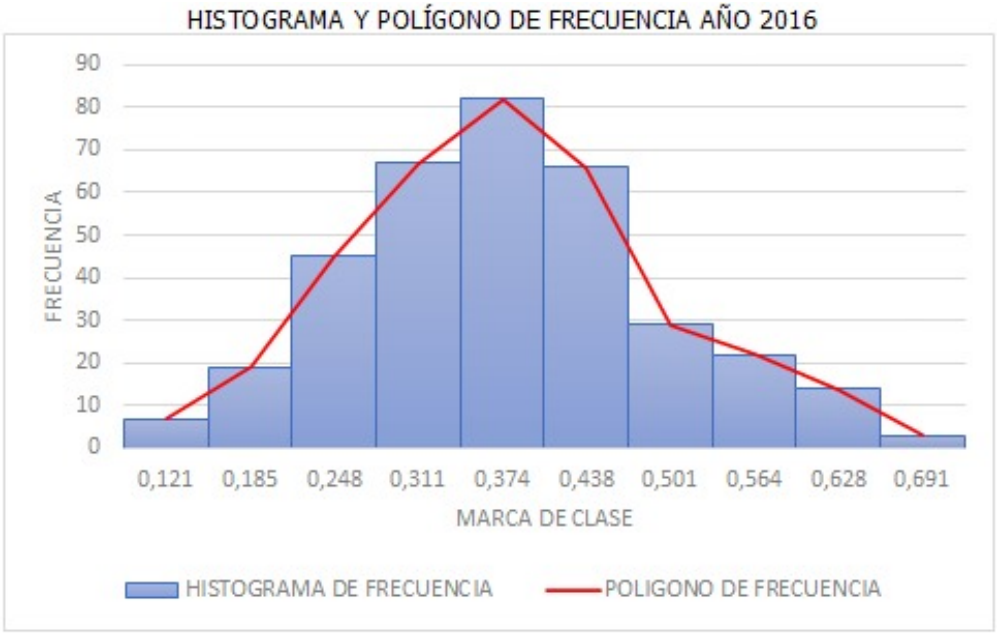


Figura 3-13: Histograma y polígono de frecuencia para el año 2016 de K_T promedio diario.

Medidas descriptivas año 2016	
Media ($\bar{x}$)	0.378
Mediana (M_e)	0.373
Moda (M_o)	0.373
Desviación estándar (s)	0.117
Asimetría (A_S)	0.038
Curtosis (K)	2.849

Tabla 3-4: Medidas descriptivas de K_T diario para el año 2016.

4. **AÑO 2017:** En la *figura* **3-14**, se observa el histograma y polígono de frecuencia y en la *tabla* **3-5** las medidas descriptivas; donde se evidencia una asimetría positiva con un A_S de 0,417 y una curva de tipo platicúrtica con un K de 2,556 que ajustado a la escala de Badescu sería de $-0{,}444$. En este caso comparándolo con la *tabla* **2-4**, seria una curva de distribución tipo II lo que correspondería a una curva casi normal con cola positiva.

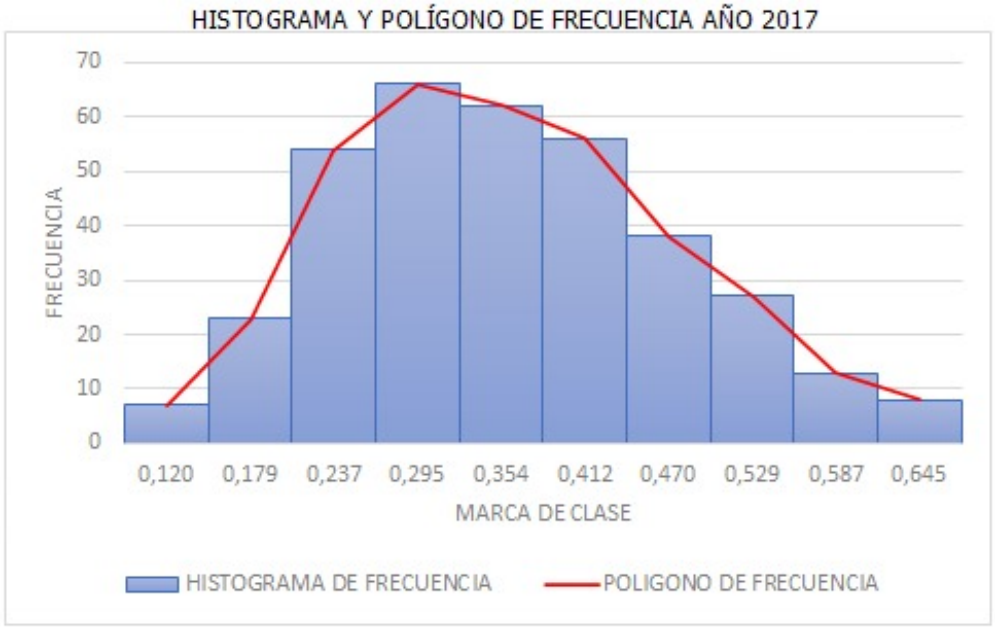


Figura 3-14: Histograma y polígono de frecue ncia para el año 2017 de K_T promedio diario.

Medidas descriptivas año 2017	
Media ($\bar{x}$)	0.359
Mediana (M_e)	0.350
Moda (M_o)	0.310
Desviación estándar (s)	0.118
Asimetría (A_S)	0.417
Curtosis (K)	2.556

Tabla 3-5: Medidas descriptivas de K_T diario para el año 2017.

5. **AÑO 2018:** En la *figura* **3-15**, se observa el histograma y polígono de frecuencia y en la *tabla* **3-6** las medidas descriptivas; donde se evidencia una asimetría positiva con un A_S de 0,341 y una curva de tipo platicúrtica con un K de 2,397 que ajustado a la escala de Badescu sería de $-0{,}603$. En este caso comparándolo con la *tabla* **2-4**, seria una curva de distribución tipo I lo que correspondería a una curva normal.

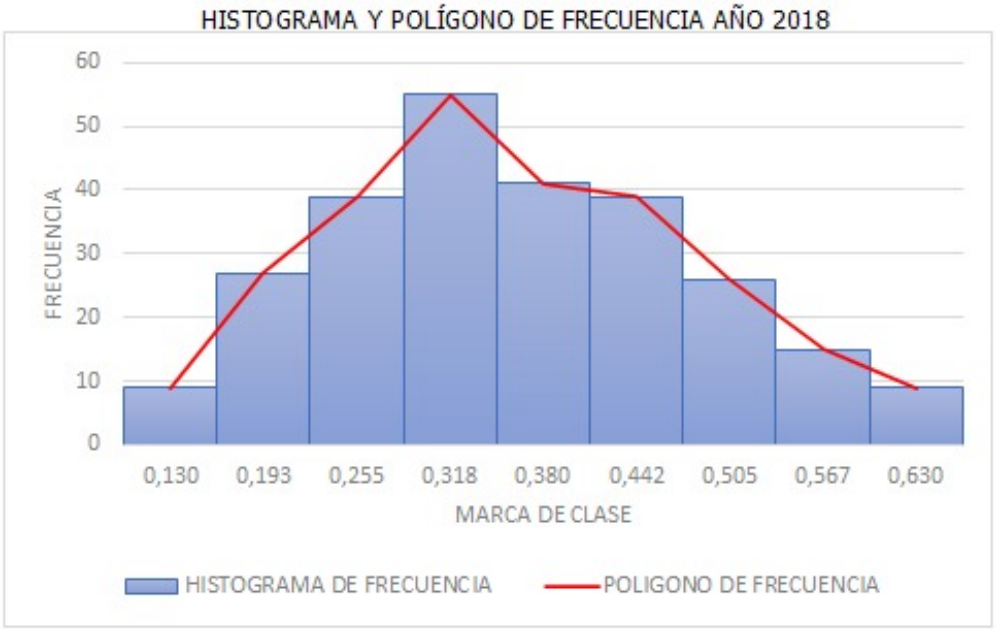


Figura 3-15: Histograma y polígono de frecuencia para el año 2018 de K_T promedio diario.

Medidas descriptivas año 2018	
Media ($\bar{x}$)	0.361
Mediana (M_e)	0.349
Moda (M_o)	0.320
Desviación estándar (s)	0.122
Asimetría (A_S)	0.341
Curtosis (K)	2.397

Tabla 3-6: Medidas descriptivas de K_T diario para el año 2018.

4 Conclusiones

Se realizó el cálculo de la radiación solar extraterrestre (H_o) para la estación IDEAM BOGOTA - CENTRO, ver *figura* **3-2**, evidenciando a partir de la *ecuación* 2-2 que depende principalmente de la declinación solar, el ángulo horario y la latitud. También se realizó el análisis para los datos proporcionados por el IDEAM correspondientes a la radiación solar terrestre (H_G) como se evidencia en las *figuras* **3-3**, **3-4**, **3-5**, **3-6**, **3-7** y **3-8**.

Se calculó el índice de claridad atmosférica diario y se realizó el promedio mensual para cada uno de los años como se observa en la *figura* **3-9**; donde se evidencia que los picos más altos de K_T corresponden justamente a las dos temporadas secas en Bogotá: enero, febrero y julio, agosto, mientras que los valores más bajos de K_T corresponden a las dos temporadas de lluvia: desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre. En la *figura* **3-10** se realizó el promedio anual del K_T donde se evidencia que todos los años en estudio entran en la categoría según Iqbal (ver *tabla* **2-3**) de días parcialmente nublados.

Se realizó el análisis estadístico - descriptivo para el periodo de años entre 2014 y 2018 del K_T diario, encontrando las medidas descriptivas con la finalidad de compararlo con la escala propuesta por Badescu. Para el año 2014 se halló una asimetría negativa es decir a la izquierda (ver *figura* **3-11**) y una curtosis negativa lo que indicaría una distribución platicúrtica queriendo decir una baja concentración en torno a la media de K_T, implicando una tendencia a la variabilidad de las propiedades ópticas de la atmósfera. Para el periodo de años del 2015 al 2018 se tiene asimetría positiva es decir a la derecha (ver *figuras* **3-12**, **3-13**, **3-14** y **3-15**) y curtosis negativa que correspondería igualmente a una tendencia en la variabilidad de las propiedades ópticas de la atmósfera.

Por último, comparando la escala de Badescu con las distribuciones de K_T diario para cada uno de los años se tiene que: los años 2014, 2015, 2016 y 2018 corresponden a una distribución tipo I es decir normal y el año 2017 corresponde a una distribución de tipo II es decir casi normal con cola positiva. Lo que generaría que en la estación de estudio y sus alrededores no sea un lugar apto para implementar sistemas fotovoltaicos a gran escala, debido a que los tipos de distribución más adecuados para los sistemas

de conversión de energía son el V y IV.