ATLAS
DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

upme Unidad de Planeación Minero Energética

Juan Manuel Santos Calderón
Presidente de la Republica de Colombia

Luis Gilberto Murillo
Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Carlos Alberto Botero López
Viceministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Omar Franco Torres
Director General
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

José Franklyn Ruiz Murcia
Subdirector de Meteorología (E) - IDEAM

German Arce Zapata
Ministro de Minas y Energía

Rutty Paola Ortiz Jara
Viceministro de Energía

Ricardo Humberto Ramirez Carrero
Director General (E)
Unidad de Planeación Minero Energética – UPME

AUTORES

HENRY OSWALDO BENAVIDES BALLESTEROS
Subdirección de Meteorología del IDEAM

OVIDIO SIMBAQUEVA FONSECA
Fundación Universitaria Los Libertadores

HENRY JOSUÉ ZAPATA LESMES
Subdirección de Energía Electrica de la UPME

ISSN: 978 958 8067 94 0

Diseño y digramación
Imprenta Nacional de Colombia
www.imprenta.gov.co

Bogotá, D. C., Colombia 2017

APOYO TÉCNICO

IDEAM
Olga Cecilia González, Subdirección de Meteorología
Carlos Enrique Rocha, Subdirección de Meteorología
Sandra Milena Herrera Aponte, Subdirección de Meteorología
Leonardo Ayala Poveda, contratista Subdirección de Meteorología
Esteban González Montt, contratista Subdirección de Meteorología
Uriel Dionicio Sepú lveda Plazas, contratista Subdirección de Meteorología
Jairo Andrés Garzón Hernández, Coordinador Grupo de Automatización
Camilo Leyva, Grupo de Automatización
Everth Mejía Camacho, Grupo de Automatización
Geizmar Moreno Riveros, Grupo de Automatización
Alfredo Pardo Riaño, Grupo de Automatización
Manuel Felipe Rodríguez, Grupo de Automatización
Carlos Andrés Triana Cano, Grupo de Automatización
Jaime Andrés Villareal Rojas, Grupo de Automatización
Funcionarios del Grupo de Meteorología Aeronáutica

Evaluadores de Información
Ángela Amaya González
Magda Janeth Benavides Ballesteros
Ingrid Mireya Correa Aguilera
José David Garavito Mahecha
Elena del Pilar Gómez Barahona
Martha Yamile Jiménez Cadavid
Yenith Patricia Mariño Rivera
Lina María Molano Garay
Erica Liliana Molina Lara
Yury Viviana Morales Lopez
Leidy Edith Mosquera Nova
Yeimy Liliana Sanabria Salinas
María Fernanda Sierra Ospina

UPME
Dora Liliam Castaño Ramirez, Subdirección de Energía Eléctrica
Marco Antonio Caro Camargo, Subdirección de Energía Eléctrica
Juan Carlos Aponte Gutierrez, Subdirección de Energía Eléctrica

Fundación Universitaria Los Libertadores
Cesar Chacón Cardona
Diego Julian Rodriguez

Colciencias
Yesid Ojeda Papagayo, Asesor Dirección de Fomento a la Investigación.
Rodrigo Buitrago Tello, Asesor Dirección de Fomento a la Investigación.

Agradecimientos

Expresamos un especial agradecimiento a Cenicafé, Cenicaña, Fedearroz, IPSE y la CAR de Cundinamarca, estas entidades facilitaron la información de radiación global para la elaboración del presente atlas, así como a los evaluadores y validadores de la información de radiación global, a los funcionarios del Grupo de Automatización del IDEAM quienes participaron en la calibración de los sensores de radiación, a los funcionarios del Grupo de Meteorología Aeronáutica que apoyaron los ozonosondeos que ha realizado el IDEAM en la ciudad de Bogotá y, en general, a los funcionarios del IDEAM, UPME, Colciencias y la Fundación Universitaria Los Libertadores por sus aportes en la terminación del presente Atlas.

Igualmente, se hace un reconocimiento a la doctora María Teresa Martínez, en cuya administración como Subdirectora de Meteorología del IDEAM, apoyó y se realizó gran parte de las actividades que hicieron posible la elaboración del presente Atlas y a la Doctora Angela Cadena, exdirectora de la UPME, quien apoyó el Convenio Colciencias - UPME, que aportó recursos y mecanismos para gestionar nuevo conocimiento relacionado con la cuantificación de la disponibilidad de las energías renovables en Colombia.

Abreviaturas

AMVA: Área Metropolitana del Valle de Aburrá

ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

CENICAFE: Centro Nacional de Investigaciones de Café

CENICAÑA: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

CFC: Clorofluorocarbonos

CIURE: Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía

CNE: Comisión Nacional de Energía

CNO: Consejo Nacional de Operaciones

COLCIENCIAS: Fondo Colombiano de Investigaciones Científicas y Proyectos Especiales

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

CSP: Concentradores Solares de Potencia

DAGMA: Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente

DAMAB: Departamento Administrativo del Medio Ambiente de Barranquilla

DAMAs: Departamentos Administrativos del Medio Ambiente

DNP: Departamento Nacional de Planeación

EMAS: Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales

ESRL: Laboratorio De Investigación Del Sistema Terrestre (Earth System Research Laboratory en inglés)

FAZNI: Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas

FEDEARROZ: Federación Nacional de Arroceros

FENOGE: Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía

FMI: Instituto Meteorológico de Finlandia (Finnish Meteorological Institute en inglés)

FNCE: Fuentes No Convencionales de Energía

FPS: Factor de Protección Solar

FV: Fotovoltaicas

GEI: Gas de Efecto Invernadero

GPS: Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System en inglés)

GSFC: Centro de Vuelo Espacial Goddard (Goddard Space Flight Center en inglés)

HSd: Horas de Sol al Día

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IDRD: Instituto Distrital de Recreación y Deporte

INEA: Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas

IPSE: Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas

IRENA: Agencia Internacional de Energías Renovables

IUV: Índice Ultravioleta

ISO: Organización Internacional de Normalización (International Organization For Standardization en inglés)

JAXA: Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Japan Aerospace Exploration Agency en inglés)

MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MME: Ministerio de Minas y Energía

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics And Space Administration en inglés)

NOAA: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic And Atmospheric Administration en inglés)

OMI: Instrumento para el Monitoreo del Ozono (Ozone Monitoring Instrument en inglés)

OMM | WMO: Organización Meteorología Mundial (World Meteorological Organization en inglés)

OMS | WHO: Organización Mundial de la Salud (World Health Organization en inglés)

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PROURE: Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales

REN21: Red de Políticas de Energías Renovables para el Siglo 21

PAR: Radiación Fotosintéticamente Activa (Photosynthetically Active Radiation en inglés)

SAO: Sustancias Agotadoras de Ozono

SDA: Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá

SDO: Observatorio de Dinámica Solar (El Solar Dynamics Observatory en inglés)

SFV: Sistemas Fotovoltaicos

SIN: Sistema Interconectado Nacional

SOHO: Observatorio Solar y Hemisférico (El Solar And Heliospheric Observatory en inglés)

STEREO: Observatorio de Relaciones Solar-Terrestres (Solar Terrestrial Relations Observatory en inglés)

TOMS: Espectrofotómetro para el mapeo del Ozono Total (Total Ozone Mapping Spectrometer en inglés)

TSM: Tiempo Solar Medio

TSV | LAT; Tiempo Solar Verdadero (Local Apparent Time en inglés))

U.A.: Unidad Astronómica

U.D: Unidades Dobson (unidad de medida para determinar la cantidad de ozono en toda la columna atmosférica)

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética

URE: Uso Racional y Eficiente de la Energía

UTO: Unidad Técnica de Ozono

UV: Ultravioleta

WRC: Centro Mundial de Radiación (World Radiation Center en inglés)

WRR: Centro de Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference en inglés)

Wh/m²: Vatios-hora por metro cuadrado

ZNI: Zonas No Interconectadas

Prólogo

Gracias a los Servicios Climáticos del IDEAM, integrando bajo estándares de la Organización Meteorología Mundial (OMM) las redes de estaciones meteorológicas públicas y privadas, asi como, generando bases de datos, aportando a la calibración y validación de la información radiométrica en el territorio nacional, además, con el apoyo de la UPME y Colciencias, se logra esta nueva versión del Atlas que conserva la línea de contribuir a remover barreras al conocimiento e implementación de tecnologías para el aprovechamiento de los recursos renovables en Colombia, desde el cumplimiento de sus funciones institucionales, así como a la salud pública, alertando sobre los peligros asociados a la exposición al Sol ocasionados por la radiación ultravioleta. Se han ajustado, mejorado y actualizado los contenidos, buscando cumplir con el objeto social de desarrollo y bienestar desde lo ambiental y energético. Estos esfuerzos institucionales, fruto del trabajo mancomunado de varios años, desde la versión del Atlas de Radiación Solar del año 2005, y de la constancia de sus funcionarios y directivos, hacen posible este nuevo aporte.

Desde la anterior versión del Atlas los avances técnicos en las energías renovables han sido vertiginosos; hoy en día la energía solar es muy competitiva y madura en sus aplicaciones para aprovechamientos térmicos y eléctricos y genera nuevos retos debido a la alta integración en proyectos de generación de electricidad a nivel distribuido y centralizado, cuyo impacto y beneficios en la reducción de costos en el suministro de energía seguirán dependiendo de los servicios climáticos para el sector energético, principalmente en los pronósticos, que facilitan la gestión de su despacho en el mercado eléctrico colombiano, para el control o mitigación de las variaciones de suministro de electricidad, debido a la disponibilidad del Sol.

Ahora más que en el pasado se hace necesario el fortalecimiento consecuente de entidades como el IDEAM y de las instituciones asociadas a lo ambiental y energético, desde lo científico, político, normativo, operativo y regulatorio. Como popularmente se dice "En todas partes el Sol sale para todos"; por ello, incrementar las implementaciones solares fotovoltaicas (FV) conectadas a la red impacta la calidad de la electricidad en el sistema interconectado nacional, regional y local.

Como un indicador de lo anterior, los resultados de la Ley 1715 de 2014, que promueve la inversión en fuentes no convencionales de energía, existe una proliferación de interesados en la tecnología FV, con más de 3000 MW a julio de 2017, más rápida de implementar y una de las más competitivas, aun cuando se requiere el fortalecimiento en infraestructuras y la capacidad institucional en los servicios climáticos y que, igualmente, se garanticen y certifiquen la calidad de los equipos y de los diseños de las nuevas instalaciones.

El presente estudio mejora y actualiza las bases de datos de radiación global, brillo solar, radiación ultravioleta y ozono, de estaciones públicas y privadas y de información satelital para el caso del ozono. La actualización de esta información también es importante para un amplio rango de aplicaciones, en las áreas de ingeniería, arquitectura, agricultura, ganadería, salud humana y meteorología.

Este atlas no sólo representa una gran satisfacción para el IDEAM, sino que evidencia el sentido de compromiso, pertenencia y entrega de nuestra institución y cada uno de sus colaboradores con Colombia, ya que contiene un conjunto de productos gráficos, cartográficos, tablas y análisis, con los cuales se busca mejorar la resolución de la distribución espacio-temporal de las variables asociadas a la radiación solar y el ozono en Colombia.

Contenido

Agradecimientos 3
Abreviaturas 4
Prólogo 5

1. PRESENTACIÓN 9
1.1 ¿QUÉ ES EL ATLAS? 10
1.2 ¿QUÉ CONTIENE? 10
1.3 ¿QUÉ APORTA? 11
1.4 ¿POR QUÉ SE HACE EL ATLAS? 11
1.5 NORMATIVIDAD 13

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS 14
2.1 ANTECEDENTES 15
2.2 ¿CÓMO SE ELABORÓ EL ATLAS 16
2.2.1 Evaluación y procesamiento de la información meteorológica 16
2.2.2 Modelamiento 18
2.2.3 Representación gráfica y cartográfica de los datos (generación de mapas) 19
2.2.4 Análisis de resultados 19

3. ASPECTOS TEÓRICOS 20
3.1 EL SOL 21
3.2 ESTRUCTURA SOLAR 21
3.3 CICLO SOLAR 24
3.4 RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA 26
3.4.1 Distancia Tierra-Sol 26
3.4.2 Variación de la radiación solar en el límite superior de la atmósfera 27
3.4.3 Sistemas de coordenadas para determinar la posición del Sol 27
3.4.3.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales 28
3.4.3.2 Coordenadas celestes ecuatoriales 28
3.4.3.3 Posición del Sol en el triángulo astronómico 30
3.4.4 Altura del Sol (h) 30
3.4.5 Duración astronómica del día (N) 30
3.4.6 Dirección del haz de radiación 31
3.4.7 Angulo horario (ω) 31
3.4.8 Ecuación del tiempo (ET) 31
3.5 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR 32
3.6 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR 33
3.7 CONSTANTE SOLAR 34

3.8 ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR 35
3.8.1 Dispersión 35
3.8.2 Reflexión (Albedo) 36
3.9 RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE 38
3.9.1 Radiación directa (Hb) 39
3.9.2 Radiación difusa (Hd) 39
3.9.3 Radiación global (H) 39
3.10 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA 40
3.10.1 Tipos de radiación UV y sus efectos en la salud 40
3.10.1.1 Radiación UV-A 41
3.10.1.2 Radiación UV-B 41
3.10.1.3 Radiación UV-C 42
3.10.2 Factores que influyen en los niveles de radiación UV 42
3.10.3 El índice UV 43
3.10.4 Presentación y comunicación del Índice UV 45
3.11 EL OZONO 48
3.11.1 Generalidades 48

4. LA RADIACIÓN GLOBAL Y EL BRILLO SOLAR EN COLOMBIA 49
4.1 RED NACIONAL DE MEDICIÓN E INSTRUMENTOS DE MEDIDA 50
4.1.1 Red nacional de medición de la radiación global 50
4.1.1.1 Estaciones del IDEAM 50
4.1.1.2 Estaciones de otras entidades 52
4.1.2 Instrumentos de medida de la radiación global 58
4.1.3 Red nacional e instrumentos de medida del brillo solar 61
4.2 UNIDADES DE MEDIDA 63
4.2.1 Unidades de medición de la radiación global 63
4.2.2 Unidades de medición de brillo solar 63
4.3 MAPAS DE IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL Y BRILLO SOLAR 64
4.3.1 Distribución a nivel mundial de la irradiación global horizontal 64
4.3.2 Distribución espacial y temporal de la irradiación global horizontal en Colombia 65
4.3.3 Comportamiento horario de la irradiación global horizontal en algunas ciudades del país 67
4.3.4 Distribución espacial y temporal del brillo solar en Colombia 74
4.3.5 Comportamiento promedio del número de días al mes sin brillo solar 76
4.4 ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE RADIACIÓN GLOBAL Y DE LA VALIDACIÓN DE DATOS DE RADIACIÓN 84
4.4.1 Metodología en la calibración de radiómetros 84
4.4.1.1 Calibración de piranómetros 84
4.4.1.2 Calibración de actinógrafos utilizando un piranómetro subpatrón 87
4.4.2 Criterios en las validación de datos de radiación global 88

5. LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN COLOMBIA 91
5.1 RED NACIONAL DE MEDICIÓN E INSTRUMENTOS DE MEDIDA 92
5.2 RED NACIONAL DE SOLMÁFOROS 93
5.3 UNIDADES DE MEDIDA 95
5.4 MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (ÍNDICE UV) 95
5.4.1 Distribución global de la radiación ultravioleta 95
5.4.2 Distribución espacial y temporal de la radiación ultravioleta en Colombia 97

6. EL OZONO TOTAL EN COLOMBIA 105
6.1 PROGRAMA NACIONAL DE MEDICIÓN 106
6.1.1 Medición del perfil vertical del ozono 106
6.1.2 Seguimiento del ozono total en Colombia 107

6.2 UNIDADES DE MEDIDA....108
6.3 MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO....108
6.3.1 Distribución global del ozono....108
6.3.2 Distribución espacial y temporal del ozono total en Colombia....110

7. ASPECTOS RELEVANTES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR....118

7.1 ESTADO DE LAS TECNOLOGÍAS RENOVABLES A NIVEL GLOBAL....119
7.2 TECNOLOGÍAS SOLARES....120
7.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA....121
7.4 UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA....123
7.5 NORMATIVIDAD ASOCIADA A LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA....123

8. RESULTADOS Y RECOMENDACIONES....128

8.1 PRINCIPALES RESULTADOS....129
8.1.1 Radiación global y brillo solar....129
8.1.2 Ozono....129
8.1.3 Radiación Ultravioleta....130
8.2 RECOMENDACIONES....131
8.2.1 Radiación global y brillo solar....131
8.2.2 Radiación ultravioleta....131
8.2.3 Ozono....131

ANEXOS....132

Anexo 1. Recomendaciones Básicas de Protección contra la Radiación Ultravioleta (Exposición Saludable del Sol)....133
Anexo 2. Conocimientos Básicos sobre la Radiación UV y su Relación con el Ozono....136
Anexo 3. Promedios Mensuales de la Irradiación Global Acumulada Diaria....138
Anexo 4. Promedios Horarios Mensuales de Irradiación Global Media....139
Anexo 5. Promedios Mensuales de Brillo Solar en las principales ciudades del país (horas de Sol al día)....144
Anexo 6. Promedios Mensuales del Número de Días Sin Brillo Solar en las Principales Ciudades del País....145
Anexo 7. Metodología para Realizar los Mapas de la Columna Total de Ozono....147
Anexo 8. Promedios Mensuales de la Columna Total de Ozono en las Principales Ciudades del País en Unidades Dobson (Ud)....148
Anexo 9. Análisis de Variables en Altura con Base en los Ozonosondeos realizados en Bogotá....149
Anexo 10. Especificaciones Técnicas de los Solmáforos Instalados en la Red Nacional....156
Anexo 11. Promedios Mensuales de Irradiación Global Media Recibida en Superficie de las Estaciones Convencionales....158
Anexo 12. Promedios Mensuales de Irradiación Global Media Recibida en Superficie de las Estaciones Automáticas....160
Anexo 13. Ejemplo de Cálculo de Variables Astronómicas para determinar Radiación Global sobre una Superficie Horizontal....163

PRESENTACIÓN

Guatapé, Antioquia

1.1 ¿QUÉ ES EL ATLAS?

El Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia es una herramienta fundamental para la valoración de la disponibilidad de la energía solar en el territorio nacional y para conocer el comportamiento de la radiación ultravioleta, el ozono y sus relaciones, que contribuyen a entender sus efectos en la salud humana.

Colombia se encuentra en la zona ecuatorial y recibe abundante energía solar, cuya distribución presenta grandes variaciones durante el año en su territorio, razón por la cual, para utilizar esa energía es indispensable conocer con suficiente detalle su distribución espacial y temporal.

Con esta nueva versión del atlas, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en conjunto con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), pone a disposición del país mapas, datos, análisis e información actualizada sobre radiación solar global, radiación ultravioleta, insolación o brillo solar y la columna total de ozono, con una mejor resolución espacial y temporal; se espera sea de gran utilidad en las investigaciones relacionadas con estas variables y en las aplicaciones para el conocimiento y aprovechamiento (eléctrico, térmico y lumínico) de la energía solar en Colombia.

1.2 ¿QUÉ CONTIENE?

1. Un conjunto de mapas climatológicos que representan la distribución promedio mensual y anual de las siguientes variables: irradiación solar global horizontal, brillo solar, número de días al mes sin brillo solar, radiación ultravioleta y la columna total de ozono, acompañadas de análisis regionales del comportamiento promedio anual y a lo largo del año de estas variables.
   Para contextualizar el comportamiento medio de estas variables a nivel nacional, previamente se registran los análisis mundiales de las distribuciones medias espaciales de cada una, así como algunos factores que contribuyen a comprender estos comportamientos.
   En el caso de la irradiación global horizontal, la información se complementa con los promedios horarios para cada mes, en algunas estaciones del país, contenida en tablas (ver Anexo 4).
2. En los capítulos de este atlas se busca facilitar la comprensión e interpretación de los resultados obtenidos en los siguientes temas: aspectos teóricos sobre radiación solar y ultravioleta, el índice UV, así como de la columna total de ozono; descripción de la red nacional del IDEAM y de otras entidades que miden la radiación global y el seguimiento que realiza el IDEAM al brillo solar, la radiación ultravioleta y el ozono; instrumentación; metodologías de calibración de sensores de radiación; criterios de validación de datos de radiación y normatividad regulatoria y técnica para el aprovechamiento de la radiación solar.
3. Respecto del atlas de radiación del año 2005, se mejora la resolución temporal con promedios mensuales horarios de la irradiación global horizontal en algunas estaciones del país. También la resolución espacial, al contar con información radiométrica medida directamente en cerca de 240 sensores de radiación global y de 501 de brillo solar (contra 71 radiometros y 383 mediciones de brillo en el 2005). La información hace parte de las redes de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (Cenicaña), el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), la Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) y el IDEAM. Con repecto al IDEAM se incluye información de estaciones convencionales (principalmente actinógrafos) y automáticas satelitales (cuyos sensores son piranómetros).
4. A partir de los datos de brillo solar, se obtuvo el "Número de días sin brillo solar", útil para el aprovechamiento confiable de la energía solar, ya que facilita el diseño más adecuado de las soluciones o aplicaciones energéticas como calentadores y paneles solares, entre otras.
5. Los anexos presentan: a) tablas con los promedios mensuales y anuales de la irradiación global recibida en superficie, brillo solar, número de días al mes sin brillo solar y la columna total de ozono, en las capitales de departamento y en la isla de Providencia; b) para algunas estaciones del país los promedios horarios de la irradiación global horizontal para cada mes se presentan en tablas; c) análisis de variables en altura y superficie, obtenidos a partir de ozonosondeos realizados en Bogotá por el IDEAM; d) la lista de las estaciones convencionales y automáticas de radiación global del IDEAM, usadas en el presente atlas, con sus respectivos promedios mensuales y anuales.

1.3 ¿QUÉ APORTA?

El Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia contribuye al conocimiento de la disponibilidad de la energía solar en el territorio nacional, cuantificando y estimando los promedios mensuales de la irradiación solar que incide sobre el territorio colombiano a lo largo del año, con lo cual se facilita la identificación de regiones estratégicas con potenciales recursos para la solución de necesidades energéticas de la población.

Es especialmente útil para el caso de las zonas no interconectadas a la red nacional, porque facilita información necesaria en el dimensionamiento de sistemas y soluciones tecnológicas solares, para el abastecimiento de energía eléctrica (en iluminación, comunicaciones, refrigeración, bombeo de agua) o el suministro de calor (en el calentamiento de agua o aire, el secado de productos agrícolas, climatización, entre otras aplicaciones). Igualmente, la información del atlas es importante para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes.

Para el presente atlas, se utilizaron los datos de 96 sensores de radiación que pertenecen a la red de estaciones automáticas del IDEAM, que fueron calibrados en terreno y su instalación empezó en el año 2005. Lo anterior, garantiza que los datos históricos y los que actualmente se están capturando, sean confiables. Estos sensores son los que actualmente funcionan en la red nacional, ya que los actinógrafos dejaron de funcionar entre los años 2003 y 2005. Igualmente, de estos últimos se validó y evaluó la información de cerca de 65 actinógrafos del IDEAM.

La modelación matemática para la conversión de brillo solar a radiación global tuvo avances significativos y generó resultados muy consistentes con las mediciones de radiación global que han venido realizando el IDEAM y otras entidades. Aunque los resultados de la modelación, obtenidos en la anterior edición del atlas, fueron buenos, se logró establecer que se sobreestimaron los valores de radiación hasta en un 10%, principalmente, en la Amazonía, Orinoquía y la región Caribe.

Los procedimientos para la validación de los datos utilizados aportan algunos criterios que facilitarán el control de calidad y la verificación de los datos de radiación global obtenidos por otras entidades o particulares.

Debido a la relación entre el ozono y la intensidad de la radiación ultravioleta recibida en superficie y sus implicaciones en la salud, en los anexos 1 y 2 se suministran recomendaciones de protección contra la radiación ultravioleta para una exposición saludable al Sol y las relaciones más importantes entre estos dos parámetros.



El Atlas de Radiación contribuye al conocimiento de la disponibilidad de la energía solar en el territorio nacional

1.4 ¿POR QUÉ SE HACE EL ATLAS?

Las fuentes renovables de energía, como la eólica y la solar, constituyen hoy en día valiosos recursos, más limpios que los originados en las fuentes fósiles. Estos recursos son cada vez más competitivos, en especial, si se toma en consideración que permiten promover un desarrollo más sostenible en el planeta.

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que ocurren en el sistema tierra-atmósfera-océano. Más del 99,9 % de la energía que este sistema recibe proviene del Sol. Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones en las áreas de ingeniería, arquitectura, agricultura, ganadería, salud humana y meteorología, dentro de las cuales se destacan: su empleo como fuente alternativa de energía en la generación de electricidad y en el diseño y uso de sistemas de calentamiento de agua, el diseño de edificios e infraestructura, el monitoreo del crecimiento de plantas, la deshidratación de alimentos, implicaciones en la salud (ej. cáncer de piel o tratamientos curativos), el análisis de la evaporación e irrigación, su importante rol en los modelos de calidad del aire y de predicción del tiempo y el clima y muchas otras aplicaciones y usos que emplean la irradiación solar como una de sus fuentes de energía.

Manaure, Alta Guajira
Una de las zonas con más altas intensidades de la radiación global en Colombia

Además, conocer la disponibilidad de la radiación global y el brillo solar en el territorio nacional es fundamental para el desarrollo sostenible del país, ya que su utilización en la generación de energía, sistemas de calentamiento y otras aplicaciones, puede remplazar el consumo de combustibles fósiles, que generan un impacto en diferentes temas de actualidad, a saber: calentamiento global, calidad del aire en centros poblados, lluvia ácida, generación de aerosoles, entre otros. El empleo de la radiación solar como recurso también contribuye al desarrollo en zonas alejadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía.

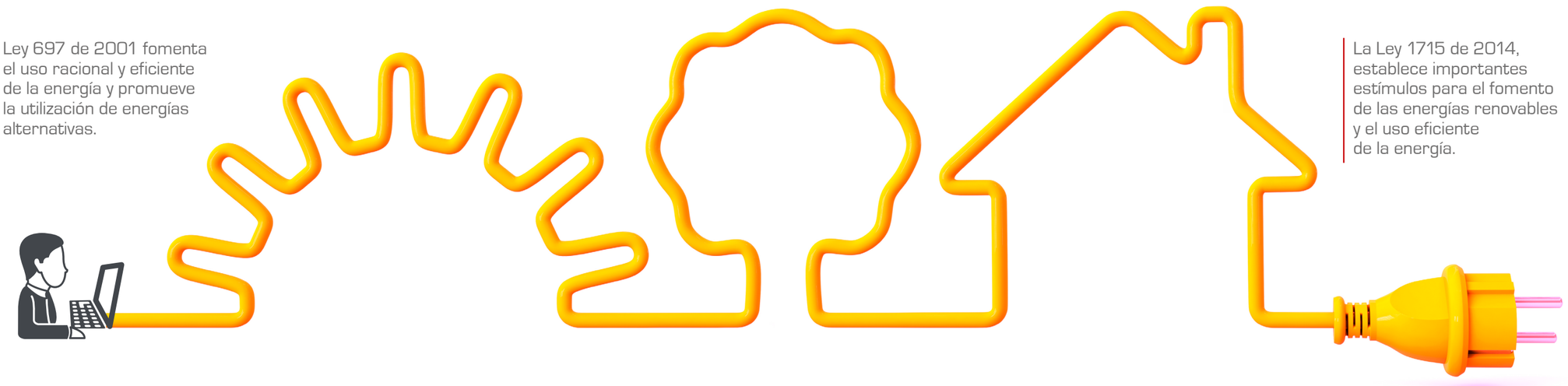
1.5 NORMATIVIDAD

Desde el punto de vista normativo, el Plan Nacional de Desarrollo, Ley 1450 de 2011, en su artículo 105 sobre energías renovables señala que "El Gobierno nacional diseñará e implementará una política nacional encargada de fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en las energías solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica y demás alternativas ambientalmente sostenibles, así como una política nacional orientada a valorar el impacto del carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país…". En tal sentido, instituciones como el IDEAM, UPME y Colciencias aúnan esfuerzos y recursos para su cumplimiento. Por consiguiente, la información procesada y disponible en el presente atlas es fundamental para el logro del objeto de este artículo, además permitirá establecer potencialidades, a partir de los cuales, se harán valoraciones económicas y financieras para su aprovechamiento en Colombia.

Por otro lado, la Ley 697 de 2001 fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas; el Decreto 3683 de 2003, referente al inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales y la reciente Ley 1715 de 2014, realizan importantes estímulos para el fomento de las energías renovables y el uso eficiente de la energía, cuya reglamentación impacta fuertemente el desarrollo de la utilización de estos recursos, en particular, de la energía solar.

El IDEAM, en su condición de autoridad meteorológica nacional, es la entidad encargada de generar conocimiento y obtener y garantizar el acceso a la información meteorológica y ambiental del país. Con tal fin, opera la red nacional de estaciones meteorológicas y realiza la medición y recolección de dicha información. En particular, obtiene, almacena, evalúa, valida, procesa y difunde los datos de radiación y la información de radiación y brillo solar, ozono y radiación UV. Resulta entonces, muy estratégica la alianza entre las entidades del Estado con el IDEAM para la realización de este atlas y para establecer mecanismos de actualización continua de la información y su intercambio para los estudios y actividades propias de cada entidad, como soporte para el desarrollo adecuado del aprovechamiento de las fuentes de energía no convencionales.

Ley 697 de 2001 fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas.



La Ley 1715 de 2014, establece importantes estímulos para el fomento de las energías renovables y el uso eficiente de la energía.

2

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Bogotá, D. C.

2.1 ANTECEDENTES

El IDEAM realiza el seguimiento a la radiación global en el país, contando con la red más grande de estaciones y de mayor cobertura. En el desarrollo de esta actividad y como una forma de socializar la información capturada, validada y analizada que ha realizado el IDEAM de la radiación global, el brillo solar, la radiación ultravioleta y la columna total de ozono, se trazó como objetivo actualizar el atlas de estas variables, cuya última edición fue publicada por el IDEAM y la UPME en el año 2005.

Entre las primeras actividades, se realizó un convenio entre el IDEAM y la Fundación Universitaria Los Libertadores, cuya tarea inicial fue la primera jornada de calibración de instrumentos radiométricos, realizada en julio de 2012 en Bogotá, utilizando un pirheliómetro de Cavidad Absoluta de primer orden de precisión, calibrado en el Centro Mundial de Radiación de Davos en Suiza. Una de las conclusiones de dicho taller fue la necesidad de realizar la calibración de todos los sensores de radiación global y ultravioleta del IDEAM, para garantizar la confiabilidad de los datos.



En la calibración de instrumentos radiométricos se emplea como patrón el Pirheliómetro de Cavidad Absoluta. Fuente: Fundación Universitaria los Libertadores

Posteriormente en agosto del 2013, se realizó en Cartagena la segunda jornada de calibración, evento organizado por el IDEAM y la Fundación Universitaria los Libertadores, gracias al apoyo económico de la UPME, este contó con la participación de 25 funcionarios de diferentes entidades que miden la radiación global en el país, tales como: Cenicaña, Cenicafé, CAR, Universidades Distrital, Córdoba, del Tolima, Fundación Universitaria Los Libertadores y el IDEAM. En esta jornada, se calibraron algunos piranómetros que se han utilizado como patrones secundarios para calibrar en terreno los sensores de las estaciones automáticas satelitales, que el IDEAM ha instalado en el país desde el año 2005, ya que son los que actualmente se encuentran funcionando, puesto que se decidió desmontar los actinógrafos que tenía en operación el IDEAM. Con esto se buscó obtener información actualizada y confiable para la presente versión del atlas de radiación y para todos los usuarios de este.

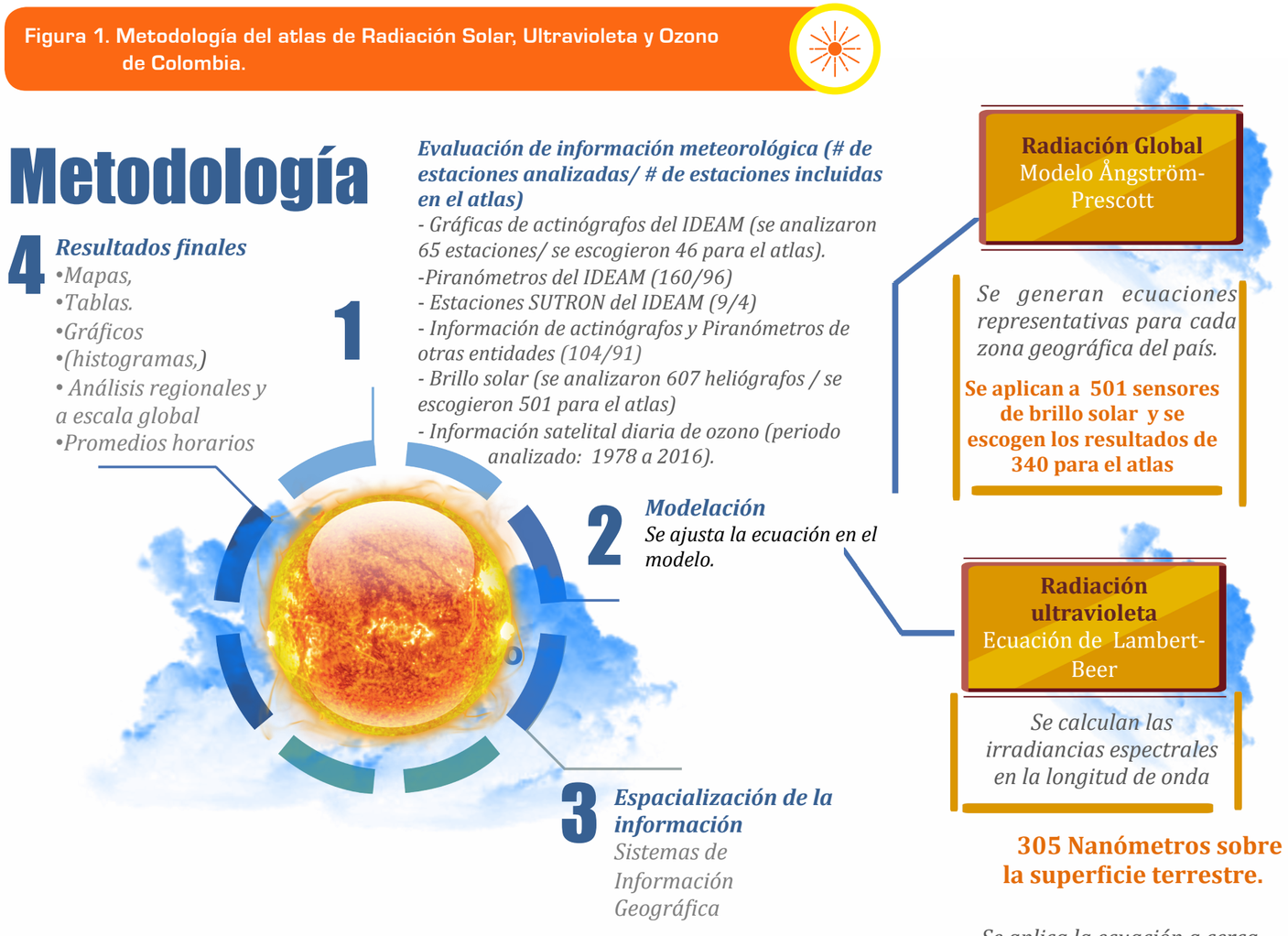
Por otro lado, el IDEAM ha venido trabajando con la UPME desde los dos últimos decenios, en la elaboración de inventarios de los recursos renovables, uniendo esfuerzos técnicos y logísticos, así como recursos económicos, para validar información, actualizar las bases de datos del IDEAM y establecer metodologías y modelos para la evaluación de los recursos renovables, resultado de lo cual se lograron los Atlas Nacionales de la disponibilidad de las potencialidades de energía solar (2005), eólica (2006), biomasa residual (2010) e hidroenergía (2015). Gracias a este trabajo conjunto, la UPME aporto recursos en el logro de sus funciones, para mejorar la calidad de la información disponible de las fuentes renovables de energía en Colombia, que conllevó a un apoyo en diferentes actividades realizadas por el IDEAM y la Fundación Universitaria los Libertadores con el objeto de mejorar la información que se utilizaría en la actualización del atlas, como son: calibración en terreno de 105 piranómetros de las estaciones automáticas del IDEAM, ubicados a lo largo del territorio nacional durante los años 2014 y 2015; calibración de tres espectrorradiómetros del IDEAM para medir radiación ultravioleta; validación de información y evaluación de gráficas de actinógrafos del IDEAM, finalmente, la selección y aplicación de modelos para generar promedios mensuales de irradiación global a partir de datos de brillo solar y para generar los promedios mensuales de radiación ultravioleta (representado en el índice UV), utilizados en la elaboración de los mapas de esta variable.

Este atlas es el resultado del trabajo conjunto del IDEAM, la UPME, la Fundación Universitaria Los Libertadores, de las entidades que amablemente suministraron su información de radiación global, de técnicos evaluadores de gráficas, expertos en modelación y validación de información, técnicos participantes en las calibraciones de los sensores de radiación y otras personas que contribuyeron a realizar las actividades que se mencionan en la siguiente sección aunque algunas no se mencionan pero que igualmente fueron importantes.

2.2 ¿CÓMO SE ELABORÓ EL ATLAS

En la elaboración del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia se llevaron a cabo las etapas de evaluación y procesamiento de la información meteorológica, modelación, representación gráfica y cartográfica de los datos y el análisis de los resultados, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 1. Metodología del atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia.



2.2.1 Evaluación y procesamiento de la información meteorológica

a) Radiación global: inicialmente se hizo un diagnóstico de las entidades nacionales que tenían sensores de radiación global, para definir qué información se iba a solicitar, revisar y validar. También se consultó sobre sus programas de calibración y mantenimiento de sensores de radiación. Después de este diagnóstico se escogió y analizó la siguiente información:

- Se evaluaron gráficas y se validó la información diaria de radiación global de 65 actinógrafos del IDEAM, de los cuales, se tuvieron en cuenta para los mapas del atlas 46 y cuyo listado se presenta en el Anexo 11. En esta etapa, se validó la información utilizada en la anterior edición del atlas y se evaluó información adicional de estos sensores para mejorar el resultado de los promedios mensuales.
- Se validó información horaria de 160 piranómetros del IDEAM, que hacen parte de las estaciones meteorológicas automáticas satelitales (EMAS) y de los que se escogieron 105 para ser calibrados, durante los años 2014 y 2015. Posteriormente se aplicaron a los datos la constante de calibración obtenida en cada sensor y se realizó la validación final. Después de analizar los resultados, se tuvieron en cuenta en los mapas 96 sensores, cuyo listado se presenta en el Anexo 12.

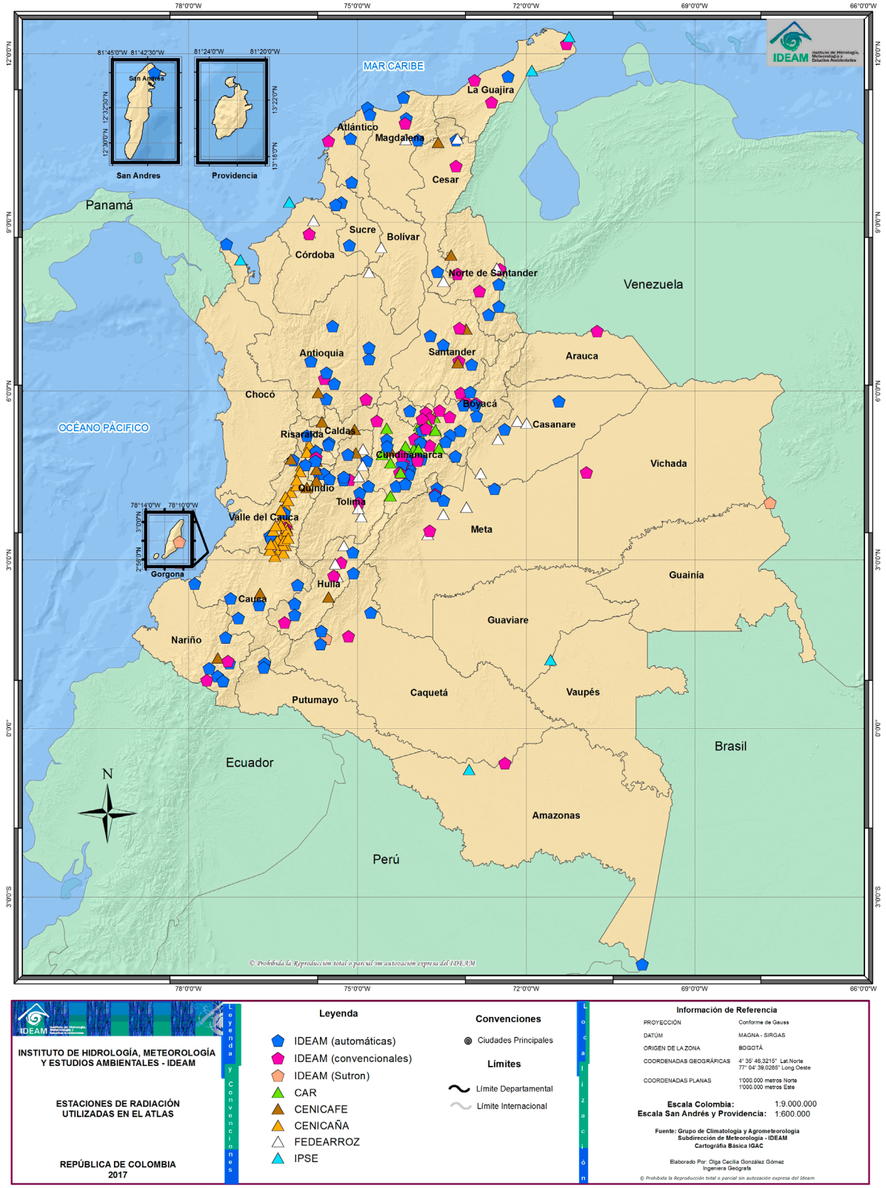
- Se validó información horaria de 9 estaciones del IDEAM (marca SUTRON), que operaron entre 1998 y el 2003, de las cuales solo 4 se incluyeron en los mapas.
- Se validó la información de 104 sensores de otras entidades, que cuentan con redes pequeñas y de carácter regional, entre los que se encontraban: con información diaria: 34 piranómetros de Cenicaña; con información horaria: 28 piranometros de Fedearroz; 15 de la CAR; 10 del IPSE; además se evaluaron las gráficas de 17 actinógrafos de Cenicafé que generan información diaria. Después de revisar los resultados de estos sensores, se escogieron 91 para ser incluidos en los mapas.

En total se validó la información de cerca de 340 sensores de radiación, de los cuales 240 fueron escogidos para ser incluidos en los mapas del presente atlas cuya distribución espacial se muestra en la Figura 2. En los 96 sensores de las EMAS del IDEAM, calibrados y seleccionados para realizar los mapas, se utilizó información hasta el 31 de diciembre de 2016. En la sección 4.1.1 y los anexos 11 y 12, se especifican los periodos analizados para cada sensor utilizado en el presente atlas.

Con los datos de los 240 sensores escogidos, se corrieron las macros que generaron para cada sensor los siguientes aplicativos: promedios horarios de la irradiación global horizontal para cada mes y los promedios mensuales de la irradiación global acumulada diaria, recibida en superficie. Los promedios horarios se obtuvieron para los sensores que generan información a nivel horario, como son las EMAS del IDEAM y las estaciones de la CAR, IPSE y Fedearroz. Teniendo definidos los promedios mensuales de la irradiación global horizontal de las 240 estaciones, estos se complementaron con los resultados de la modelación de cerca de 340 sensores de brillo solar, de los 501 escogidos para aplicarles el modelo que convierte los datos de brillo solar a irradiación global. Se escogieron los resultados de 340 sensores de brillo, porque se descartaron los que se encontraban en municipios o ciudades donde también había medición de radiación global.

b) Brillo solar: se validó la información de 607 sensores de brillo solar que hacen parte de la red del IDEAM, escogiendo 501 para elaborar los mapas de brillo, los cuales se presentan en el mapa (b) de la Figura 55. Se utilizó información para cada sensor, desde su instalación hasta el 31 de diciembre de 2016 o hasta que se suspendió su operación.

Figura 2. Sensores de radiación global utilizados en el atlas.



Después de validados los datos de brillo solar en las 501 estaciones escogidas, se calculó el número de días sin brillo solar, el cual es importante para los diseños de equipos que involucren el confort necesario ante situaciones de épocas con baja o nula disponibilidad de radiación solar. En este caso se contabilizan y promedian los días del mes en los cuales las horas de brillo solar estuvieron entre 0,0 y 0,5 horas de Sol al día (hSd).

c) Ozono: Los promedios para generar los mapas de ozono total fueron obtenidos a partir de mediciones satelitales durante el periodo 1978-2016. Estas mediciones fueron posibles desde finales de 1978, tiempo en el cual entró en operación el satélite Nimbus-7. Este satélite estaba dotado del instrumento espectrofotómetro para el mapeo del Ozono Total (TOMS, Total Ozone Mapping Spectrometer, en inglés), el cual midió la distribución global del ozono. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites como el Meteor-3 en 1991, el Earth Probe en 1996 y el Aura en 2004, este porta el Instrumento de Medición del Ozono (OMI - Ozone Monitoring Instrument), el cual se encuentra en operación. El TOMS y el OMI han podido medir la cantidad total de la columna de ozono diario, desde la superficie hasta el tope de la atmósfera, bajo cualquier condición geofísica y a cualquier hora del día.

2.2.2 Modelamiento

Por medio del modelamiento se generaron promedios mensuales de irradiación global horizontal a partir de datos de brillo solar y también se generaron los promedios mensuales para elaborar los mapas del comportamiento de la radiación ultravioleta en el país.

a) Los modelos más relevantes para predecir la radiación solar global en promedios mensuales (Wh/m² por día) son los modelos basados en brillo solar, nubosidad, temperatura y otras variables meteorológicas como la humedad. Estos modelos denominados "empíricos" determinan la correlación entre la radiación solar y variables medidas en terreno. Se revisaron once modelos trabajados en diferentes países para determinar el más eficiente a las condiciones climáticas de Colombia. Los modelos analizados fueron: Ångström-Prescott, Glower y McCulloch, Dogniaux and Lemoine, Ogelman, de Zabara, Gopinathan, Newland, Louche et al, de Raja, de Coppolino y el híbrido de Yang. Los resultados encontrados para promedios mensuales de cada uno de ellos no mostraron dispersiones significativas. Finalmente se seleccionó el modelo de Ångström-Prescott, muy citado en trabajos similares en el ámbito internacional cuya correlación se fundamenta en: la relación de las radiaciones solares, la calculada en el límite superior de la atmosfera (Ho) y la medida en superficie terrestre (H), expresadas en (Wh/m²); las horas de brillo solar medidas en superficie (n) y la duración astronómica del día solar (N) medidos en horas y cuya igualdad matemática es:

$$H/Ho = (a + b(n/N))$$

Finalmente, para obtener un mayor cubrimiento de datos de radiación solar global en el país, se elaboraron ecuaciones lineales en estaciones que miden simultáneamente radiación global y brillo solar y que son representativas para cada zona geográfica del país, a las cuales se les denominaron estaciones piloto. Con ellas se aplicó el modelo de Ångström-Prescott y sus constantes a y b a las estaciones con medidas de brillo solar, que se encuentran dentro de la zona de influencia.

- En el modelamiento de la radiación ultravioleta para días despejados, alrededor del mediodía, en las bandas espectrales 305, 320 y 340 nanómetros, se utilizó el modelo matemático que expresa la atenuación de la radiación solar en términos de los efectos de absorción y dispersión de los componentes atmosféricos a través de la ley de Bouguer, llamada también ley de Lambert-Beer. En esta ley, la atenuación de la radiación es directamente proporcional al camino recorrido por la radiación en su paso por la atmósfera, de esta forma la irradiancia solar directa que llega a la superficie terrestre a una longitud de onda λ, se determina con la siguiente igualdad:

$$I_{n\lambda} = I_{on\lambda}\, e^{-k_\lambda m}$$

Donde: $I_{n\lambda}$ es la irradiancia solar directa que incide en la superficie después de atravesar la atmósfera, $I_{on\lambda}$ es la irradiancia solar extraterrestre a la longitud de onda λ, k_λ es el coeficiente de atenuación o extinción de la radiación a la misma longitud de

onda y *m* es el camino óptico o masa óptica atravesada por la radiación en su camino por la atmósfera. Con esta ecuación, se calculan las irradiancias espectrales en las longitudes de onda de 305, 320 y 340 nm sobre la superficie terrestre. El presente atlas contiene el mapa de radiación ultravioleta a 305 nm, que es la longitud de onda característica para estudios de impacto en salud humana, específicamente, para cáncer de piel.

2.2.3 Representación gráfica y cartográfica de los datos (generación de mapas)

Los mapas que representan la irradiación global horizontal, el brillo solar, el número de días sin brillo solar, la radiación ultravioleta y el ozono total, se realizaron mediante varios pasos de análisis y clasificación espacial como son: interpolación, reclasificación, generación del mapa en formato ráster y conversión a formato vector, utilizando las herramientas de análisis de información geográfica propias del ArcGis (versión 10). El sistema de referencia oficial que se utiliza es Magna Sirgas; el sistema de coordenadas es geográfico.

Los métodos de interpolación empleados para este caso corresponden al IDW (ponderación por distancia), utilizado en la irradiación global horizontal, el brillo solar, número de días sin brillo solar y la radiación ultravioleta y el método Spline (curvatura mínima bidimensional) para la columna total de ozono. La salida gráfica de estos mapas se hace en formato jpg y pdf.

2.2.4 Análisis de resultados

Se generan análisis regionales del comportamiento promedio anual y a lo largo del año de cada variable. Para contextualizar el comportamiento medio a nivel nacional, se presentan análisis de las distribuciones medias espaciales a nivel mundial de cada una de las variables.



El atlas contiene un conjunto de mapas climatológicos que representan la distribución promedio de la irradiación global horizontal, el brillo solar, la radiación ultravioleta y el ozono total en Colombia

3

ASPECTOS TEÓRICOS

Desierto de la Tatacoa,

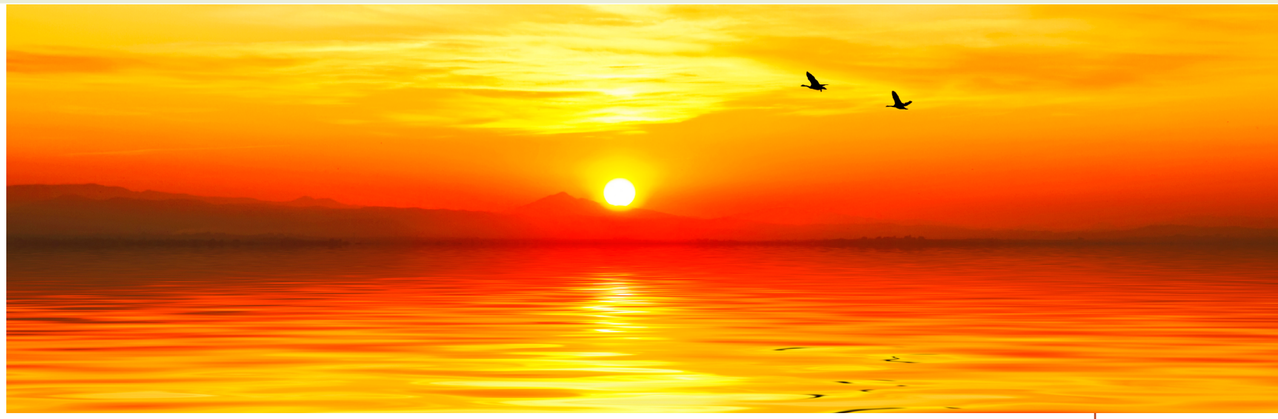
3.1 EL SOL

El Sol es la principal fuente primaria de luz y calor en la Tierra. Un análisis de su composición en función de su masa establece que contiene un 71% de Hidrógeno, un 27% de Helio y un 2% de otros elementos más pesados. Debido a que el Sol es gas y plasma, su rotación cambia con la latitud: un periodo de 24 días en el ecuador y cerca de 36 días en los polos (ver tabla 1). La diferencia en la velocidad rotacional conjuntamente con el movimiento de los gases altamente ionizados generan sus campos magnéticos (ver Figura 3). El Sol es la estrella más próxima a la Tierra y se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros.

Tabla 1. El Sol en números

Masa (kg)	$1{,}989 \times 10^{30}$
Masa (Tierra = 1)	332830
Radio ecuatorial (km)	695000
Radio ecuatorial (Tierra = 1, equivalente a 6367 km en promedio)	108,97
Gravedad en su superficie (Tierra=1)	28
Densidad	1,41
Período Rotacional (días)	25-36
Energía radiada por su superficie (kW/m^2)	63000
Energía emitida por segundo Kilovatios	$3{,}96 \times 10^{23}$
Temperatura media en la superficie	5800 K
Edad (miles de millones de años)	4,5
Componentes químicos principales	**Porcentaje***
Hidrógeno	92,1%
Helio	7,8%
Oxígeno	0,061%
Carbono	0,030%
Nitrógeno	0,0084%
Neón	0,0076%
Hierro	0,0037%
Silicio	0,0031%
Otros	0,0015%

* Porcentaje en función del número de átomos.
(Elaborada y ampliada a partir de: http://www.solarviews.com/span/sun.htm#stats).



El Sol es la principal fuente primaria de luz y calor en la Tierra.

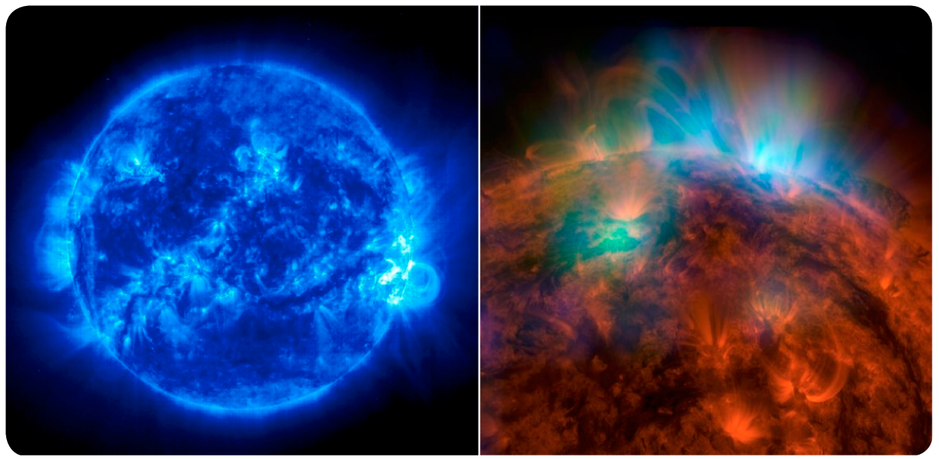
El Sol contiene más del 99% de toda la materia del Sistema Solar y se formó hace 4.600 millones de años. Ejerce una fuerte atracción gravitatoria sobre los planetas y los hace girar a su alrededor.

3.2 ESTRUCTURA SOLAR

El Sol se encuentra formado por seis regiones principales (Figura 4):

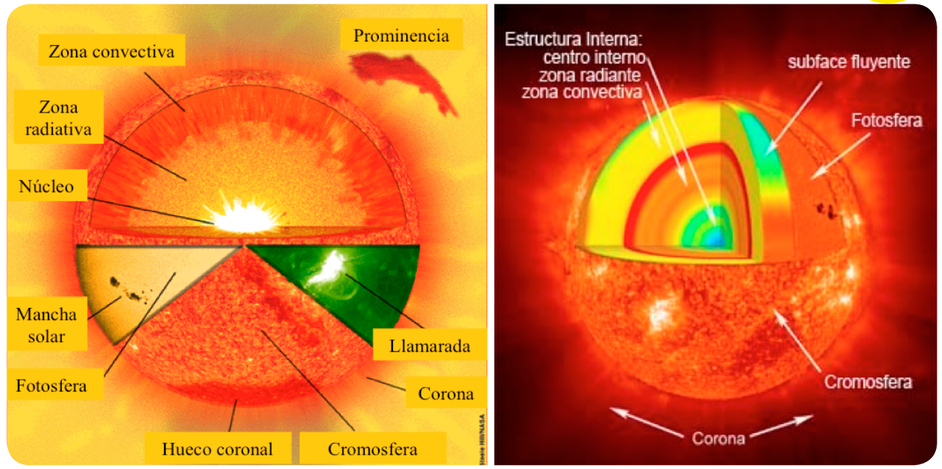
Figura 3. Imágenes del Sol tomadas en canales de luz ultravioleta lejana (171Å) y de rayos X de alta energía, obtenidas por el Observatorio Solar y Hemisférico (SOHO) y por el Observatorio de Dinámica Solar (SDO).

Fuente: NASA.



Fuente: NASA-ECURED.

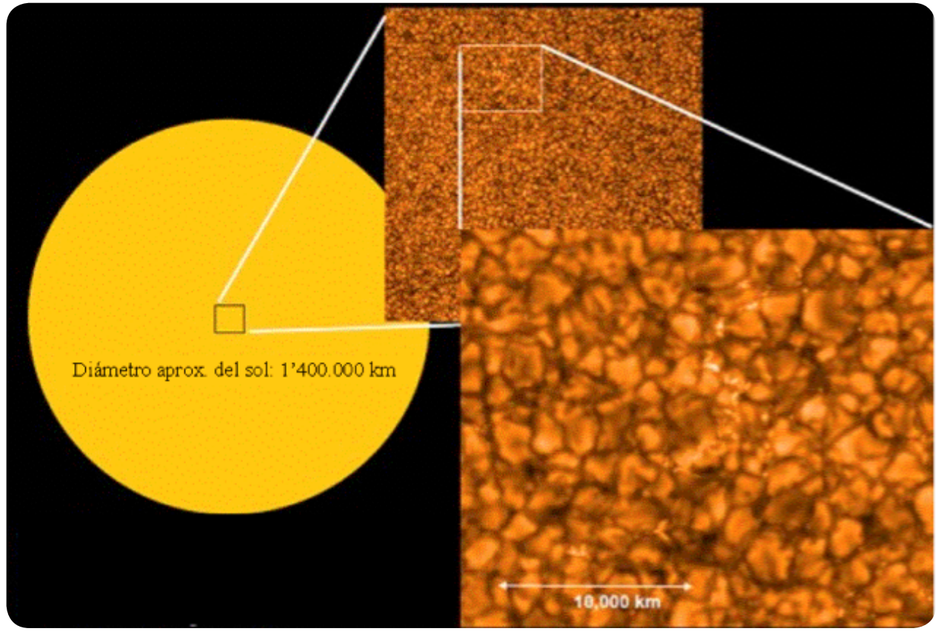
Figura 4. Estructura del Sol. (Fuente: NASA-ECURED).



- ***El núcleo:*** contiene un 40% de la masa del Sol, menos del 2% del volumen total, ocupa un cuarto del radio solar y genera el 90% de su energía, en un proceso de fusión termonuclear en el cual el hidrógeno se transforma en helio. El hidrógeno contenido en el núcleo del Sol se encuentra ionizado como protones, los cuales se fusionan formando núcleos atómicos de helio, liberando energía en el proceso. Su temperatura se estima en 15 millones de Kelvin (K) y su densidad de 150 g/cm^3.
- ***La zona radiativa:*** circunda al núcleo y contiene un gas tan denso que los fotones o radiación electromagnética provenientes del núcleo, duran cientos de miles de años atravesando esta zona para poder llegar a la superficie del Sol. La energía generada en el núcleo se difunde a través de la zona radiativa por absorción y emisión atómica. Las temperaturas en esta región alcanzan los 130000 K. Esta zona está localizada a una distancia entre 160000 y 485000 km del centro solar.
- ***Zona convectiva:*** es una región con mucha agitación donde circula el plasma y los gases ascienden muy calientes, se enfrían y descienden. Esta circulación es el principal mecanismo de transferencia de energía a la superficie solar. Estos procesos convectivos son observados en la superficie del Sol como pequeños gránulos y supergránulos en forma de celdas de 3000 km de radio (Ver Figura 5).

Fuente: NASA.

Figura 5. A partir del Telescopio Solar Óptico, a bordo de la nave japonesa Hinode, se muestra en detalle la granulación solar (celdas convectivas) y en los puntos brillantes entre los gránulos se concentran los campos magnéticos.

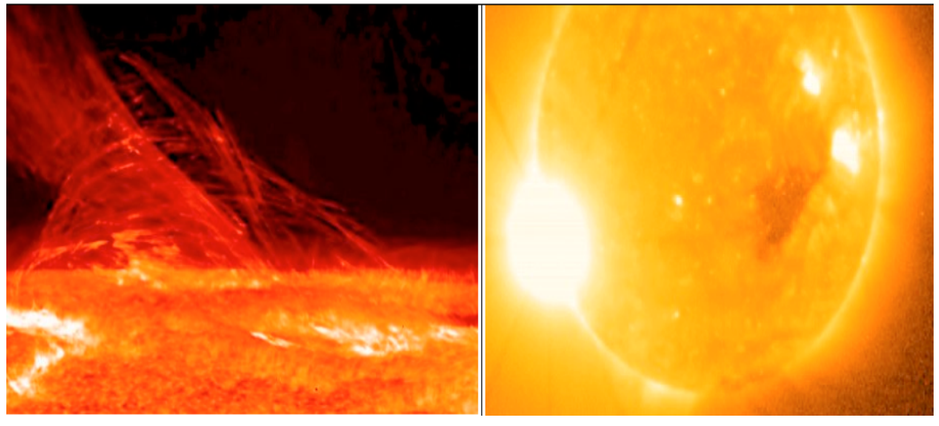


- ***La fotosfera:*** es la superficie visible del Sol que rodea la zona convectiva y posee un espesor de aproximadamente 300 km, es gaseosa y de baja densidad (10^{-8} g/cm^3). Sus gases están fuertemente ionizados y con la capacidad de absorber y emitir radiación. La mayor parte de la radiación solar que nos llega proviene de esta capa, su temperatura es cercana a los 5800 K. En esta zona se observan áreas oscuras llamadas manchas solares, las cuales son las partes más frías de la superficie con temperaturas de 3800 K. Su tamaño es similar al de un planeta; allí se presentan intensos rizos magnéticos. En esta región también se muestran las llamaradas o erupciones solares, estas son las explosiones más poderosas del sistema solar. Poseen un poder explosivo que equivale a cien millones de bombas de hidrógeno y destruyen todo lo que se encuentre cerca de ellas, sin dejar intacto un sólo átomo (ver Figura 6).

La mayoría de las erupciones suceden alrededor de manchas solares, en ellas emergen intensos campos magnéticos de la superficie del Sol hacia la corona. Se cree que la erupción más poderosa de los últimos 500 años sucedió en septiembre de 1859: fue observada por el astrónomo británico Richard Carrington y dejó rastros en el hielo de Groenlandia en forma de nitratos y berilio-10, por ello se pude medir su potencia aun hoy.

Fuente: NASA.

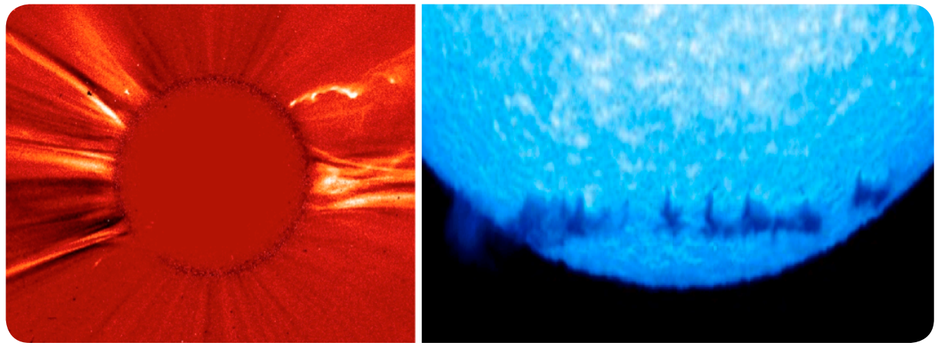
Figura 6. A la izquierda una erupción solar registrada por la nave espacial Hinode de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). A la derecha se presenta una de las erupciones solares más intensas de los últimos 30 años, captada el 5 de diciembre de 2006 por la Cámara para Imágenes Solares de Rayos-X, ubicada en el satélite GOES-13 de la NOAA.



- ***La cromosfera:*** está justo sobre la fotosfera, es una fina región de gas que se observa con un color rojizo-anaranjado, de unos 10000 km de espesor. Es esencialmente transparente a la radiación emitida desde la fotosfera.
- ***La corona:*** es la tenue atmósfera exterior compuesta de un halo, el cual, solo se ve durante los eclipses totales de Sol.

Fuente: NASA.

Figura 7. La atmósfera externa del Sol o "corona". En la figura izquierda se muestra el halo coronal y adicionalmente una erupción (derecha de la figura) hacia el ecuador del Sol el 21 de agosto de 1996. A la derecha se muestra la corona polar del sur del Sol.

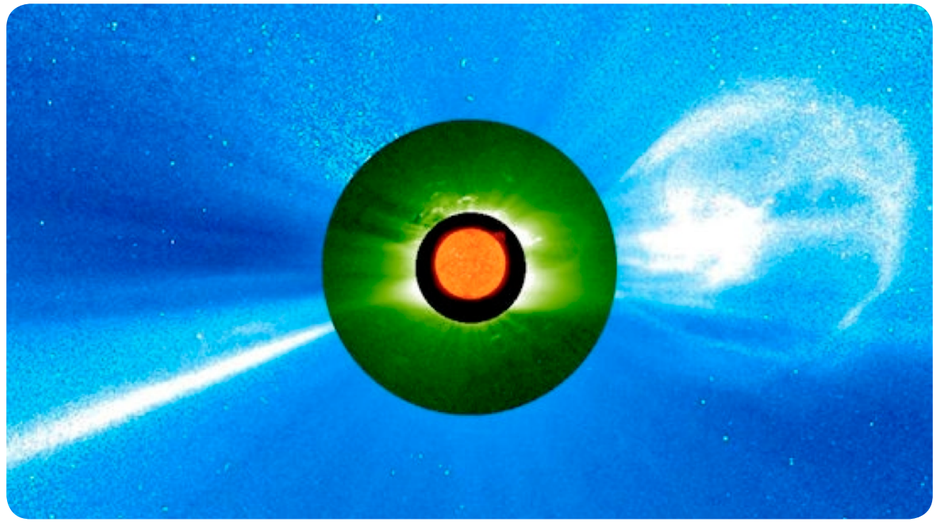


Finalmente tenemos:

- **Las eyecciones de masa coronal (CMEs, por su sigla en idioma inglés) del Sol:** son nubes de plasma hechas de radiación y viento solar que se desprende del Sol en el periodo de máxima actividad solar, este hecho ocurre cada 11 años (ver Figura 8). Esta onda (o nube) es muy peligrosa ya que si llega a la Tierra y su campo magnético está orientado al sur puede dañar los circuitos eléctricos, los transformadores y los sistemas de comunicación, además, reducir el campo magnético de la Tierra por un período. Cuando esto ocurre, se dice que hay una tormenta solar. Sin embargo, si está orientada al norte rebotará inofensivamente en la magnetosfera.
- **El viento solar:** es una corriente de partículas cargadas expulsadas de la atmósfera superior del Sol (o de una estrella en general). Este viento consiste principalmente de electrones y protones con energías por lo general entre 10 y 100 keV. El flujo de partículas varía en la temperatura y la velocidad con el tiempo. Estas partículas pueden escapar de la gravedad del Sol debido a su alta energía cinética y temperatura de la corona. El viento solar crea la heliosfera, una burbuja enorme en el medio interestelar que rodea el Sistema Solar.

Fuente: NASA.

Figura 8. Eyección de masa coronal (CME), observada por la nave Stereo de la NASA el 12 de diciembre de 2008.



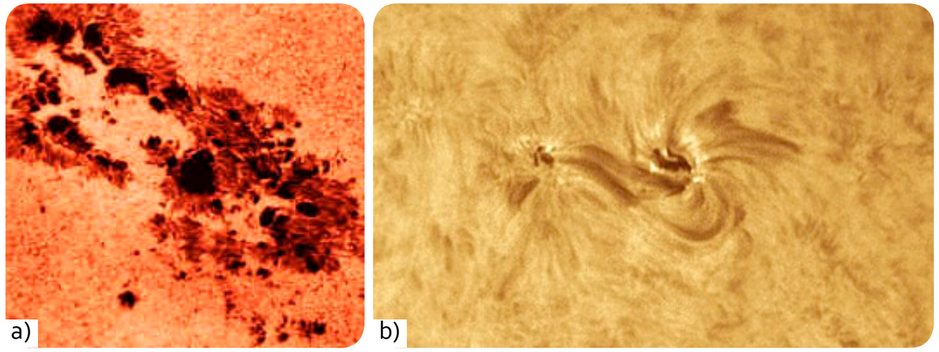
3.3 CICLO SOLAR

La energía producida por el Sol no se emite uniformemente a través de su superficie, sino que sufre variaciones, con épocas de emisión máxima y otras de mínima, con un período aproximado de 11 años. Este período se conoce como el Ciclo Solar y se determina por el número de manchas solares. La luminosidad de nuestro Sol varía apenas un 0,1% a lo largo de su ciclo solar. Sin embargo, estas aparentemente diminutas variaciones pueden tener un efecto significativo sobre el clima de la Tierra.

En la fotosfera (capa exterior del Sol que se ve), se forman las manchas solares (Ver Figura 9), que son regiones de la superficie solar representadas por zonas oscuras, frías, extremadamente magnetizadas y efímeras, cuyo diámetro puede superar los 130000 Km. Las temperaturas en los centros oscuros de las manchas solares caen a unos 3700 K (en comparación con los 5800 K que hay en la fotosfera circundante). Una mancha solar sólo dura unos pocos días o semanas antes de desaparecer y tan pronto como una de ellas desaparece, otra emerge y toma su lugar.

Fuente: NASA.

Figura 9. (a) Manchas solares. (Fuente: Solarviews). (b) Se observa una de las manchas solares más grande del ciclo número 24, formada el 31 de octubre de 2008. Esta mancha tenía dos núcleos oscuros cada uno más ancho que el diámetro de la Tierra, los cuales estaban conectados por filamentos magnéticos activos de miles de kilómetros de longitud.



En las manchas solares las líneas de los potentes campos magnéticos del Sol (miles de veces más fuertes que el campo magnético de la Tierra) emergen de la fotosfera y forman extensos bucles magnéticos locales. Estas erupciones se deben a que la parte ecuatorial de la superficie solar gira más rápido que en las otras latitudes. Los potentes campos magnéticos presentes en las manchas inhiben el flujo local de calor procedente de las capas inferiores, de forma que son entre unos 1500 K y 2000 K más frías y por tanto más oscuras que el resto de la superficie visible.

El número de manchas solares en el Sol no es constante y cambia en el período de 11 años en promedio (ver Figura 10), estando la actividad solar directamente relacionada con ese ciclo. Cada once años las manchas desaparecen y cuando nuevamente aparecen tienen invertida la polaridad. El período promedio de un ciclo solar es de 131 meses, con una desviación estándar de 14 meses.

Los extremos del ciclo son el mínimo solar y el máximo solar. El ciclo solar no es exactamente de 11 años. Su longitud, medida desde el mínimo hasta el máximo, varía: el más corto puede ser de 9 años y el más largo de 14. En el máximo, el Sol se encuentra salpicado con manchas, intensas ráfagas, erupciones solares y arroja miles de millones de toneladas de nubes y gas electrificado hacia la Tierra. Es un buen momento para observar las auroras (en Florida, EE. UU. es posible verlas). La actividad

magnética que acompaña a las manchas solares puede producir cambios dramáticos en los niveles de emisiones ultravioleta y de rayos X. Fluctuaciones en la potencia eléctrica, satélites inutilizados, defectos en el funcionamiento de los dispositivos GPS son ejemplos de lo que puede pasar durante el máximo de actividad solar. Los máximos solares pueden ser intensos como el del año 1957, o apenas detectables como el de 1805 (ver Figura 10a). El mínimo solar es diferente. Las manchas solares son pocas, o a veces pueden pasar días o semanas sin una mancha. Las llamaradas solares disminuyen.

El mínimo más largo del que se tenga registro, es el Mínimo de Maunder (1645-1715, ver Figura 10c), duró un increíble período de 70 años, ya que raramente se observaron manchas solares y el ciclo solar parecía haberse roto por completo. El período de calma coincidió con una Pequeña Edad de Hielo y una serie de inviernos extraordinariamente fuertes en el hemisferio norte de la Tierra. Muchos investigadores están convencidos de que esa baja actividad solar, conjuntamente, con un aumento de la actividad volcánica y posibles cambios en patrones de corrientes oceánicas, desempeñaron un papel en el enfriamiento del siglo XVII. Por razones que nadie entiende, el ciclo de manchas solares revivió en los inicios del siglo XVIII y ha continuado desde entonces con el familiar período de 11 años.

Desde que los investigadores comenzaron a numerar los ciclos solares a mediados del siglo XVIII han ocurrido 24 de ellos. Durante este tiempo, la depresión en la actividad solar más grande tuvo lugar a principios del siglo XIX y se ha denominado el Mínimo de Dalton.

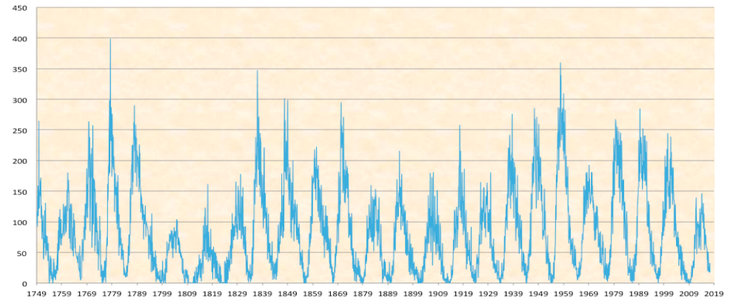
El número de manchas solares es el mejor indicador conocido de la actividad solar y sirve para predecir, con años de anticipación, cuándo aparecerán los próximos picos y valles. El último máximo del ciclo solar ocurrió entre los años 2000 y 2003 (ver Figura 11) y tuvo muchas tormentas solares. Ese ciclo decayó, como se esperaba, hasta llegar a la quietud a finales del año 2007 y persistió sobre el 2008. Es de anotar que este mínimo solar particularmente fue más largo de lo usual.

La relación entre el clima y la actividad solar es fuerte y la variabilidad solar es tomada como la principal y única fuente natural de la variabilidad del clima de la Tierra. Se han efectuado relaciones entre el ciclo de once años de las manchas solares con el clima y parece existir una respuesta en el comportamiento de algunos parámetros climáticos, como la cantidad de ozono estratosférico y la temperatura de la Tierra y su atmósfera.

Figura 10. Número de manchas solares pasadas y futuras.

Fuente WDC-SILSO

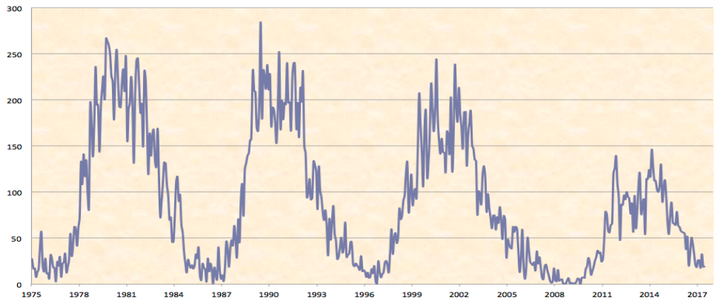
Número de manchas solares 1749-2017



a) Promedio mensual del número de manchas solares diarias entre 1749 y 2017.

Fuente: IDEAM a partir de datos de la WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium.

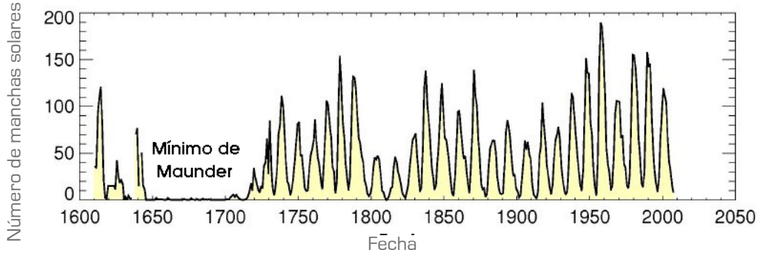
Número de manchas solares 1975-2017



b) Promedio mensual del número de manchas solares diarias entre 1975 y 2017.

Fuente: IDEAM a partir de datos de la WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium.

Promedio anual del número de manchas solares 1610-2007

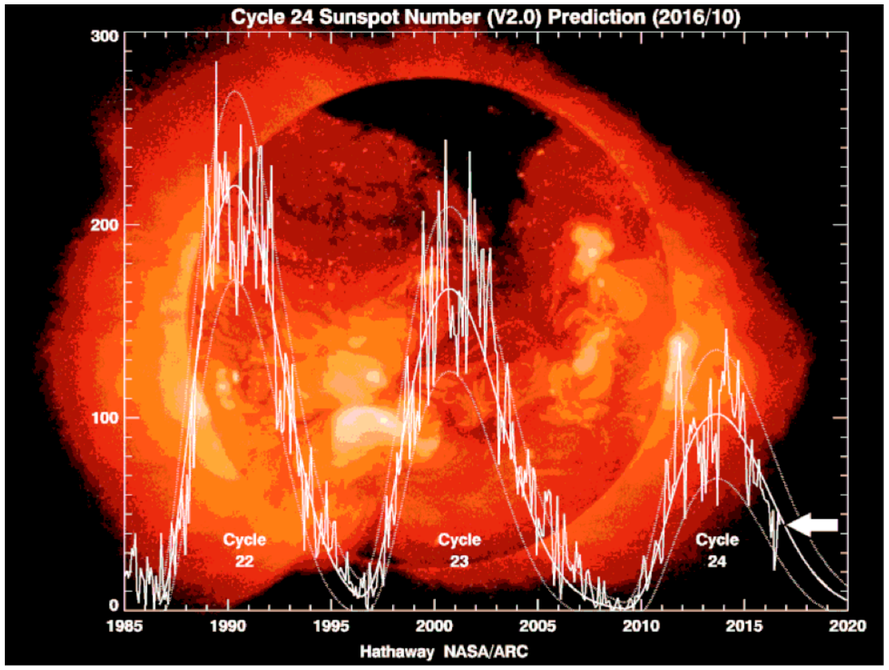


c) Promedio anual de manchas solares pasadas (1610-2010)

Fuente: NASA.

Fuente: NASA.

Figura 11. Predicción del número de manchas solares según el Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA.



3.4 RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA

3.4.1 Distancia Tierra-Sol

La Tierra en su movimiento alrededor del Sol describe una órbita elíptica, algo desproporcionada, con uno de sus extremos un poco más cerca del Sol que el otro y en la cual la distancia promedio Tierra-Sol es de aproximadamente 149,46 x 10^6 km (aprox. 1,5 x 10^{11} m), valor llamado Unidad Astronómica (U.A.). La excentricidad de la órbita de la Tierra es del 1,7%.

La orbita de la Tierra se puede describir en coordenadas polares mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{UA\,(1-e^2)}{(1+ e\cos \mathbf{a})} \quad (3\text{-}1)$$

Donde:

R = Distancia tierra sol para cualquier día del año.

UA = Unidad Astronómica

e = excentricidad de la órbita terrestre (*e* = 0,01673)

a = posición angular de la Tierra en la órbita, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

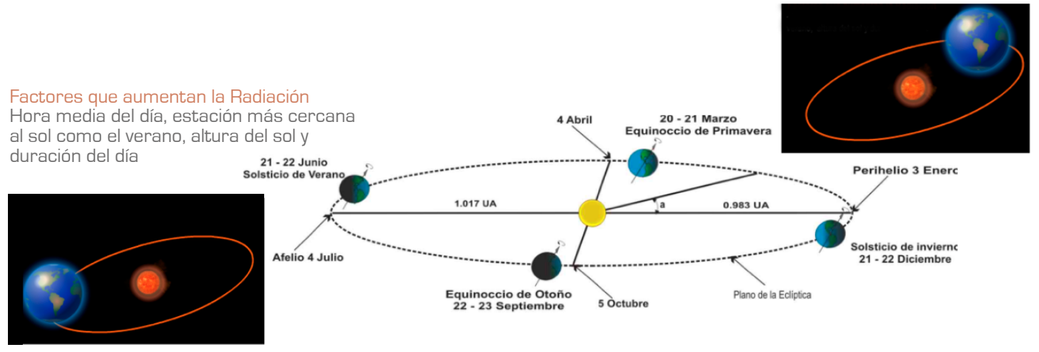
$$\mathbf{a} = \frac{2\pi\,(nd-1)}{365} \quad (3\text{-}2)$$

nd = día juliano del año (día consecutivo y va desde 1 el primero de enero hasta 365 el 31 de diciembre)

Figura 12. Movimiento de la tierra alrededor del Sol.

Fuente: Atlas, 2005 y http://www.indiceuv.cl/informacion.html

Factores que aumentan la Radiación
Hora media del día, estación más cercana al sol como el verano, altura del sol y duración del día



En la Figura 12, se muestra la posición angular (a) de la Tierra en la órbita. Cuando a = 0° la Tierra se encuentra más cerca del Sol (Perihelio), esto ocurre en enero y la distancia Tierra-Sol es de R = UA (1-e) = 0,983UA = 147,5 millones de km. En julio, cuando a = 180°, la Tierra se encuentra en la posición más alejada del Sol (Afelio), con una distancia Tierra-Sol de R = UA (1+e) = 1,017UA = 152,6 millones de km.

Un Sol distante significa menos radiación solar para nuestro planeta. La radiación del Sol en promedio sobre la Tierra durante el afelio es aproximadamente un 7% menos intensa de lo que es durante el perihelio sobre el globo.

La distancia R se puede calcular para cada día del año, mediante la siguiente ecuación determinada por J.W. Spencer:

$$Eo = (Ro/R)^2 = 1{,}00011 + 0{,}034221\,Cosa + 0{,}00128\,Sena + 0{,}000719\,Cos2a + 0{,}000077\,Sen2a \quad (3\text{-}3)$$

Donde:

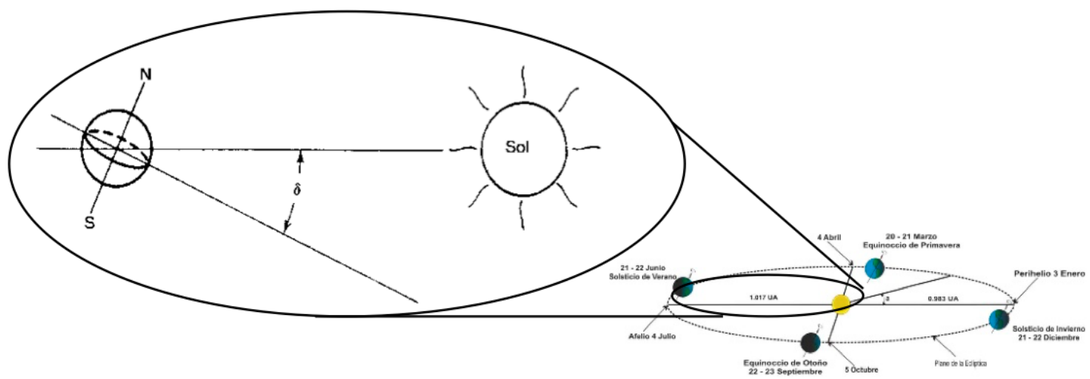
Ro = Distancia promedio de la Tierra al Sol (1 U.A),

Eo = Conocido como el factor de corrección por excentricidad de la órbita terrestre.

Cuando se analiza el movimiento de rotación y translación de la Tierra se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de translación alrededor del Sol, tiene una inclinación de aproximadamente 23,45°. Los patrones climáticos de las estaciones se originan principalmente por la inclinación del eje de rotación. El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar (δ), como se aprecia en la Figura 13. El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur.

Fuente: Atlas, 2005.

Figura 13. Declinación solar.



Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, el valor del ángulo varía durante el año. Su valor varía entre -23,45°, cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur en el Solsticio de invierno (22 de diciembre) y +23,45° cuando se halla en la parte más alta del hemisferio norte, en el Solsticio de verano (21 de junio), siendo el día más largo del año. Dos veces en el año toma el valor de cero, cuando el Sol pasa sobre el ecuador terrestre, durante los equinoccios (de otoño el 23 de septiembre, y el de primavera el 21 de marzo). En el equinoccio (del latín: noche igual) la noche y el día tienen la misma duración en todos los lugares de la Tierra.

Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, el valor de la declinación solar varía cada día durante el año y puede calcularse mediante la siguiente fórmula, con un error máximo de 0,0006 rad.

$$\delta = (0{,}006918 - 0{,}399912\,Cosa + 0{,}070257\,Sena - 0{,}006758\,Cos\,2a + 0{,}00097\,Sen2a - 0{,}002697\,Cos3a + 0{,}00148\,Sen3a)\,(180/\pi) \quad (3\text{-}4)$$

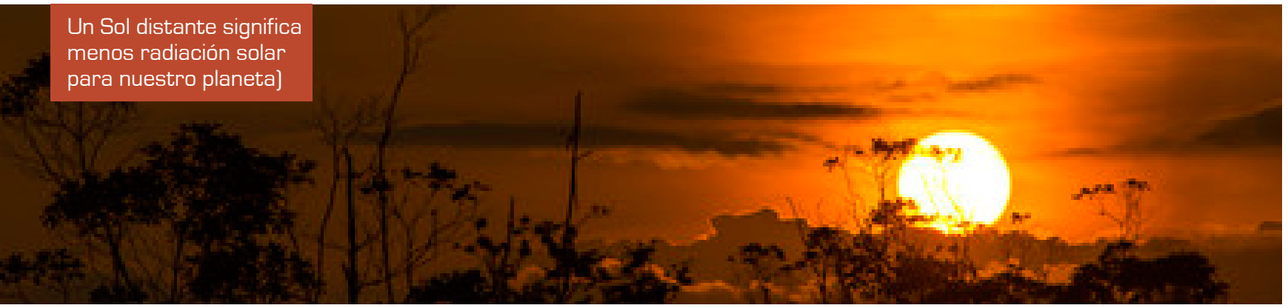
Donde a es la posición angular de la tierra en la órbita de giro alrededor del Sol, la cual se expresa en grados.

3.4.2 Variación de la radiación solar en el límite superior de la atmósfera

Como la distancia Tierra-Sol cambia durante el año debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol (translación), se origina una variación de la irradiancia solar incidente sobre una superficie normal al rayo solar en el límite superior de la atmósfera durante los meses del año como se ilustra la Figura 14.

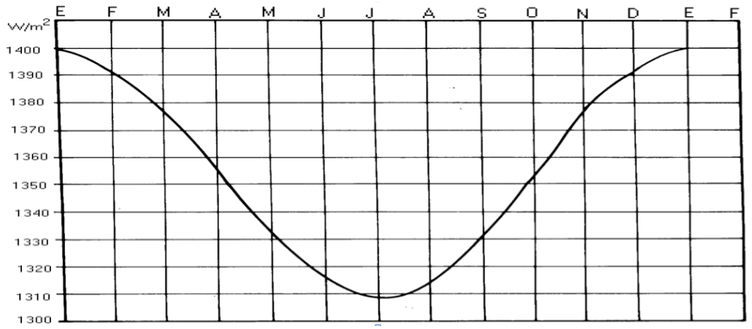
3.4.3 Sistemas de coordenadas para determinar la posición del Sol

La posición del Sol en la esfera celeste se puede determinar mediante los sistemas de coordenadas horizontales y ecuatoriales.



Fuente: Atlas, 2005.

Figura 14. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre durante los meses del año. (Fuente: Atlas, 2005).

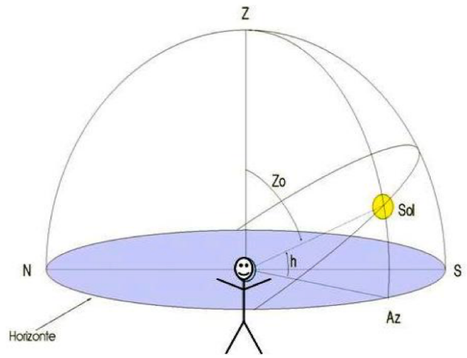


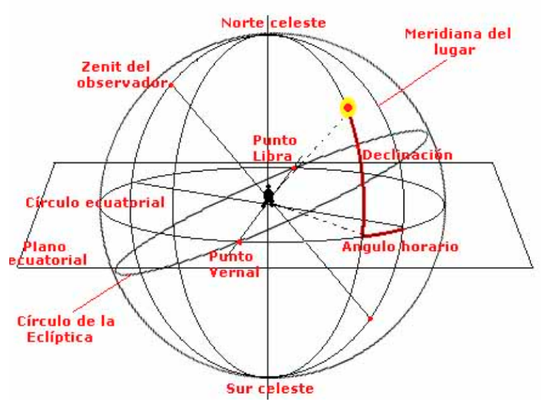
3.4.3.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales

En este sistema, ilustrado en la Figura 15(a), se determina la posición del Sol mediante los ángulos llamados azimut (Az) y la distancia zenital (Zo) o su complemento, la altura solar (h). La distancia zenital es la distancia angular entre el zenit del observador (Z) y la posición del Sol. Su complemento, la altura solar (h), es la distancia angular entre el horizonte del observador y el Sol. El azimut es la distancia angular, medida desde el sur (S) del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano del Sol que pasa por el zenit del observador,(Az es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste, por lo tanto varía entre $-180 \geq Az \leq 180$). Estas coordenadas son de carácter local, ya que están ligadas a cada lugar de observación en particular.

Figura 15. Sistema de coordenadas celestes: (a) horizontales y (b) ecuatoriales.

Fuente: Atlas, 2005.





3.4.3.2 *Coordenadas celestes ecuatoriales*

También llamado sistema de coordenadas ecuatoriales locales, por usar como plano fundamental el plano ecuatorial de la Tierra. A diferencia de las coordenadas horizontales, las ecuatoriales no son de carácter local, puesto que están referidas a la esfera celeste. En el sistema ecuatorial, la posición del Sol está determinada por la declinación (δ, ver figuras 13 y 15(b)) y el ángulo horario (ω). El ángulo horario es el ángulo sobre el círculo ecuatorial, contado desde el punto de intersección del meridiano del observador (o lugar) con el círculo ecuatorial, hasta el círculo horario del Sol, en sentido horario. El origen del ángulo horario es el punto sur del observador, que es la intersección de la meridiana del lugar (pasa por el zenit del observador y por el polo norte celeste) con el círculo ecuatorial.

- Rango de medida de la declinación: de 0° a +90° hacia el polo norte celeste y de 0° a -90° hacia el polo sur celeste.
- Rango de medida del ángulo horario: se expresa en unidades de arco (grados) o en unidades de tiempo (horas), su conversión es: 1 hora = 15°. En el segundo caso el rango es de 0 a 24 horas en el sentido de las agujas del reloj.

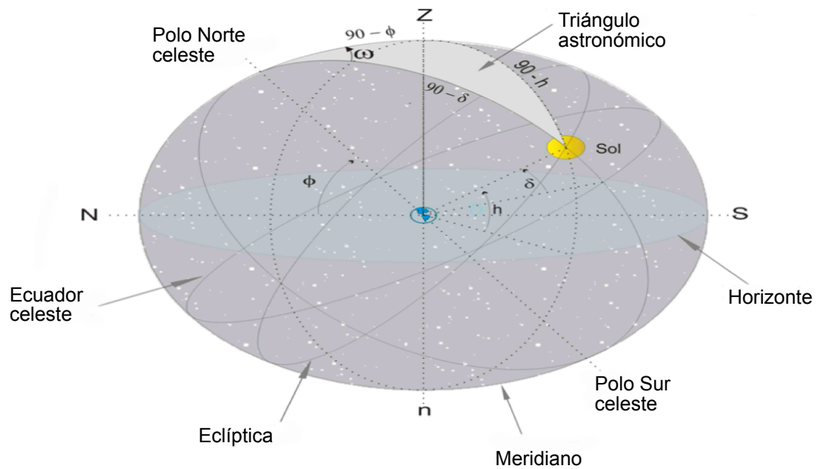
El Sol es la estrella más próxima a la Tierra y se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros

3.4.3.3 Posición del Sol en el triángulo astronómico

Combinando los dos sistemas de coordenadas, horizontales y ecuatoriales, se determina el triángulo astronómico en la esfera celeste que aparece en la Figura 16, el cual está conformado por el polo norte, el zenit (Z) y el Sol, en otras palabras, resulta de proyectar el meridiano del lugar (el que pasa por el zenit y los polos), el círculo horario (que pasa por los polos y el Sol) y la vertical del Sol (círculo que pasa por el zenit, el nadir y el Sol).

Fuente: Atlas, 2005.

Figura 16. El triángulo astronómico.



ω= Ángulo horario.
O= Punto del observador
N= Norte geográfico
S= Sur geográfico
Z= Zenit del observador
n= Nadir
Φ= Latitud geográfica
z= Cenit del lugar
δ= Declinación Solar

A partir de la posición del Sol en este triángulo esférico, es posible determinar el ángulo de incidencia de la luz solar sobre una superficie horizontal o inclinada sobre la superficie terrestre por medio de las igualdades que se deducen del triángulo astronómico mediante el empleo de la trigonometría esférica.

$$\text{Cos}(90\text{-}h) = \text{Cos}(90 - \Phi)\,\text{Cos}(90 - \delta) + \text{Sen}(90 - \Phi)\,\text{Sen}(90 - \delta)\,\text{Cos}\,\omega \qquad (3\text{-}5)$$

Donde h es la altura del Sol sobre el horizonte geográfico, Φ es la latitud geográfica del lugar de observación, δ es la declinación del Sol para el día del año en que se realiza la observación y ω es el ángulo horario al momento de la medición de la radiación solar.

3.4.4 Altura del Sol (h)

Es el ángulo formado entre el plano del horizonte geográfico y la línea trayectoria del rayo solar que llega a una superficie normal a dicho rayo en la superficie terrestre (ver Figura 15) y se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Sen}\,h = \text{Sen}\,\Phi\,\text{Sen}\,\delta + \text{Cos}\,\Phi\,\text{Cos}\,\delta\,\text{Cos}\,\omega \qquad (3\text{-}6)$$

De esta forma la altura del Sol queda en función de la latitud del lugar, la declinación del Sol y el ángulo horario al momento de medida de la radiación solar.

3.4.5 Duración astronómica del día (N)

Es la duración del día en horas desde la salida hasta la puesta del Sol. Se determina a partir de la ecuación (3-6), considerando h=0º y h=180º para la salida y puesta del Sol, respectivamente. Despejando el ángulo horario ω y de allí la duración del día. Cuando h = 0 ó 180;

$$\cos\omega = \frac{-\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta}{\cos\phi\cos\delta} \qquad (3\text{-}7)$$

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi\cdot\tan\delta \qquad (3\text{-}8)$$

La duración del día se determina duplicando el ángulo horario ω_s ("s" de salida del Sol) y dividiéndolo entre 15 para pasar de grados a horas.

$$N = \frac{2}{15}\arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \qquad (3\text{-}9)$$

La ecuación (3-9) es válida si el valor absoluto de (-tanφtanδ) ≤ 1. En las latitudes altas (mayores de 66.6°), donde dependiendo de la época del año no se satisface esa condición, implica que los días pueden tener una duración igual a 24 horas, el Sol no se oculta, o es igual a cero horas, el Sol se mantiene por debajo del horizonte dependiendo del día del año.

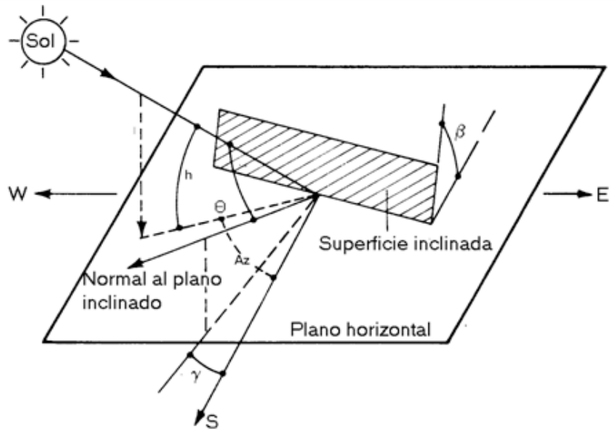
3.4.6 Dirección del haz de radiación

La relación geométrica entre un plano con una orientación dada relativa a la Tierra y el haz de radiación solar, como se ilustra en la Figura 17, puede ser determinada a partir de la ecuación:

$$\cos\theta = \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos w - sen\,\delta\cos\phi\,sen\,\beta\cos\gamma + sen\,\delta\,sen\,\phi\cos\beta + \cos\delta\,sen\,\phi\,sen\,\beta\cos\gamma\cos w + \cos\delta\,sen\,\beta\,sen\,\gamma\,sen\,w \quad (3\text{-}10)$$

Fuente: Atlas, 2005.

Figura 17. Dirección del haz de radiación solar. (Fuente: Atlas, 2005).



Donde:

β= ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal o ≥ β ≤ 180°.

γ= ángulo azimut sobre la superficie, el cual se define en la sección de coordenadas celestes horizontales.

θ= ángulo de incidencia formado por el haz de radiación sobre una superficie y la normal a la superficie.

3.4.7 Angulo horario (ω)

La precisión con que se calcula este ángulo (cuya definición se presenta en la sección 3.4.3.2), depende de la exactitud con que se determine el paso del Sol sobre el lugar de observación, en el momento en que se esté midiendo la intensidad de la radiación solar y para esto es necesario conocer la hora real del paso del Sol (tiempo solar verdadero-TSV o LAT (local apparent time, en inglés)), que es diferente de la hora local del país.

El ángulo horario se calcula en magnitud tiempo a partir del mediodía solar así:

$$\omega = 12 - TSV \quad (3\text{-}11)$$

El TSV se determina mediante la siguiente igualdad:

$$TSV = TSM + 4\,(L_s - L_L) + E_T \quad (3\text{-}12)$$

Donde:

TSM = Tiempo solar medio, corresponde a la hora local

L_s = Longitud geográfica del meridiano de referencia del país (75°)

L_L = Longitud geográfica del meridiano del lugar

E_T = Ecuación de tiempo de la ecuación

El factor 4 de la ecuación es para convertir directamente a minutos la diferencia de las dos longitudes geográficas que son medidas en grados.

3.4.8 Ecuación del tiempo (E_T)

El tiempo solar verdadero se determina con base a la rotación de la tierra sobre su eje polar y alrededor del Sol. El giro sobre su eje polar se considera en 24 horas, pero en realidad no lo realiza en ese tiempo, sino que varía a lo largo del año por su desplazamiento elíptico alrededor del Sol. Las 24 horas de giro diario sería como si la Tierra girara en forma circular alrededor del Sol y no en forma elíptica. A esta diferencia de tiempo de giro se conoce como ecuación del tiempo (E_T) y tiene una variación diaria hasta de 16 minutos. Spencer también formula una ecuación para calcular diariamente la E_T:

$$(E_T) = (0{,}000075 + 0{,}001868\ Cosa - 0{,}032077\ Sena - 0{,}014615\ Cos2a - 0{,}04089 Sen2a)\ (229{,}18) \quad (3\text{-}13)$$

En el Anexo 13 se presenta un ejemplo de cálculo de las variables astronómicas para determinar la radiación solar global sobre una superficie horizontal.

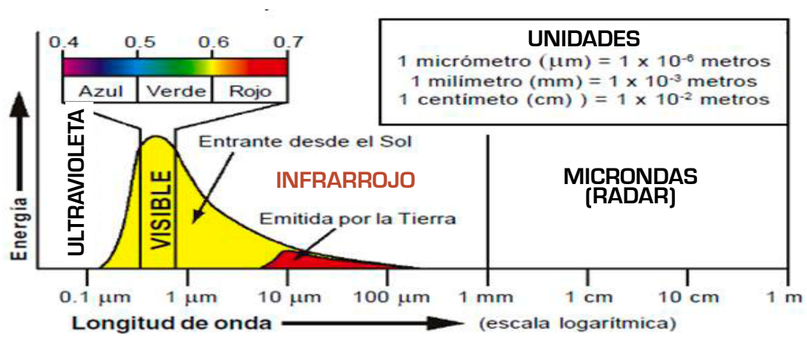
3.5 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, esta se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y se genera en las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear, también, es emitida por la superficie solar. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, en la cual sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

Fuente: ENVIV4.5.

Figura 18. Energía radiada por el Sol y la Tierra.



La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda, la cual puede ser calculada usando la Ley de Planck:

$$E_\lambda = a / [\lambda^5 \{e^{(b/\lambda T)} - 1\}] \quad (3\text{-}14)$$

Donde, E_λ es la cantidad de energía ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) emitida a una longitud de onda específica λ (µm: micrómetro equivalente a $1x10^{-6}$m) por un cuerpo con una temperatura T (en Kelvin), con a y b como constantes. Asumiendo que el Sol es un cuerpo negro, por diferenciación de la ecuación es posible determinar la longitud de onda máxima de emisión de radiación procedente del Sol:

$$\lambda = 2897 / T \quad (3\text{-}15)$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Wien. Para una temperatura de 5.800 K (temperatura de la superficie solar) la longitud de máxima energía es aproximadamente 0,5 µm. (ver figuras 18 y 19). Esta longitud de onda corresponde a radiación en la parte del espectro visible. Mientras que el máximo de energía radiante del Sol se produce en λ~0,5 µm, para la Tierra se presenta en λ~10 µm.

A través de la integración de la ecuación (3-14) resulta la ley de Stefan-Boltzmann, por medio de la cual se puede determinar el total de energía emitida por el Sol:

$$E_{Total} = \sigma T^4 \quad (3\text{-}16)$$

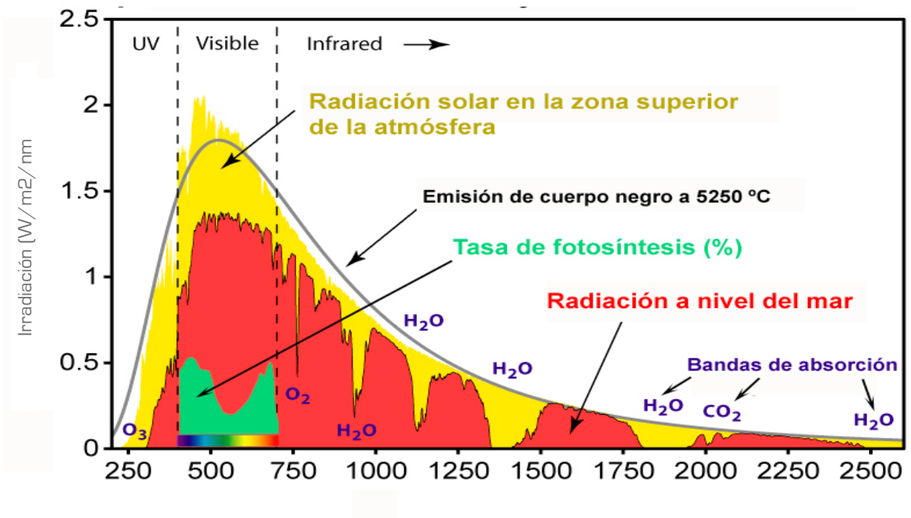
donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (con un valor de $5{,}6697x10^{-8}$ $W/m^2°K^4$). Resolviendo la ecuación 3-16 para una temperatura solar de 5.800 °K, la energía total de salida es de aproximadamente 64 millones W/m^2, de la cual, la Tierra solo intercepta 1.367 W/m^2.

En la Figura 19, el área amarilla representa la solución ideal de la Ley de Plank de la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, en esta el punto más alto de la curva representa la longitud de onda con la mayor energía espectral (0,5µm, equivalente a 500 nm) de acuerdo con la Ley de Wien y el área bajo la curva representa la cantidad total de energía recibida (1.367 W/m^2). Finalmente, el área roja constituye el espectro

de la radiación solar a nivel marino para condiciones de cielo claro, después de la absorción atmosférica debida a diferentes gases.

Fuente: Phinet.

Figura 19. Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (área amarilla) y a nivel del mar para condiciones de cielo despejado (área roja).



El estudio del espectro de la radiación solar que llega a la superficie del suelo permite establecer que la radiación de longitud de onda menor que 200 nm (que es la más peligrosa), es absorbida totalmente por la atmósfera. A su vez esta energía es absorbida en la atmósfera por el oxígeno molecular (O_2), el ozono (O_3) y el vapor de agua (H_2O).

3.6 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

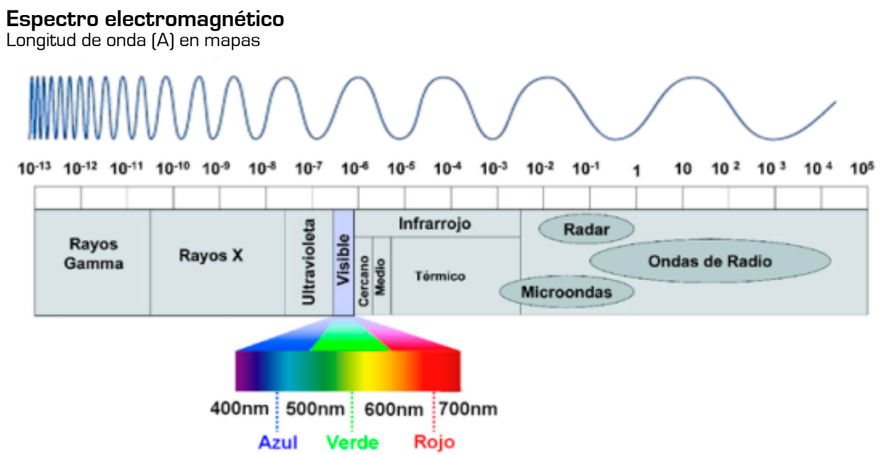
La energía solar llega en forma de radiación electromagnética, estas son ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, por lo que pueden atravesar el espacio y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (μ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión λμ = C (donde C es la velocidad de la luz) son importantes para determinar su energía, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de C = 299792 km/s.

La longitud de onda de la luz es tan corta, por ello, suele expresarse en nanómetros (nm), que equivalen a una milmillonésima de metro, o una millonésima de milímetro o en micrómetros (μm) que equivalen a una millonésima de metro.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la Figura 20, que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético. Los fotones que se mueven a la velocidad de la luz son emitidos o absorbidos por la materia.

Figura 20. Espectro electromagnético.

Fuente: Luminousphoto.



El Sol emite energía principalmente en la banda del ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano (ver Figura 20), esta última tiene entre 0,70 µm y 4,0 µm. Aproximadamente un 99 % de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está contenida en la región entre 0,2 a 4,0 µm y se denomina radiación de onda corta, mientras que la mayor parte de la radiación terrestre se encuentra en la región entre 5,0 a 100,0 µm.

La región visible (entre 0,4 µm < λ < 0,7 µm) corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta (0,42 µm ó 420 nm), azul (0,48 µm), verde (0,52 µm), amarillo (0,57 µm), naranja (0,60 µm) y rojo (0,70 µm). La luz de color violeta es más energética que la luz de color rojo, porque tiene una longitud de onda más pequeña. La radiación con las longitudes de onda más corta que la correspondiente a la luz de color violeta es denominada radiación ultravioleta, la cual está entre 0,10 µm y 0,42 µm. Los distintos colores de luz tienen en común el ser radiaciones electromagnéticas que se desplazan con la misma velocidad. Se diferencian en su frecuencia y longitud de onda. Las hojas y las plantas se ven verdes, porque reflejan energía en longitudes de onda verde del espectro con λ ≈ 0,55 µm. La radiación en el rango visible del espectro, en el caso de las plantas, se define como "radiación fotosintéticamente activa". (PAR por sus siglas en inglés).

A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera (denominada radiación solar extraterrestre) distribuida así: 7,2% al ultravioleta; 47,2% al visible y 45,6% al infrarrojo cercano.

3.7 CONSTANTE SOLAR

En el tope de la atmósfera, a una distancia promedio de 150 x 10^6 km del Sol, el flujo de energía de onda corta interceptada por una superficie normal a la dirección del Sol, en vatios por metro cuadrado (W/m^2), es llamada constante solar. Este valor da una idea de los valores que se registran en el tope de la atmósfera y de los que finalmente llegan a la superficie de la Tierra durante el día como consecuencia de las "pérdidas" de radiación por fenómenos como la reflexión, refracción y difracción (procesos de atenuación) durante su trayectoria.

La irradiancia solar llega al tope de la atmósfera de la Tierra (Io), también denominada como irradiación solar total – IST, puede ser calculada al asumir que el flujo solar es constante, por lo tanto:

$$I_o \times 4\pi R_{es}^2 = E_{(Sol)} \times 4\pi R_s^2. \qquad (3\text{-}17)$$

Donde R_{es} es la distancia media entre la Tierra y el Sol (aprox. 1,5 x 10^{11} m) y R_s es el radio aproximado del Sol (aprox. 7 x 10^8 m).

La irradiancia de la radiación electromagnética del Sol ($E_{(Sol)}$) está dada por:

$$E_{(Sol)} = dQ / dt / dA \qquad (3\text{-}18)$$

Donde dQ / dt es el flujo radiante del Sol, el cual es cercano a 3,90 x 10^{26} vatios.

$$E_{(Sol)} = \frac{3{,}90 \times 10^{26}}{4\pi (7 \times 10^8)^2} = 6{,}34 \times 10^7 \ W/m^2 \qquad (3\text{-}19)$$

Despejando la ecuación, se obtiene:

$$I_o = 6{,}34 \times 10^7 \ (7 \times 10^8 / 1{,}5 \times 10^{11})^2 = 1380 \ W/m^2 \qquad (3\text{-}20)$$

Según el Centro de Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference - WRR) del Centro Mundial de Radiación (World Radiation Center - WRC), la constante solar tiene un valor aproximado de:

I_o = 1.367 W/m^2
= 433,3 $Btu/(ft^2*h)$
= 1,96 $cal/(cm^2*min)$

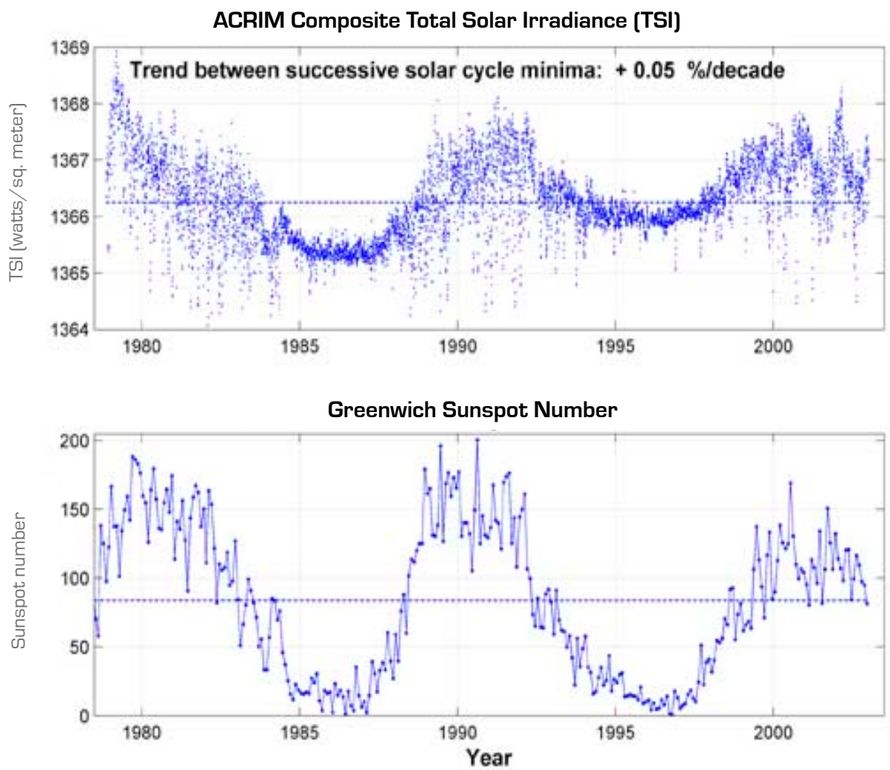
Con una desviación estándar de 1,6 W/m^2 y una desviación máxima de ± 7 W/m^2.
Por otro lado, la constante tiene la siguiente variación:

IAfelio= 1.308 W/m^2
IPerihelio= 1.398 W/m^2

La Figura 21 muestra la *constante solar* medida por satélites en W/m² durante el período 1978-2003. En esta figura se observa, que la constante varía con el tiempo, así como un leve aumento en los mínimos de la misma. También se aprecia el ciclo solar, en el cual cada 11 años se presenta un máximo en la constante.

Fuente: NASA.

Figura 21. Valores de la constante solar medidos por medio de satélites.



3.8 ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar al pasar por la atmósfera sufre un proceso de debilitamiento por la dispersión (debida a los aerosoles), la reflexión (por las nubes) y la absorción (por las moléculas de gases y por partículas en suspensión); por lo tanto, la radiación solar que llega a la superficie terrestre (océano o continente) es menor a la del tope de la atmósfera. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación. La superficie de la Tierra, suelos, océanos y también la atmósfera absorbe energía solar y la vuelve a irradiar en forma de calor en todas las direcciones.

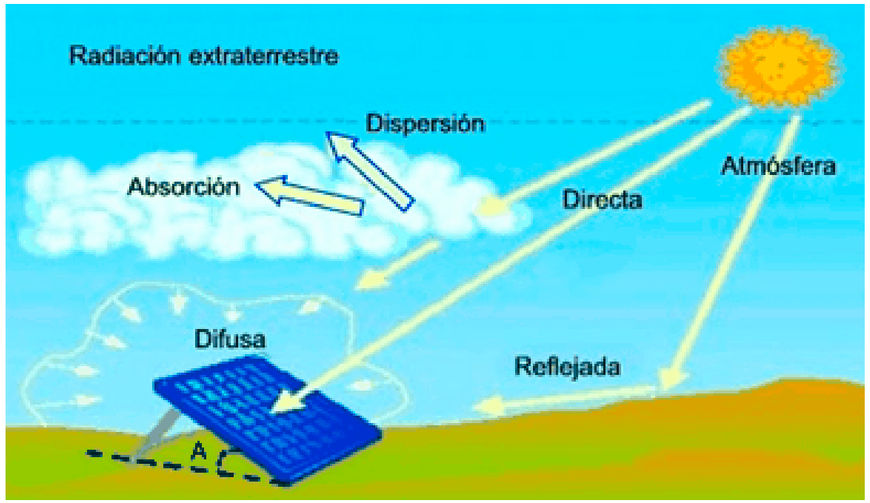
En este sentido, los procesos de atenuación que sufre la radiación solar en su trayectoria hacia la Tierra son:

3.8.1 Dispersión

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión (ver Figura 22). La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido, cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que cuanto más corta sea, mayor será la dispersión. Las moléculas de gas con tamaños relativamente pequeños comparadas con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás, fenómeno que es conocido como dispersión de Rayleigh. Los 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, fenómeno llamado dispersión de Mie. El proceso de la dispersión explica cómo una pieza sin luz solar está iluminada, debido a que le llega luz difusa o radiación difusa.

Fuente: ADR.

Figura 22. Dispersión, reflexión y absorción de la luz.



La dispersión de la luz es su descomposición en colores. Las longitudes de onda toman ángulos distintos y los colores se separan. Siguen el orden del arcoiris: el color rojo tiene la longitud de onda más larga y el violeta la más corta.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que en longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Salvo a la salida y a la puesta del Sol, todos los puntos del cielo son fuentes de difusión de luz azul para un observador ubicado en la superficie terrestre; al amanecer y en el crepúsculo, los rayos deben recorrer un camino más largo a través de la baja atmósfera; esto hace que casi toda la luz azul haya sido difundida antes de llegar al observador.

3.8.2 Reflexión (Albedo)

La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra o cualquier otra superficie se denomina Albedo. El albedo planetario es en promedio de un 30%. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera.

El albedo, relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente sobre una superficie horizontal, se expresa en porcentaje así:

$$A\% = \frac{R}{H} \; x100 \qquad (3\text{-}21)$$

A% = Albedo
R = Flujo de radiación reflejada
H = Flujo total incidente

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menos que las claras y lisas. Al aumentar la humedad del suelo, este absorbe mayor cantidad de radiación global (ver tabla 2).

El albedo del suelo en general está comprendido entre el 10% y el 30%, el barro húmedo baja su valor hasta un 5 %, en el caso de arena seca eleva su valor a un 40 %. El albedo de los sembrados y bosques está entre 10% y 25% y la nieve reciente alcanza un valor de 80 a 90%. En el albedo del agua influye el grado de turbiedad; en el agua sucia el albedo aumenta con respecto al agua limpia.

Tabla 2. Albedo de algunas superficies comunes.

Superficie	Albedo %
Nieve fresca	80–90
Arena	20-40
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo seco	15-25
Barro húmedo	5
Agua (Sol cerca del cenit)	3-5
Agua (Sol cerca del horizonte)	50-80
Nube gruesa	70-80
Nube delgada	25-30
Tierra y atmósfera global	30

3.8.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión

La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal que absorben la energía selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro. La atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción o es transparente en la parte visible del espectro, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del Sol y el principal responsable de este fenómeno es el ozono; asimismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso.

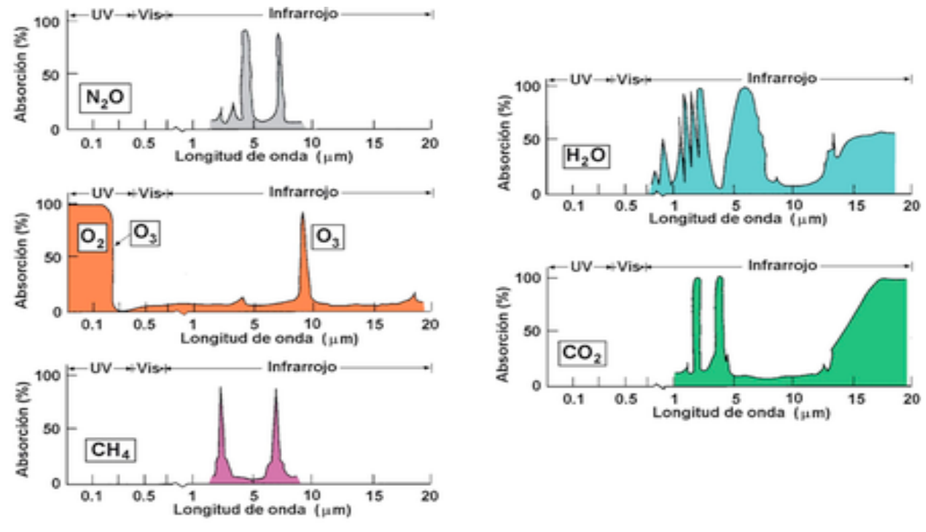
Los gases que absorben la radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera, por ejemplo, la absorción de radiación solar por el ozono proporciona la energía que calienta la estratosfera y la mesosfera.

La absorción de radiación infrarroja procedente de la Tierra es importante en el balance energético de la atmósfera. Esta absorción por los gases traza, calienta la atmósfera, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Parte de esta radiación es liberada al espacio, en niveles muy altos y otra parte es irradiada nuevamente a la Tierra. El efecto neto de este fenómeno permite que la Tierra almacene mas energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar si la Tierra no tuviera atmósfera, consecuentemente, la temperatura es del orden de 33°C más alta. Este proceso es conocido como **el efecto de invernadero natural.** Sin el efecto invernadero la temperatura promedio en la superficie seria aproximadamente de 18°C bajo cero y la vida en el planeta seria imposible. Consecuentemente, los gases en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra son conocidos como gases de efecto invernadero, entre ellos se encuentran el dióxido de carbono, vapor de agua, óxido nitroso, metano y ozono.

En la Figura 23 se muestra cómo diversos gases en la atmósfera absorben diferentes longitudes de onda. Se observa que el nitrógeno es mal absorbedor de radiación solar; por el contrario, el oxígeno y el ozono son buenos absorbedores de radiación ultravioleta en λ< 0,29 µm, mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono son buenos absorbedores en el infrarrojo. El vapor de agua absorbe aproximadamente cinco veces más radiación terrestre que todos los otros gases combinados, contribuyendo a elevar la temperatura de la baja troposfera, lugar donde se desarrolla la vida. En la banda entre 8 y 11 µm se presenta la "ventana atmosférica", debido a que en ese rango de longitud de onda, la atmósfera no absorbe radiación (especialmente, el vapor de agua y el dióxido de carbono), la cual se escapa al espacio exterior.

Figura 23. Coeficientes de absorción (en %) por diferentes gases de la atmósfera en función de la longitud de onda del espectro electromagnético, distinguiéndose los intervalos de radiación ultravioleta, visible e infrarrojo.

Fuente: meteolab.fis



En la atmósfera total ningún gas es un efectivo absorbedor de radiación en longitudes de onda entre 0,3 y 0,7 µm, por lo que se tiene un vacío en la región de la luz visible, este corresponde a una gran fracción de la radiación solar. Esto explica porque la radiación visible llega a la Tierra y se dice que la atmósfera es transparente a este tipo de radiación.

3.9 RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Es muy grande la cantidad de energía solar que fluye hacia y desde la Tierra y la atmósfera. Una comparación que permite apreciar la cantidad de energía solar que cada año incide sobre la Tierra es que equivale a cerca de 160 veces la energía de las reservas mundiales de energía fósil o que es similar a más de 15.000 veces la energía anual usada de los combustibles fósiles y nucleares y de las plantas hidráulicas.

Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: de la radiación total incidente, 173.000 Teravatios, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%). Relativamente, muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad, prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja.

La disponibilidad de energía procedente del Sol depende de la localización geográfica de un punto en la Tierra (latitud, longitud, elevación), además de los factores astronómicos como la época del año y la duración del día. Todos estos factores pueden ser determinados con menor o mayor grado de exactitud para estimar la cantidad de energía solar disponible. Sin embargo, el factor que afecta mayormente su disponibilidad efectiva son las nubes y otras condiciones meteorológicas (como la presencia de aerosoles), factores que varían según el lugar y el momento del día.

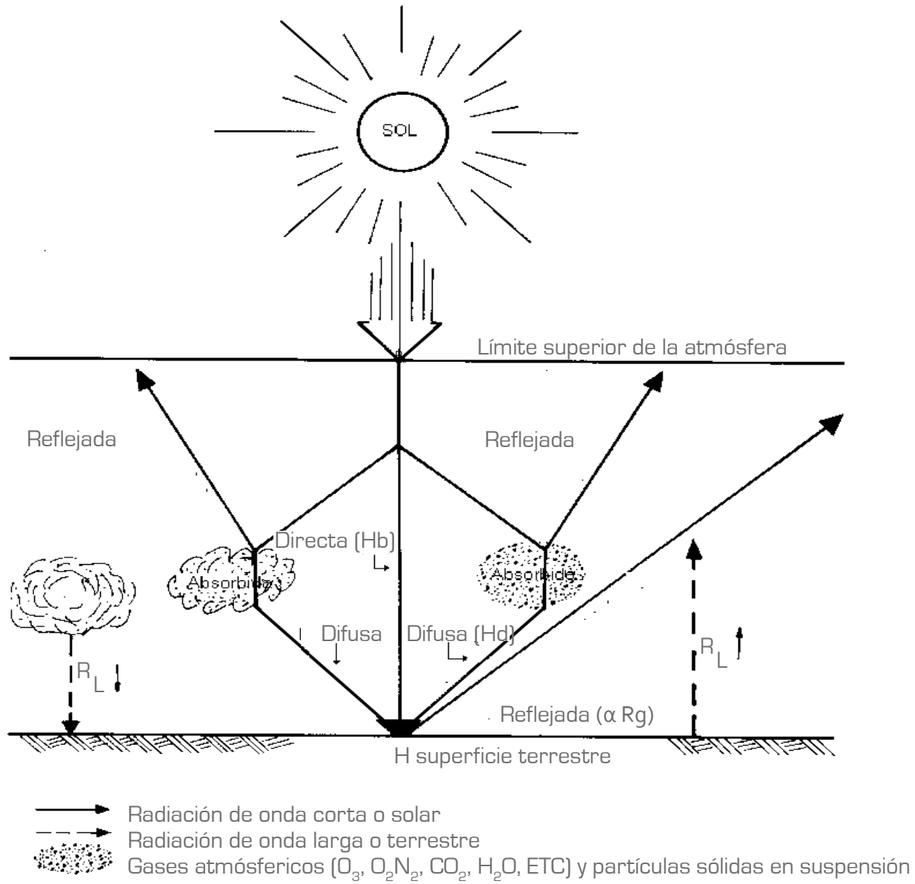
Los parámetros fundamentales que inciden en la cantidad de radiación disponible en la superficie terrestre son:

- La transparencia de la atmósfera, caracterizada por su "coeficiente de extinción" o por su "transmisividad".
- La nubosidad
- El día del año y su duración astronómica
- La elevación del Sol en el horizonte
- La "heliofanía", definida como el tiempo en horas durante el cual el Sol tiene un brillo solar efectivo.

El efecto de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera se muestra en la Figura 24. **La radiación que finalmente llega a la superficie de la Tierra se clasifica en radiación directa, difusa y global.**

Figura 24. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.

Fuente: Atlas, 2005.



3.9.1 Radiación directa (Hb)

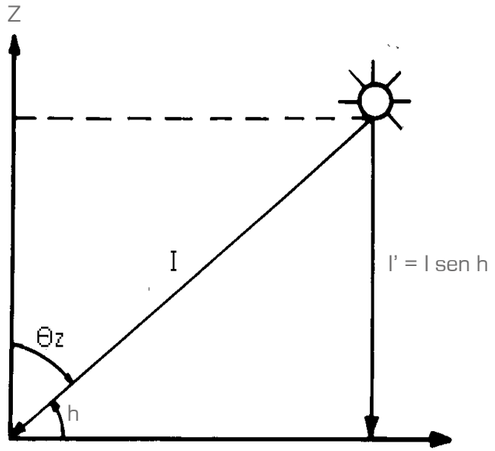
Es la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin haber sufrido difusión ni reflexión alguna. Esta radiación llega a la superficie de la Tierra sin cambios de dirección. Se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$H_b = I' = I \operatorname{sen} h \qquad (3\text{-}22)$$

Donde I' es la componente vertical de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal, h la altura del Sol sobre el horizonte e I es la intensidad de la radiación directa sobre la superficie normal a los rayos solares. Es evidente que I es mayor que I' y son iguales solamente cuando el Sol se encuentra en el cenit (ver Figura 25).

Fuente:Atlas, 2005.

Figura 25. Componente directa de la radiación Sol.



Sobre la superficie de la Tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores: la constante solar, la altura del Sol sobre el horizonte (h) y la transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

3.9.2 Radiación difusa (Hd)

Es la componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera en su camino hacia la Tierra e interactuar con las nubes es difundida en todas las direcciones. También es definida como la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal desde todos los lugares de la atmósfera diferente de la radiación solar directa. Cuando no hay nubes, la radiación difusa se produce por medio del proceso de difusión a través de partículas atmosféricas.

La radiación solar difusa diaria es la cantidad de radiación difusa entre las seis de la mañana y las seis de la tarde y sus valores oscilan entre 300 y 5.500 Wh/m² al día.

Sobre la superficie de la Tierra la radiación difusa depende de:

a) La altura del Sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa.
b) Cantidad de partículas en la atmósfera. A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente, aumenta con la contaminación.
c) Nubosidad. Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.
d) Altura sobre el nivel del mar. Al aumentar la altura, el aporte de la radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

Algunos estudios en el Reino Unido han confirmado que las plantas son más eficientes bajo la radiación difusa, ya que esta tiene efectos positivos en la fotosíntesis de las plantas, proceso por el cual absorben dióxido de carbono.

3.9.3 Radiación global (H)

La radiación global es toda la que llega a la Tierra, esta se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. El aporte de cada componente a la radiación global varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

Su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al Sol y sin ningún tipo de sombra; de esta manera, si llamamos H al flujo de radiación global, se tiene que:

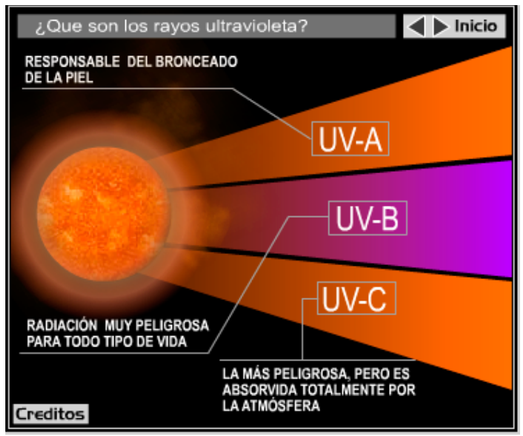
$$H = I\ sen\ h + H_d = H_b + H_d \qquad (3\text{-}23)$$

La radiación solar global diaria es el total de la energía solar en el día y sus valores típicos están dentro del rango de 1 a 35 MJ/m² (megajoules por metro cuadrado), es decir, entre 300 Wh/m² y 9500 Wh/m².

3.10 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

A comienzo del siglo XIX, Johannes Ritter descubrió que el Sol, además de luz visible, emite una radiación "invisible" de longitud de onda más corta que el azul y el violeta. Esa banda recibió el nombre de "ultravioleta". El Sol emite una gran cantidad de energía a la Tierra, de la cual solo entre un 6% a 7% corresponde a la radiación ultravioleta (UV). Esta radiación es una forma de energía radiante que cubre el rango de longitudes de onda entre los 100 y los 400 nanómetros, usualmente, es clasificada en tres categorías (constituida por longitudes de onda ascendentes que van desde el UV-C, UV-B y la UV-A) de acuerdo con la longitud de onda (mientras más corta sea la longitud de onda de la radiación UV, biológicamente es más perjudicial):

UV-A entre 320 y 400 nm
UV-B entre 280 y 320 nm
UV-C entre 100 y 280 nm



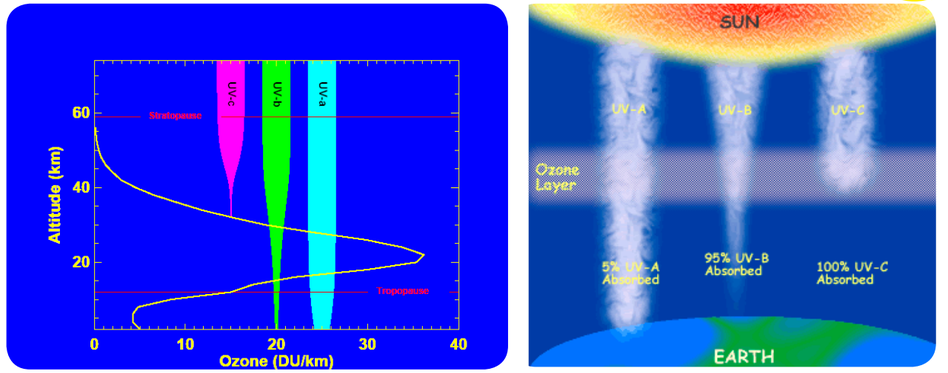
Fuente: http://www.indiceuv.cl/informacion.html

La radiación solar viaja a través de la atmósfera terrestre antes de llegar a la superficie y en este recorrido toda la radiación UV-C y el 90 % de la UV-B es absorbida por gases como el ozono, vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, mientras que la radiación UV-A es débilmente absorbida (ver Figura 26). (Fuente:http://www.indiceuv.cl/informacion.html)

Debido a lo anterior, la radiación UV que alcanza la superficie de la Tierra está compuesta en gran parte por la radiación UV-A (95%) y en menor grado por la UV-B (5%). La radiación UV que alcanza la troposfera es el motor de todos los procesos fotoquímicos en las capas bajas de la atmósfera de la Tierra.

Figura 26. Absorción de la radiación UV en la atmósfera.

Fuente: CCPO.



Las longitudes de onda más largas, la UV-A y UV-B se manifiestan en múltiples implicaciones sobre los procesos biológicos del planeta. En dosis apropiadas, estas longitudes de onda benefician ciertas funciones de los organismos vivos, pero en dosis excesivas y acumulativas sus consecuencias pueden ser perjudiciales.

3.10.1 Tipos de radiación UV y sus efectos en la salud

En el ser humano, una exposición prolongada a la radiación solar UV puede producir efectos agudos y crónicos en la salud de la piel, los ojos y el sistema inmunitario. Las quemaduras solares son los efectos agudos más conocidos de la exposición excesiva a la radiación UV; a largo plazo, este daño acumulativo produce cambios a nivel celular en cada una de las diferentes capas de la piel, del tejido fibroso y de los vasos sanguíneos, que se puede traducir más tarde en el envejecimiento prematuro

de la piel o en el peor de los casos en un cáncer, el cual se manifiesta con tumores, manchas, úlceras, lunares o masas. La radiación UV puede producir también reacciones oculares de tipo inflamatorio, como la queratitis actínica. Los efectos biológicos por la sobreexposición a la radiación UV están asociados a graves daños en el fitoplancton marino y en los sistemas vegetales por la alteración de las funciones clorofílicas en estos últimos, por ende, disminución de las cosechas.

Existe una relación entre la energía del fotón UV y las energías de ligadura de muchas moléculas químicas y biológicas, por ejemplo, la radiación UV de longitud de onda menor de 240 nm rompe el enlace de la molécula de oxígeno (O_2) ya que posteriormente forma el ozono estratosférico; longitudes de onda cercanas a los 250 nm incrementan la absorción de UV por parte del ADN y otras moléculas intranucleares, por esto la radiación de 250 nm es usada como germicida.

3.10.1.1 *Radiación UV-A*

La radiación UV-A es la forma menos dañina de la radiación ultravioleta, además es la que llega a la Tierra en mayores cantidades, siendo la continuación de la radiación visible, pero presenta un menor peligro por ser menos energética y asimismo es responsable del bronceado de la piel. Los rayos UV-A penetran en el tejido conectivo y causan lesiones crónicas inducidas por la luz, como el envejecimiento prematuro de la piel y su oscurecimiento. También son responsables de la formación de radicales libres y de reacciones tanto fototóxicas como fotoalérgicas (tales como las alergias solares denominadas fotodermatitis poliforme). Los radicales libres son compuestos químicos, con electrones libres, que poseen una reactividad elevada y pueden dañar las células de la epidermis y la dermis. La radiación UV-A también puede dañar pinturas y plásticos que se encuentren a la intemperie.

3.10.1.2 *Radiación UV-B*

La radiación UV-B, que llega a la superficie de la Tierra es potencialmente dañina, ya que reduce el crecimiento de las plantas y la exposición humana prolongada a este tipo de radiación puede causar daños a la salud, tales como:

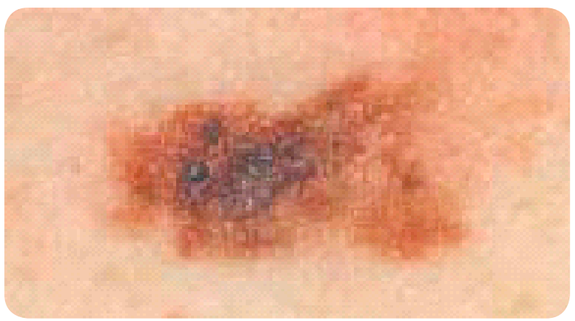
- Daños en la piel tan leves como una simple quemadura (eritema solar) o de tal gravedad como mutaciones en el ADN de las células cutáneas que pueden derivar en el cáncer de piel (ver Figura 27), el cual puede aparecer muchos años después de la exposición excesiva al Sol, ya que este tipo de radiación es absorbida por el ADN dérmico penetrando en las capas celulares más profundas de la epidermis. Cada año, se producen en el mundo entre 2 y 3 millones de casos de cáncer de piel no melánico y aproximadamente 132.000 casos de cáncer de piel melánico. Los cánceres de piel no melánicos se pueden extirpar y rara vez son mortales, pero los melanomas malignos contribuyen sustancialmente a la mortalidad en las poblaciones de piel clara. Este último tipo de cáncer está asociado a los lunares y es el tumor más letal de la piel porque posee una alta capacidad metastásica, es decir, estas células cancerígenas se pueden diseminar por otras partes del organismo. La radiación UV-B energética puede causar daños celulares de carácter degenerativo, debido a que puede romper los enlaces de las moléculas del ADN, las cuales son portadoras moleculares de nuestro codificador genético.
- Reducción de la eficiencia del sistema inmunológico, aumentando el riesgo de infecciones y disminuyendo la eficacia de las vacunas, ya que la radiación UV-B actúa como un agente inmunosupresor local.

Figura 27. Efectos de la radiación UV sobre la salud (Fuente: OMS, 2003)

Fuente: OMS, 2003



Cáncer no melanoma



Melanoma maligno

- Cataratas (producidas cuando el cristalino, el cual enfoca la luz hacia la retina, se nubla). Entre 12 y 15 millones de personas padecen de ceguera causada por cataratas. Según estimaciones de la OMS, hasta un 20 % de

estos casos de ceguera pueden haber sido **causados o haberse agravado por la exposición al Sol, especialmente, en zonas cercanas al ecuador.**

- La exposición constante al Sol produce también pterigios (crecimiento de tejido fibroso sobre la córnea) y lesiones de retina con pérdida visual permanente.
- Genera rugosidades en la piel, manchas claras y oscuras (llamadas hipopigmentaciones o hiperpigmentaciones) y daños a otras formas de vida.
- La radiación UV-B también produce daños a materiales y equipos que se encuentren a la intemperie.
- Puede provocar daños en la piel y en los ojos de los animales, además de cambios en los procesos de producción de los vegetales, entre otros efectos.

3.10.1.3 *Radiación UV-C*

Los rayos UV-C son la forma más dañina de toda la gama de rayos ultravioleta porque es muy energética, pero esta radiación es absorbida por el oxígeno y el ozono en la estratosfera y no llega a la superficie terrestre.

A pesar de los efectos negativos que produce la radiación UV, cantidades pequeñas de esta radiación son beneficiosas para las personas y esenciales en la síntesis dérmica de la vitamina D; la radiación UV también se utiliza, bajo supervisión médica, para tratar varias enfermedades como el raquitismo, la psoriasis y el eczema.

Finalmente, se considera que la conducta de las personas con respecto al Sol es la causa principal del aumento de las tasas de cáncer de piel en las últimas décadas. El incremento de las actividades al aire libre y los nuevos hábitos al tomar el Sol ocasionan una excesiva exposición a la radiación UV. A muchas personas les parece normal tomar el Sol de forma intensa y consideran que el bronceado es un símbolo de belleza y buena salud.

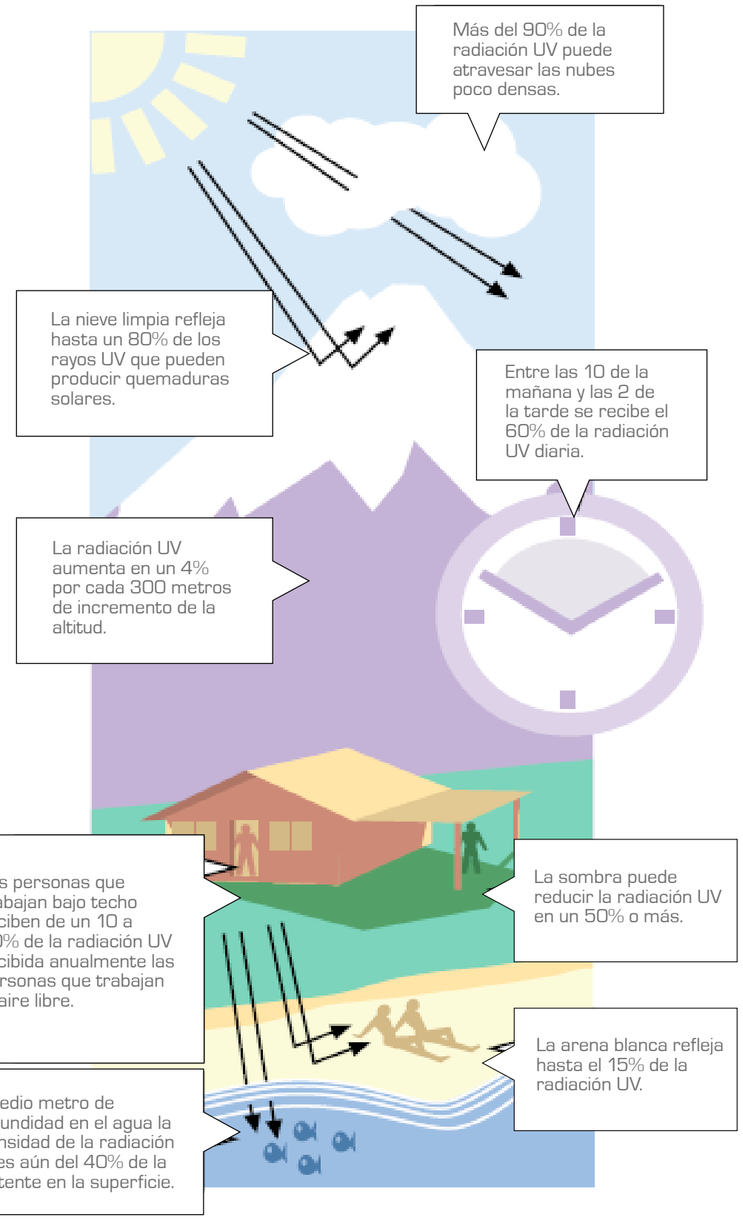
3.10.2 *Factores que influyen en los niveles de radiación UV*

Los niveles de radiación UV en la superficie dependen de varios factores: posición del Sol, altitud, latitud, cubrimiento de las nubes, cantidad de ozono en la atmósfera y reflexión terrestre (ver Figura 28).

Los niveles de radiación UV varían durante el día y a lo largo del año; los mayores se registran en el día cuando el Sol se encuentra en su máxima elevación, esto es

Figura 28. Factores que influyen en los niveles de radiación UV.

Fuente: OMS, 2003.



entre las 10 a. m. y las 2 p. m.(cerca del 60% de la radiación UV es recibida a estas horas), mientras que cuando el ángulo del Sol está más cercano al horizonte llega menos radiación UV a la superficie de la Tierra debido a que atraviesa una mayor distancia en la atmósfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción. En zonas diferentes a los trópicos los máximos niveles se observan en los meses de verano alrededor del mediodía. En los trópicos, los mayores niveles de radiación en el tope de la atmósfera se presentan a principios de año generalmente, durante el perihelio (cuando la Tierra está más cerca al Sol) y los más bajos a mitad del año durante el afelio (cuando la Tierra está más alejada del Sol).

- La radiación UV varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial (como en Colombia) los rayos solares inciden directamente en las latitudes medias, por ello, la radiación UV resulta ser más intensa en esa área.
- La altitud también determina la cantidad de radiación UV que se recibe, debido a que en zonas de alta montaña es más delgada la capa atmosférica que deben recorrer los rayos solares, de manera que a mayor altitud mayor radiación UV. En promedio, por cada 1.000 metros de incremento de la altitud, la radiación UV aumenta entre un 10% a un 12%.
- Las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación UV que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más UV que una nube delgada.
- La cobertura nubosa afecta la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre, ya que las gotas de agua y los cristales de hielo actúan como excelentes difusores de radiación UV, mediante la difusión Mie.
- La contaminación trabaja en forma similar que las nubes, ya que la contaminación urbana reduce la cantidad de radiación UV que llega a la superficie de la Tierra.
- El nivel de radiación UV que llega a la superficie de un lugar, está inversamente relacionado con la cantidad de ozono total en la atmósfera (especialmente en la región entre los 18 y los 40 km de altura, zona en la que se ubica la capa de ozono); a menor cantidad de ozono mayor radiación UV llega a la superficie. Por ello, las mayores cantidades de radiación UV se reciben en aquellas regiones en donde su contenido de ozono es menor. La zona con menor contenido de ozono total en el mundo es la tropical que comprende amplios sectores del norte y centro de Suramérica, el Atlántico tropical y el centro de África, donde se registran promedios por debajo de 240 UD. Colombia está incluida en esta zona, por lo tanto, está expuesta a altos niveles de radiación ultravioleta en superficie durante todo el año.
- La radiación UV reflejada puede producir los mismos efectos que la que llega a la superficie. La nieve es la superficie que más refleja radiación UV, alcanzando hasta un 80%, mientras que el concreto refleja hasta un 12%, la arena seca de playa el 15% y el agua de mar el 25%.

3.10.3 El índice UV

El índice UV (IUV) es una medición sencilla de la intensidad de la radiación ultravioleta en la superficie de la Tierra. Se ha desarrollado como un indicador que asocia la intensidad de la radiación solar ultravioleta incidente sobre la superficie de la Tierra (principalmente la UV-B), con posibles daños en la piel humana y es una medida de orientación dirigida a promover la exposición saludable al Sol en la población, ya que esta es necesaria para diversos procesos biológicos del organismo humano. Este indicador alcanza los niveles más altos alrededor del mediodía y cuanto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares.

El índice UV indica la intensidad de la radiación UV-B en una escala del 1 al 11+, (encontrándose valores entre 18 a 20, generados especialmente en los trópicos, a grandes altitudes), con las categorías de exposición que se muestran en la Tabla 3.

La piel humana se puede dividir en 6 tipos, de acuerdo a su sensibilidad a la radiación ultravioleta (Tabla 4). Teniendo en cuenta, que más del 90 % de los cánceres de piel no melánicos se producen en los fototipos I y II, los mensajes de protección básicos asociados con el IUV deben dirigirse a las personas de piel clara más propensas a las quemaduras (OMS, 2003).

La radiación UV.
La radiación ultravioleta procedente del Sol y su exposición sin protección es nociva, ya que produce manchas, envejecimiento prematuro y aumenta el riesgo de desarrollar cáncer en la piel, al igual que problemas oculares y puede afectar el sistema inmunológico en los humanos. ¡Protéjase!)

Tabla 3. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta

Categoria de exposición	Intervalo de valores del IUV
BAJA	< 2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

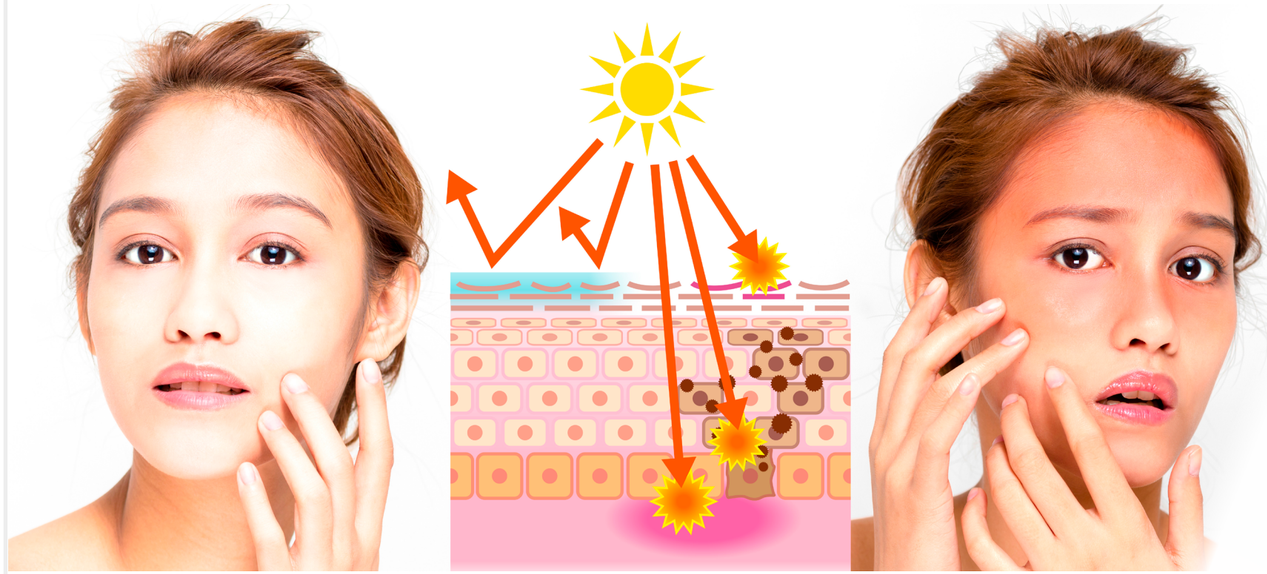
Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, 2003

Tabla 4. Clasificación de tipos de piel

Fototipo de piel	Color de piel	Sensibilidad a la radiación	Descripción
I	Blanca (deficiente en melanina)	Muy sensible	Siempre se quema con facilidad tras la exposición al Sol, raramente se broncea.
II	Blanca (deficiente en melanina)	Muy Sensible	Habitualmente se quema tras la exposición al Sol, algunas veces se broncea.
III	Blanca (con melanina suficiente)	Sensible	Algunas veces se quema tras la exposición al Sol, habitualmente se broncea de manera gradual y uniforme (café claro).
IV	Café Clara (con melanina suficiente)	Moderadamente sensible	Raramente se quema tras la exposición al Sol, siempre se broncea bien (café moderado).
V	Café (con protección melanina)	Mínimamente sensible	Rara vez se quema. Se broncea intensamente (café oscuro).
VI	Café oscuro o negro (con protección melanina)	Insensible o mínimamente sensible	Nunca se quema. Se broncea intensamente (café oscuro o negro).

Adaptado del documento: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, 2003.

De manera particular, los niños son sensibles a la radiación UV, por eso, requieren una protección especial. Aunque las personas de piel oscura tienen menor incidencia de cáncer de piel, también son sensibles a los efectos nocivos de la radiación UV, especialmente, les afecta los ojos y el sistema inmunológico.



3.10.4 Presentación y comunicación del Índice UV

El IUV debe dirigirse especialmente a los grupos de población vulnerables y con exposición alta como los niños y los turistas, además, sirve para informar a la población acerca de los diversos efectos de la radiación UV sobre la salud: quemaduras solares, cáncer y envejecimiento de la piel o las alteraciones oculares y del sistema inmunitario. Se destaca que los efectos adversos para la salud debido a la exposición de la radiación UV son acumulativos, ya que la exposición en la vida diaria puede ser tan importante como la que se produce durante las vacaciones en climas soleados.

Cuando se comunica el IUV se pone el máximo énfasis en la intensidad máxima de la radiación UV en un día determinado, ya sea como categoría de exposición, el valor

o intervalo de valores del IUV o ambos producidos durante el periodo de cuatro horas en torno al mediodía solar.

Una de las formas de hacer público el índice IUV es a través de la presentación de informes en las noticias y los boletines del pronóstico del tiempo, mejorando el entendimiento del concepto del índice por parte de las personas. El programa Intersun de la OMS ha desarrollado un paquete de gráficas estandarizadas que incluyen el logo IUV, un color internacional para diferentes valores del IUV y la escogencia de gráficas listas para el reporte del IUV y del mensaje de protección (ver Figura 29 y la Tabla 5).

Fuente: OMS, 2003.

Figura 29. Sistema de protección solar con mensajes sencillos y fáciles de recordar. (Fuente: OMS, 2003).



Tabla 5. Protección solar recomendada.

Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, 2003 y tutiempo.net para el FPS

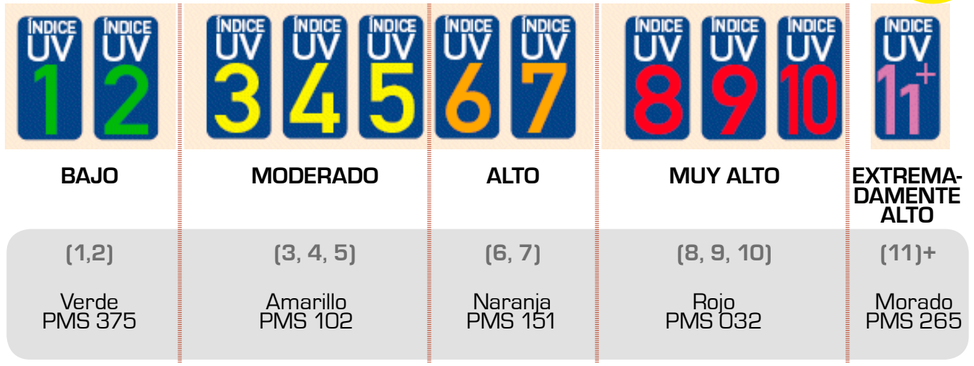
Índice UV	Protección recomendada	Factor de protección solar (FPS) indicado	
		Piel clara	Piel oscura
< ÍNDICE UV 2	Ninguna	15	8
ÍNDICE UV 3 – ÍNDICE UV 7		Se puede usar un FPS de 25 para un índice entre 3 y 5 y de 30 para un índice de 6 y 7.	Se puede usar un FPS de 15 para un índice entre 3 y 5 y de 25 para un índice de 6 y 7.
ÍNDICE UV 8 +		50+	Se puede usar un FPS de 30 para un índice entre 8 y 10 y de 50+ para un índice superior a 11.

La presentación gráfica normalizada del IUV fomenta la coherencia en la información sobre el índice en las noticias y los reportes del tiempo, sirve para mejorar la comprensión por parte de la población. La existencia de materiales elaborados previamente (gráficas y mensajes) para informar sobre el índice facilita su divulgación en los medios de comunicación.

El conjunto de pictogramas puede descargarse del sitio de internet del proyecto internacional de la OMS sobre radiación UV (http://www.who.int/uv/), Intersun, donde se encuentran los códigos de colores para los diferentes valores del IUV (ver Figura 30), pictogramas de información sobre el IUV (ver Figura 31) y los pictogramas de protección solar (ver tabla 5). En esta tabla también se puede apreciar el factor de protección solar indicado para cada rango del índice UV.

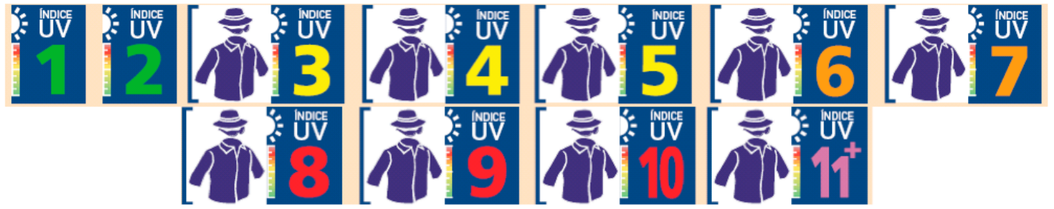
Fuente: OMS, 2003.

Figura 30. Código internacional de colores.



Fuente: OMS, 2003.

Figura 31. Pictogramas relativos al índice UV.



En el marco de la presentación del IUV, también pueden utilizarse recomendaciones adicionales para corregir falsas creencias habituales sobre la radiación UV y sus efectos sobre la salud humana, tal como se muestra en la tabla 6.

Por último, no se recomienda informar los tiempos de exposición sin riesgo de quemadura, ya que la población tiende a interpretar que existe un tiempo de exposición seguro al Sol sin protección. En consecuencia, cuando se relacionan los valores del IUV con "tiempos de exposición sin riesgo de quemarse" o con "tiempos de bronceado seguro" se transmite un mensaje equivocado a la población. El IUV no debe dar a entender que puede prolongarse la exposición.

Tabla 6. Peligros de la radiación UV. Mitos y realidades.

Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, 2003.

Falso	Verdadero
El bronceado es saludable.	El bronceado es una forma de defensa del organismo contra daños adicionales por la radiación UV.
El bronceado te protege del sol.	Un bronceado intenso en personas de piel clara sólo ofrece una protección escas, equivalente a un FPS de alrededor de 4.
En días nubosos no te quemas.	Hasta el 80% de la radiación UV solar puede atravesar una nubosidad poco densa. La neblina de la atmósfera puede incluso aumentar la exposición a la radiación UV.
Estando en el agua no te quemas.	El agua proporciona una protección mínima contra la radiación UV y los reflejos del agua pueden aumentar la exposición.
Durante el invierno, la radiación UV no es peligrosa.	La radiación UV es generalmente menor durante los meses de invierno, pero la reflexión en la nieve puede duplicar la exposición total, especialmente a altitudes elevadas. Sea particularmente precavido a comienzos de la primavera, cuando las temperaturas son bajas pero los rayos del sol son más fuertes de los que se podría esperar.
Las cremas protectoras permiten tomar el sol mucho más tiempo.	Las cremas de protección solar no deben utilizarse para aumentar el tiempo de exposición al sol, sino para aumentar la protección cuando la exposición es inevitable. La protección que proporcionan depende en gran medida de si se aplican correctamente.
Si realiza descansos periódicos al tomar el sol no te quemas.	La exposición a la radiación UV se acumula a lo largo del día.
Si uno no siente el calor de los rayos del sol no se quemará	Las quemaduras solares se deben a la exposición a rayos UV imperceptibles. El efecto térmico se debe a la radiación infrarroja del sol y no a la radiacón UV



El ozono es un gas de vital importancia ya que protege la vida del planeta, absorbiendo los rayos ultravioleta procedentes del Sol, particularmente la radiación UV-B

3.11 EL OZONO

3.11.1 Generalidades

El ozono es un gas incoloro e inestable de tres átomos de oxígeno (su fórmula química es O_3), además, es un oxidante fuerte, muy fácil de producir, pero a la vez muy frágil y fácil de destruir. Este gas reacciona fácilmente con muchos compuestos químicos y es explosivo en pequeñas cantidades. Aunque su proporción es pequeñísima en comparación con otros componentes, en la estratosfera (capa de la atmósfera, ubicada entre los 16 y 50 km de altitud) es de vital importancia porque protege la vida del planeta, absorbiendo los rayos ultravioleta procedentes del Sol, particularmente, la radiación UV-B en el rango de 280 a 320 nanómetros de longitud de onda, los cuales son peligrosos para la salud humana, los animales y las plantas, incluyendo al plancton marino. De esta manera, contribuye al calentamiento de la estratosfera, esta se manifiesta con el aumento de la temperatura con la altura, lo cual genera resistencia a los movimientos verticales. Por otro lado, el ozono es un gas de efecto invernadero (GEI) que absorbe y emite radiación infrarroja con lo cual contribuye al calentamiento de la troposfera. Además, en la baja atmósfera y sobre la superficie, el ozono es un contaminante nocivo para la salud.

En las últimas décadas y con los avances industriales, se han venido inyectando a la atmósfera sustancias agotadoras de ozono (SAO), la mayoría de las cuales son GEI, estas disminuyen la cantidad del ozono en la estratosfera de latitudes medias y polares como, por ejemplo, los CFC usados en la fabricación de espuma y aerosoles, en limpiadores industriales y en refrigeración; de esa forma se tiene un aumento de la radiación ultravioleta (UV-B), con efectos potencialmente dañinos para los diferentes componentes del sistema terrestre.

El ozono se presenta desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 70 kilómetros, pero la mayor cantidad, cerca del 90 % se da en la estratosfera (entre los 16 y los 50 kilómetros, ver Figura 32), con una máxima concentración entre los 19 y 35 kilómetros. Esta capa de máxima concentración se conoce como la capa de ozono y varía según la época del año y el lugar geográfico.

Figura 32. Distribución del ozono en altura. (Fuente: AEMET).

Fuente: AEMET.



A diferencia de los otros GEI, con concentración uniforme en la atmósfera, el ozono tiene un tiempo de vida corto y su distribución es controlada por procesos fotoquímicos (producción y destrucción) y dinámicos (transporte por vientos estratosféricos). Además, el ozono se produce en su totalidad dentro de la atmósfera y no es emitido a esta como los otros GEI.

Aunque Colombia no presenta el problema del agujero de la capa de ozono, los niveles de ozono en el país son habitualmente bajos (con mínimos del orden de 230 unidades Dobson - UD en enero y máximos de hasta de 285 UD en agosto), debido a la circulación de vientos Brewer-Dobson, que transporta el ozono producido en los trópicos (zona de mayor producción en el mundo) hacia la estratosfera de las latitudes altas y medias. Se considera que existe agujero de la capa de ozono cuando los niveles de ozono se encuentran por debajo de las 220 UD.

4

LA **RADIACIÓN** GLOBAL Y EL **BRILLO** SOLAR EN COLOMBIA

Cultivos de Café, Manizales



Sede central del IDEAM, Bogotá, D.C.

4.1 RED NACIONAL DE MEDICIÓN E INSTRUMENTOS DE MEDIDA

4.1.1 Red nacional de medición de la radiación global

El IDEAM es la entidad oficial encargada, a nivel nacional, de hacer el seguimiento a la radiación y cuenta con la red más grande de estaciones y de mayor cobertura. Sin embargo, cabe anotar que en el país hay otras entidades que cuentan con redes más pequeñas y de carácter regional como gremios agrícolas (Cenicafé, Cenicaña, Fedearroz, entre otros), autoridades ambientales (Corporaciones Autónomas Regionales - CARs y Departamentos Administrativos del Medio Ambiente - DAMAs), centros de investigación y otras entidades públicas como IPSE.

4.1.1.1 *Estaciones del IDEAM*

El IDEAM cuenta con información de radiación global en una amplia red de sensores instalados en estaciones convencionales (principalmente actinógrafos y pocos piranómetros) y en estaciones automáticas satelitales (piranómetros). Los sensores de estas últimas estaciones y que el IDEAM ha instalado en el país desde el año 2005, son los que actualmente se encuentran funcionando, ya que se decidió desmontar los actinógrafos que el IDEAM tenía en operación en estaciones convencionales, por las dificultades que se tenían en la evaluación de las gráficas generadas por estos.

Los actinógrafos generan información de radiación global acumulada diaria, mientras que los piranometros de las estaciones convencionales y las automáticas satelitales tienen una frecuencia de lectura en minutos y agregan la información a nivel horario.

A. Estaciones convencionales

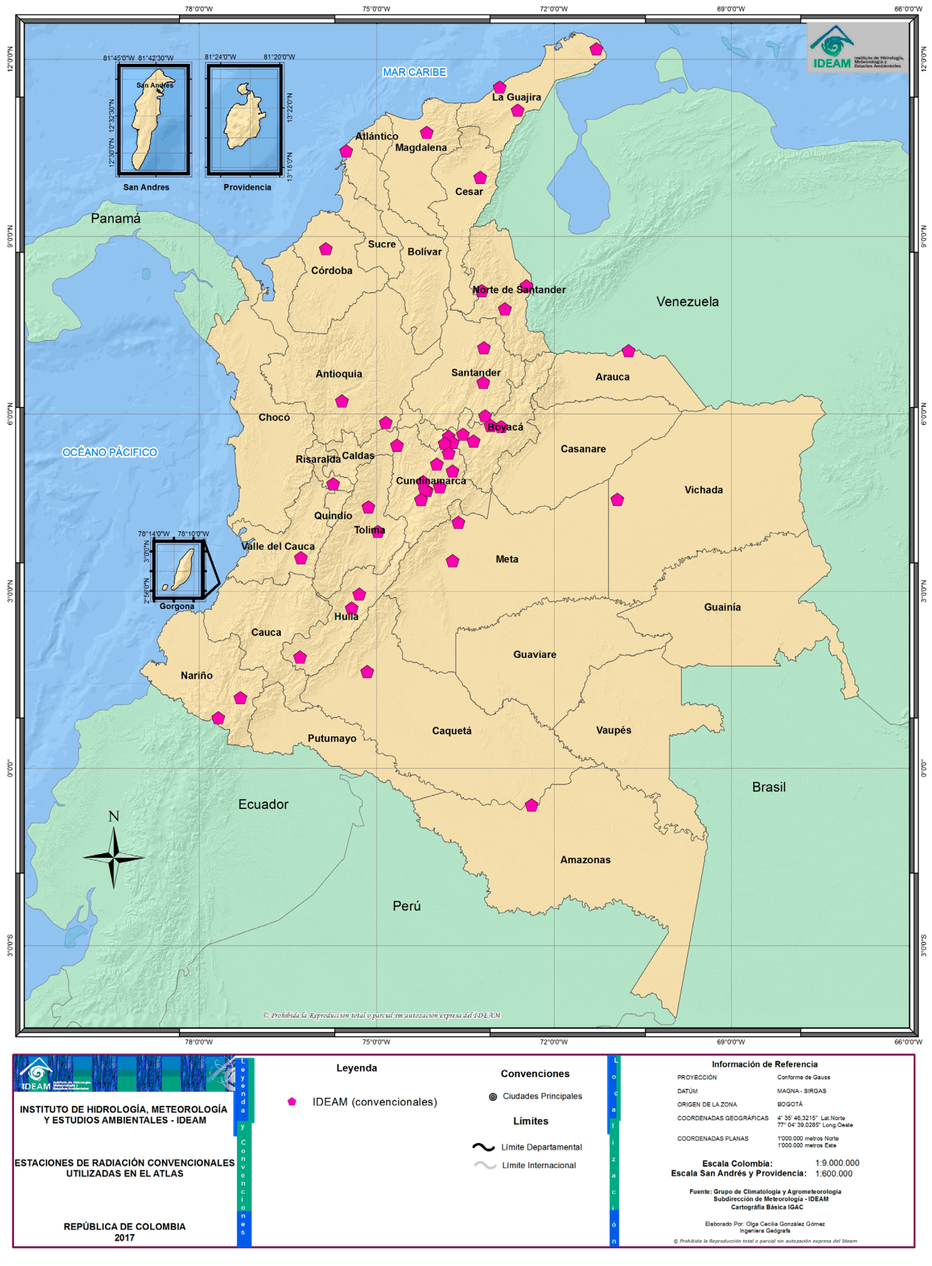
En este atlas se evaluaron gráficas y se validó la información de radiación global diaria de 65 actinógrafos del IDEAM. De estos, solo se tuvieron en cuenta 46 sensores para la generación de los mapas, los cuales se muestran en la Figura 33 (a). En el Anexo 11 se presenta el listado de las estaciones convencionales en donde se encontraban instalados estos sensores, junto con los respectivos promedios mensuales y anuales de la irradiación global recibida en la superficie.

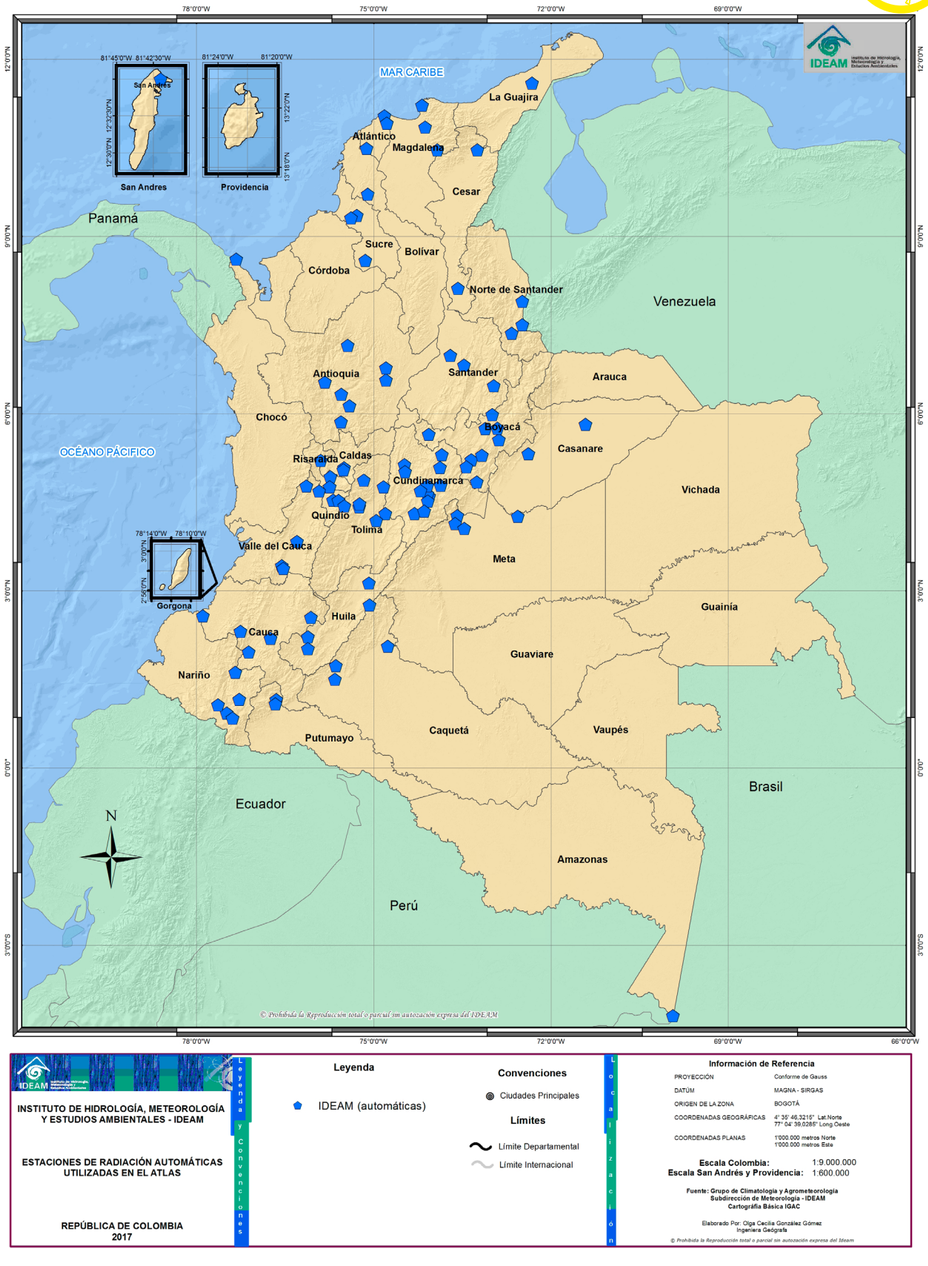
B. Estaciones automáticas

Inicialmente se tuvieron en cuenta 160 piranómetros de la red de estaciones meteorológicas automáticas satelitales del IDEAM (EMAS, ver Figura 34), para realizarles un diagnóstico y una validación preliminar de su información horaria; por lo tanto, se seleccionaron 105 piranómetros para ser calibrados durante los años 2014 y 2015.

Figura 33. Sensores de radiación global utilizados en el atlas. Izquierda actinógrafos de estaciones convencionales y derecha piranómetros en EMAS. (Fuente: IDEAM).

Fuente: IDEAM.





Fuente: IDEAM.

Figura 34. Estación Meteorológica Automática Satelital (EMAS) del IDEAM.





A estos sensores, se les aplicó la constante de calibración a sus datos y se realizó otra validación de la información, dando como resultado la selección de 96 sensores que se incluyeron en la elaboración de los mapas del atlas (ver la Figura 33 (b)). El Anexo 12 lista las EMAS en las que se encuentran estos sensores, junto con los respectivos promedios mensuales y anuales de la irradiación global.

El sensor de radiación global en todas las estaciones satelitales es el piranómetro CM11 de la empresa alemana Adolf Thies GmbH & Co. KG. La herramienta de almacenamiento de datos de estos sensores se llama HYDRAS3, los cuales empezaron a ser instalados desde principios del año 2005.

C. Estaciones Sutron

Entre 1997 y 2003 también funcionaron piranómetros en estaciones marca Sutron, en los siguientes lugares del país: Gaviotas, Mitú, San José del Guaviare, San Vicente del Caguán, Isla Malpelo, Puerto Inírida, Macagual (Florencia), Isla Gorgona y la Isla Serranilla. Después de analizar los datos de estos sensores, se seleccionaron solo los cuatro últimos para ser incluidos en los mapas de irradiación global.

4.1.1.2 Estaciones de otras entidades

En Colombia hay varias entidades que miden la radiación solar global, pero las que tienen mayor cantidad de estaciones, realizan calibraciones periódicas de los equipos y su información es confiable son: Cenicaña, Cenicafé, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el IPSE y Fedearroz.

A. Cenicaña

Este centro de investigación del gremio productor de la caña de azúcar, tiene 34 estaciones con piranómetros marca LI-COR (referencia LI-200), estas reportan irradiación global horizontal acumulada diaria. La red de estaciones se comenzó a instalar desde el año 1993, tal como se relaciona en la tabla 7 y está ubicada en la zona de mayor producción de la caña de azúcar en el país (ver Figura 35), comprende los departamentos de Valle del Cauca, Cauca, Caldas y Risaralda.

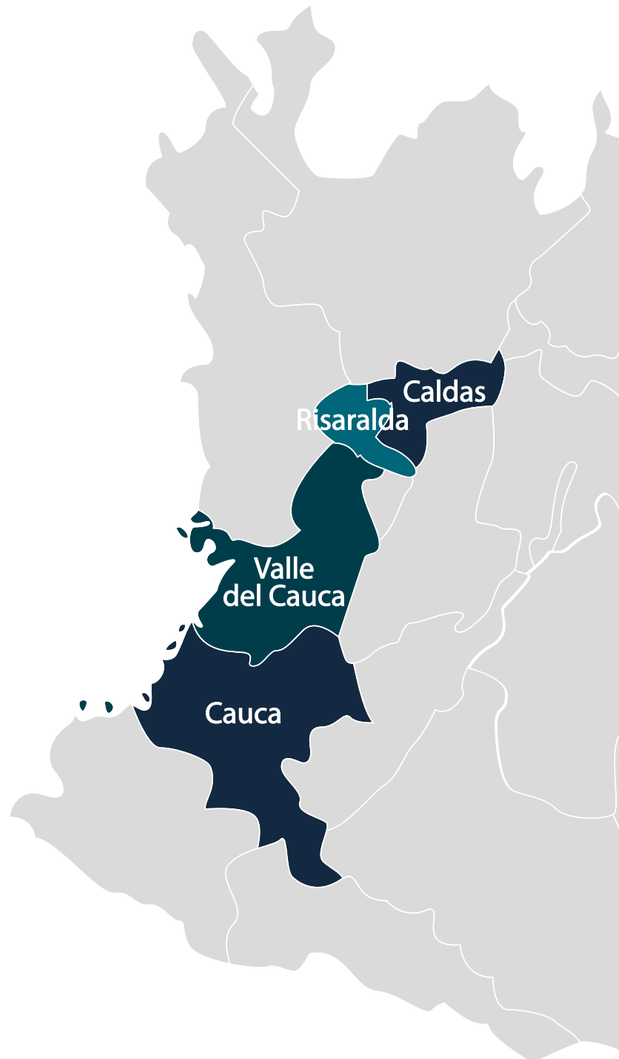
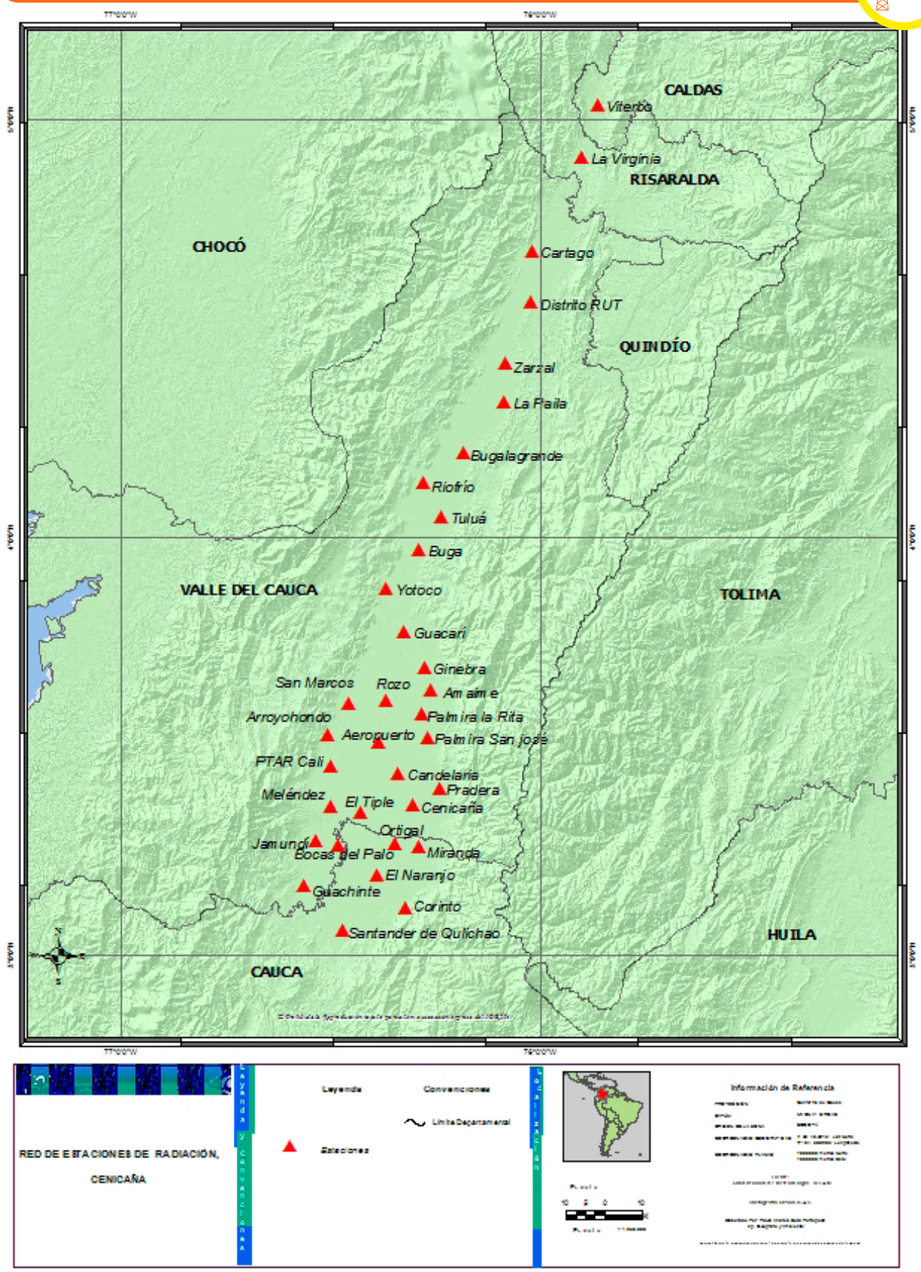


Tabla 7. Ubicación de las estaciones de Cenicaña*

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Años analizados
Viterbo	Viterbo	Caldas	5,03	-75,86	840	1996-2014
La Virginia	La Virginia	Risaralda	4,91	-75,90	900	1993-2014
Cartago	Cartago	Valle del Cauca	4,68	-76,01	870	1995-2014
Distrito RUT	Obando	Valle del Cauca	4,57	-76,02	870	2006-2014
Zarzal	Zarzal	Valle del Cauca	4,42	-76,08	950	1997-2014
La Paila	Zarzal	Valle del Cauca	4,32	-76,08	930	1993-2014
Bugalagrande	Bugalagrande	Valle del Cauca	4,20	-76,18	870	1997-2014
Riofrío	Riofrío	Valle del Cauca	4,13	-76,28	960	2002-2014
Tuluá	Tuluá	Valle del Cauca	4,05	-76,23	960	1993-2014
Buga	Guadalajara de Buga	Valle del Cauca	3,97	-76,29	969	2007-2014
Yotoco	Yotoco	Valle del Cauca	3,88	-76,37	960	1997-2014
Guacarí	Guacarí	Valle del Cauca	3,77	-76,32	1020	1993-2014
Ginebra	Ginebra	Valle del Cauca	3,69	-76,27	990	1997-2014
Amaime	El Cerrito	Valle del Cauca	3,64	-76,26	1050	1993-2014
San Marcos	Yumbo	Valle del Cauca	3,60	-76,45	960	1993-2014
Rozo	Palmira	Valle del Cauca	3,61	-76,36	994	2006-2014
Palmira La Rita	Palmira	Valle del Cauca	3,58	-76,28	960	1996-2014
Arroyohondo	Yumbo	Valle del Cauca	3,53	-76,50	960	1996-2014
Aeropuerto	Palmira	Valle del Cauca	3,51	-76,38	990	1996-2014
Palmira San José	Palmira	Valle del Cauca	3,52	-76,26	1080	1996-2014
PTAR Cali	Cali	Valle del Cauca	3,45	-76,50	960	1997-2014
Candelaria	Candelaria	Valle del Cauca	3,43	-76,34	1000	1993-2014
Pradera	Pradera	Valle del Cauca	3,40	-76,24	1020	1995-2014
Meléndez	Cali	Valle del Cauca	3,36	-76,50	995	1994-2014
El Tiple	Candelaria	Valle del Cauca	3,34	-76,42	990	2006-2014
Cenicaña	Florida	Valle del Cauca	3,36	-76,30	1020	1993-2014
Jamundí	Jamundí	Valle del Cauca	3,28	-76,53	990	1995-2014
Bocas del Palo	Jamundí	Valle del Cauca	3,26	-76,48	960	1995-2014
Ortigal	Puerto Tejada	Cauca	3,27	-76,35	1020	1996-2014
Miranda	Miranda	Cauca	3,26	-76,29	1050	1993-2014
El Naranjo	Caloto	Cauca	3,19	-76,39	989	1993-2014
Guachinte	Jamundí	Valle del Cauca	3,17	-76,56	1010	2006-2014
Corinto	Corinto	Cauca	3,11	-76,32	1080	1995-2014
Sant. de Quilichao	Sant. de Quilichao	Cauca	3,06	-76,47	930	1997-2014

*Ubicadas desde el norte hasta el sur. Nota: Las estaciones sombreadas con color naranja no se incluyeron en el atlas.

Figura 35. Red de estaciones de radiación global de Cenicaña.



Fuente: IDEAM.

B. Cenicafé

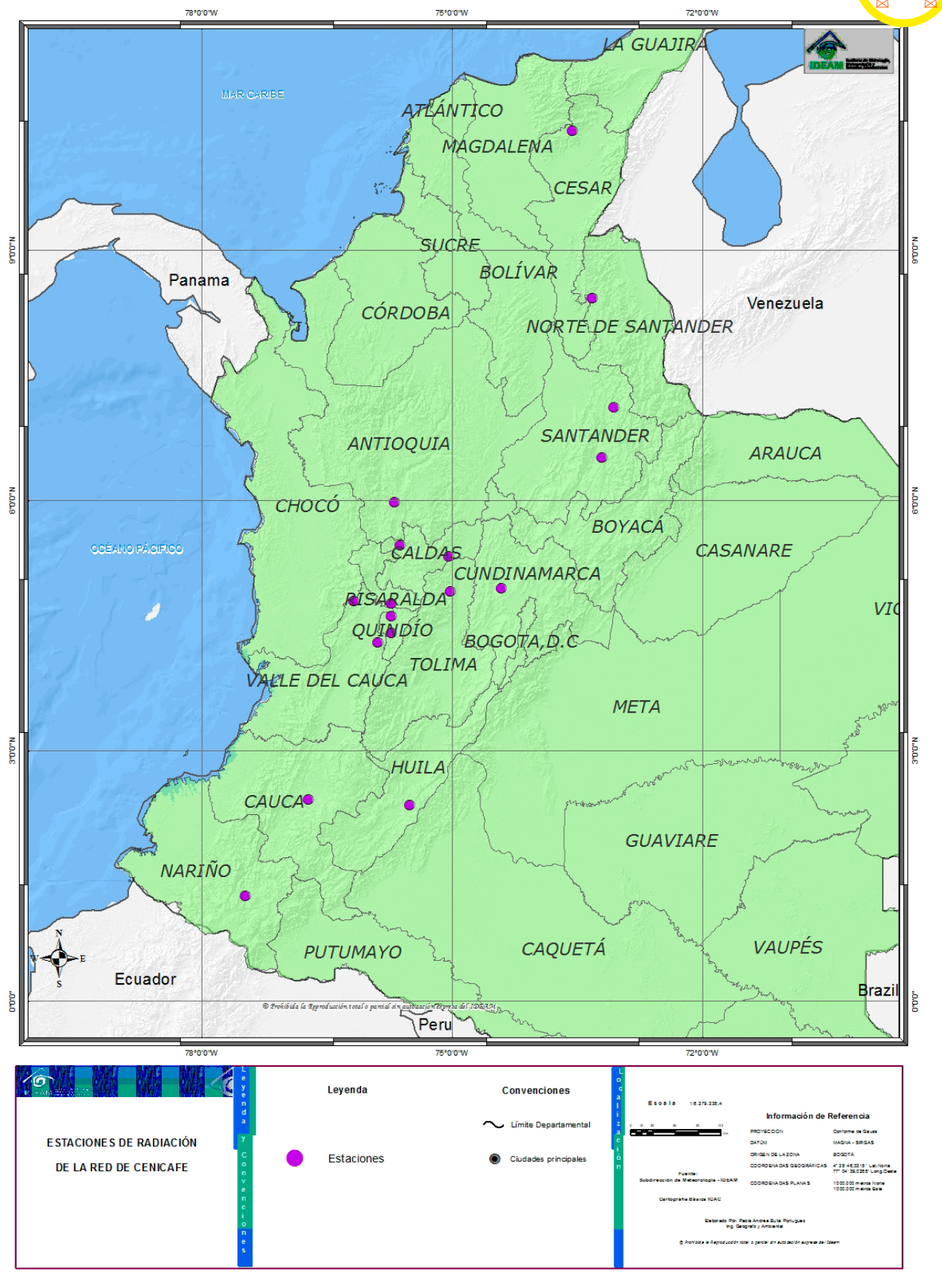
El Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) tiene 17 estaciones con actinógrafo marca Bel-Fort, estas reportaron irradiación global horizontal acumulada diaria hasta el año 2011 o antes. Las estaciones están ubicadas en zonas productoras de café, de la mayoría de los departamentos de la región Andina (ver Figura 36), y se comenzaron a instalar en 1991, tal como se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Ubicación de las estaciones de Cenicafé

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Años Analizados
Rosario	Venecia	Antioquia	5,97	-75,70	1635	1991-2012
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	5,32	-75,05	1395	1997-2009
Rafael Escobar	Supía	Caldas	5,45	-75,63	1307	1997-2005
Manuel Mejía	El Tambo	Cauca	2,40	-76,73	1735	1991-2008
Pueblo Bello	Pueblo Bello	Cesar	10,42	-73,57	1124	1996-2010
Santa Bárbara	Sasaima	Cundinamarca	4,93	-74,42	1478	1997-2010
Jorge Villamil	Gigante	Huila	2,33	-75,52	1420	1992-2012
Ospina Pérez	Consaca	Nariño	1,25	-77,48	1603	1997-2010
Convención G.M. Barriga	Convención	Norte de Santander	8,42	-73,33	1261	1997-2010
Paraguaicito	Buenavista	Quindío	4,40	-75,73	1203	1997-2011
Maracay	Quimbaya	Quindío	4,60	-75,73	1402	1997-2011
Catalina	Pereira	Risaralda	4,75	-75,73	1321	1997-2011
San Antonio	Florida-blanca	Santander	7,10	-73,07	1539	1997-2010
Alberto Santos	Socorro	Santander	6,50	-73,22	1499	1998-2011
Trinidad	Líbano	Tolima	4,90	-75,03	1456	1996-2011
Albán	El Cairo	Valle del Cauca	4,78	-76,18	1510	1997-2010
La Sirena	Sevilla	Valle del Cauca	4,28	-75,90	1519	1997-2012

Figura 36. Red de estaciones de radiación global de Cenicafé.

Fuente: IDEAM.



C. CAR

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) tiene 22 actinógrafos (reportan a nivel diario) y 15 piranómetros (reportan a nivel horario), ubicados en estaciones de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Para el presente atlas solo se utilizó la información de los piranómetros, los cuales empezaron a ser instalados en 2009, tal como se muestra en la tabla 9. Su ubicación se presenta en la Figura 37.

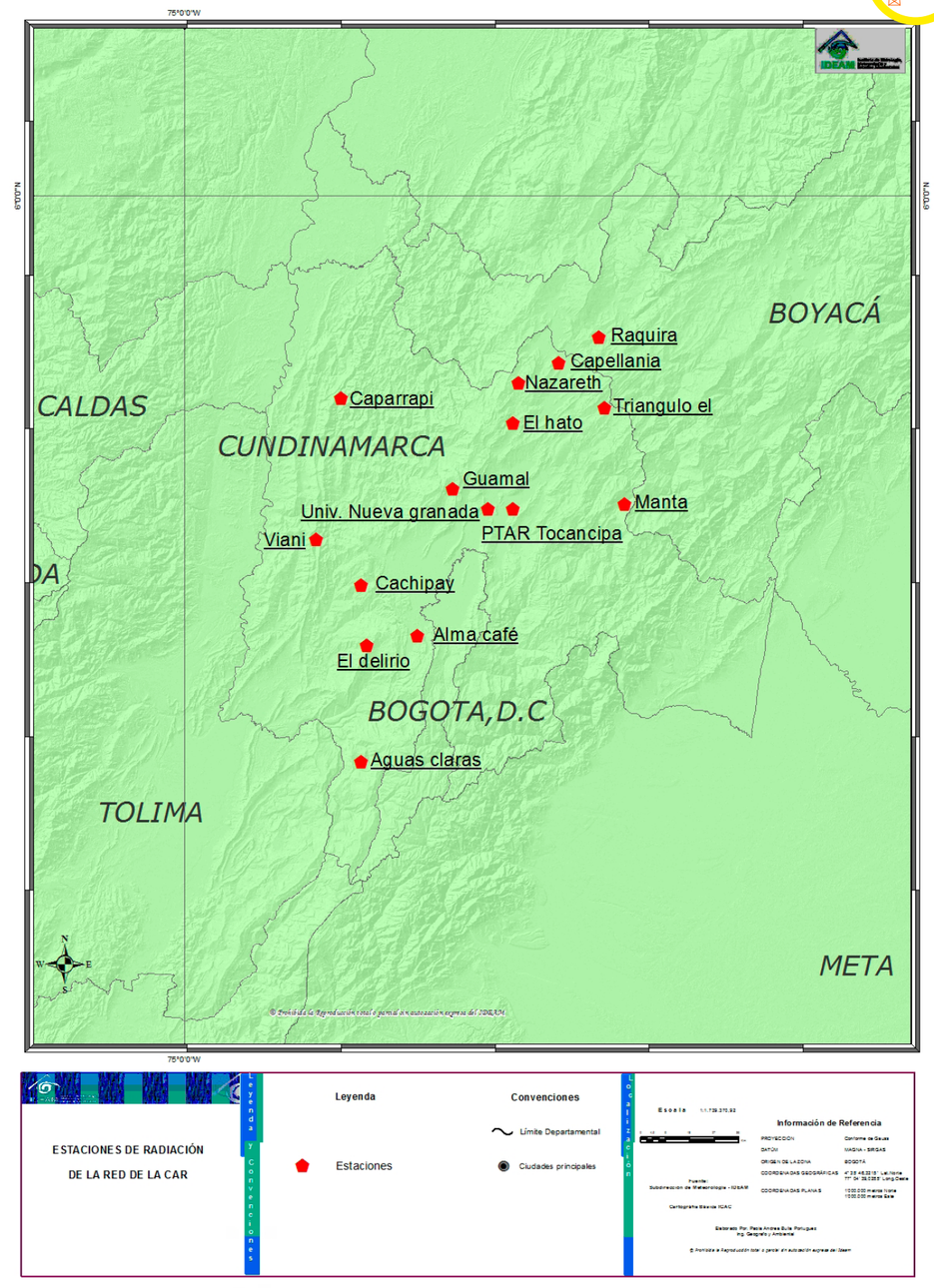
Tabla 9. Ubicación de las estaciones de la CAR

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Años Analizados
Ráquira	Ráquira	Boyacá	5,53	-73,63	2260	2010-2013
Cachipay	Cachipay	Cundinamarca	4,72	-74,42	1691	2010-2013
Universidad Nueva Granada	Cajicá	Cundinamarca	4,97	-74,00	2620	2010-2013
Caparrapí	Caparrapí	Cundinamarca	5,33	-74,48	1432	2010-2013
El Hato	Carmen de Carupa	Cundinamarca	5,25	-73,92	2840	2009-2013
Nazareth	Carmen de Carupa	Cundinamarca	5,38	-73,90	3037	2010-2013
El Delirio	El Colegio	Cundinamarca	4,52	-74,40	2053	2010-2013
Capellanía	Fúquene	Cundinamarca	5,45	-73,77	2564	2010-2013
El Triángulo	Lenguazaque	Cundinamarca	5,30	-73,62	2800	2010-2013
Manta	Manta	Cundinamarca	4,98	-73,55	1888	2011-2013
Aguas Claras	San Bernardo	Cundinamarca	4,13	-74,42	1956	2009-2013
Almacafé	Soacha	Cundinamarca	4,55	-74,23	2564	2010-2012
Guamal	Subachoque	Cundinamarca	5,03	-74,12	3000	2010-2013
PTAR Tocancipá	Tocancipá	Cundinamarca	4,97	-73,92	2575	2010-2013
Viani	Viani	Cundinamarca	4,87	-74,57	1573	2010-2013

*Nota: Las estaciones sombreadas con color naranja no se incluyeron en el atlas.

Figura 37. Red de estaciones de radiación global de la CAR.

Fuente: IDEAM.



D. IPSE

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) cuenta con 10 piranómetros CMP11, marca Kipp & Zonen, los cuales se instalaron desde el año 2011 (tabla 10) y están ubicados en diferentes municipios como se muestra en la Figura 38.

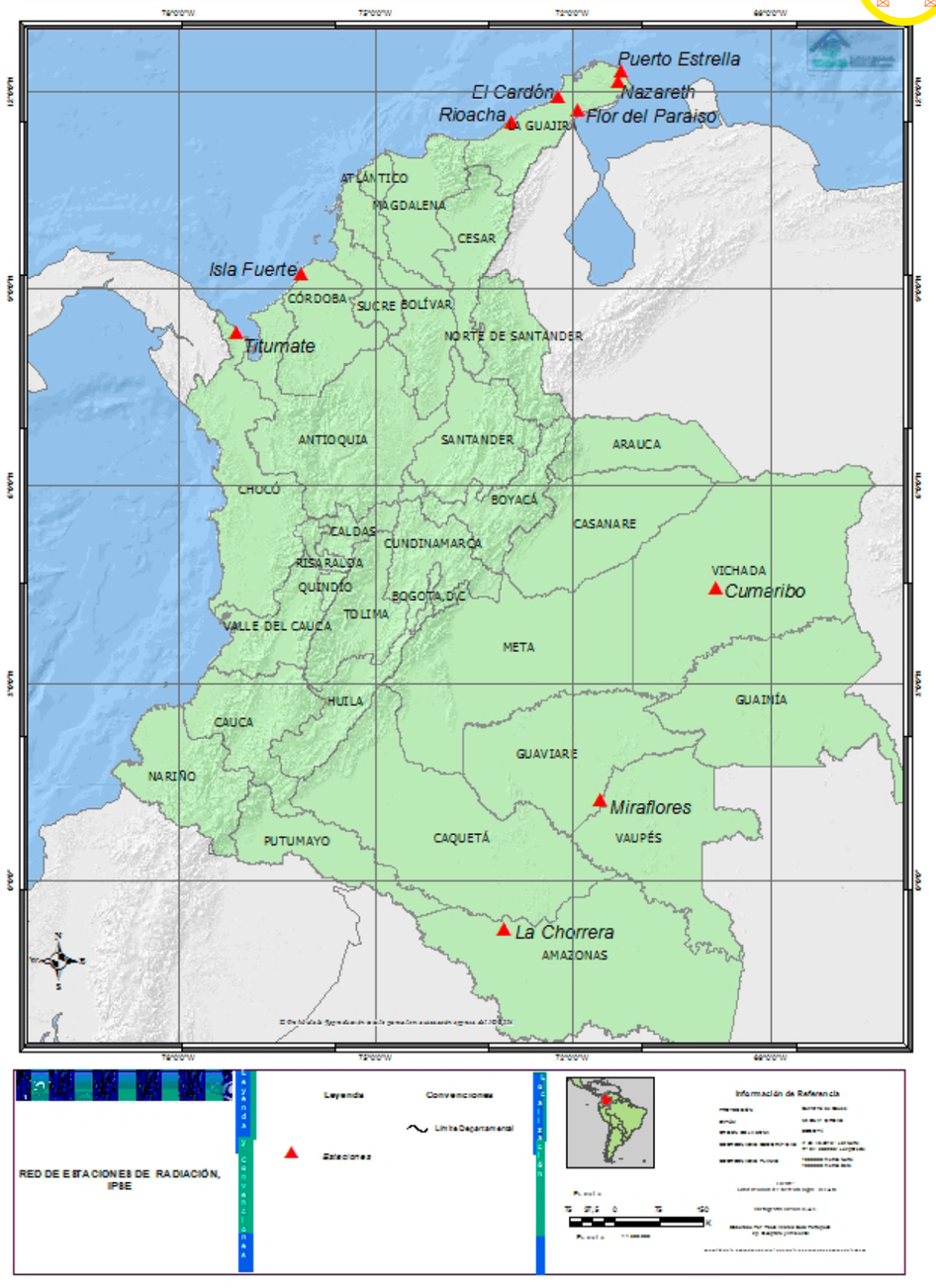
Tabla 10. Ubicación de las estaciones del IPSE

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Años analizados
La Chorrera	La Chorrera	Amazonas	-0,73	-73,02	184	2011-2013
Isla Fuerte	Cartagena	Bolívar	9,36	-76,21	200	2011-2015
Titumate	Unguía	Chocó	8,33	-77,08	33	2011-2015
Miraflores	Miraflores	Guaviare	1,22	-71,57	200	2011-2012
Riohacha	Riohacha	La Guajira	11,52	-72,92	4	2013-2014
El Cardón	Uribia	La Guajira	11,92	-72,21	4	2013
Flor del Paraíso	Uribia	La Guajira	11,70	-71,90	20	2011-2015
Nazareth	Uribia	La Guajira	12,14	-71,30	100	2011-2014
Puerto Estrella	Uribia	La Guajira	12,30	-71,24	10	2011-2015
Cumaribo	Cumaribo	Vichada	4,44	-69,80	51	2011-2013

*Nota: Las estaciones sombreadas con naranja no se incluyeron en el atlas.

Figura 38. Red de estaciones de radiación global del IPSE.

Fuente: IDEAM.



E. Fedearroz

La Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz) tiene instalados 28 piranómetros, marca Davis, se instalaron desde 2011, estos se relacionan en la tabla 11. En la Figura 39 se puede observar que estos sensores se encuentran ubicados principalmente en las zonas arroceras de los departamentos de Tolima, Casanare, Huila, Meta, Córdoba y Cesar.

Tabla 11. Ubicación de las estaciones de Fedearroz

Estación	Municipio	Departamento	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Años analizados
Nechí	Nechí	Antioquia	8,11	-74,80	31	2011-2014
Aguazul	Aguazul	Casanare	5,14	-72,50	1022	2011-2014
Nunchía	Nunchía	Casanare	5,46	-72,16	222	2011-2014
San Luis de Palenque	San Luis de Palenque	Casanare	5,43	-71,99	133	2011-2014
Villanueva	Villanueva	Casanare	4,53	-72,81	190	2011-2013
Yopal	Yopal	Casanare	5,33	-72,29	2218	2011-2014
San Martín	Aguachica	Cesar	7,95	-73,48	151	2011-2014
Valledupar	Valledupar	Cesar	10,49	-73,22	166	2011-2014
Cotorra - Conalgodón	Cotorra	Córdoba	9,03	-75,78	6	2013-2014
Montería	Montería	Córdoba	8,81	-75,85	17	2011-2014
Aipe	Aipe	Huila	3,25	-75,24	408	2011-2014
Campoalegre	Campoalegre	Huila	2,70	-75,36	514	2011-2014
Palermo	Palermo	Huila	2,93	-75,40	472	2011-2012
Fundación	Fundación	Magdalena	10,47	-74,14	30	2011-2014
Acacías	Acacías	Meta	3,81	-73,47	334	2011-2014
Granada	Granada	Meta	3,44	-73,75	336	2011-2014
Puerto López	Puerto López	Meta	3,93	-73,06	189	2011-2014
Cúcuta	Cúcuta	Norte de Santander	8,18	-72,52	1022	2011-2014
Majagual	Majagual	Sucre	8,55	-74,58	8	2011-2014
Gamba	Ambalema	Tolima	4,81	-74,77	260	2012-2014
Hacienda El Puente	Armero	Tolima	4,96	-74,91	326	2011-2014
Espinal	Espinal	Tolima	4,20	-74,98	385	2011-2014
Guamo	Guamo	Tolima	4,08	-74,93	329	2011-2014
Hacienda Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,13	1008	2011-2014
Hacienda La Sonora	Lérida	Tolima	10,47	-74,14	299	2011-2014
Hacienda El Chaco	Piedras	Tolima	4,48	-74,98	1021	2011-2014
Prado	Prado	Tolima	3,76	-74,93	316	2011-2013
C.I. Lagunas Saldaña	Saldaña	Tolima	3,91	-74,99	425	2011-2014

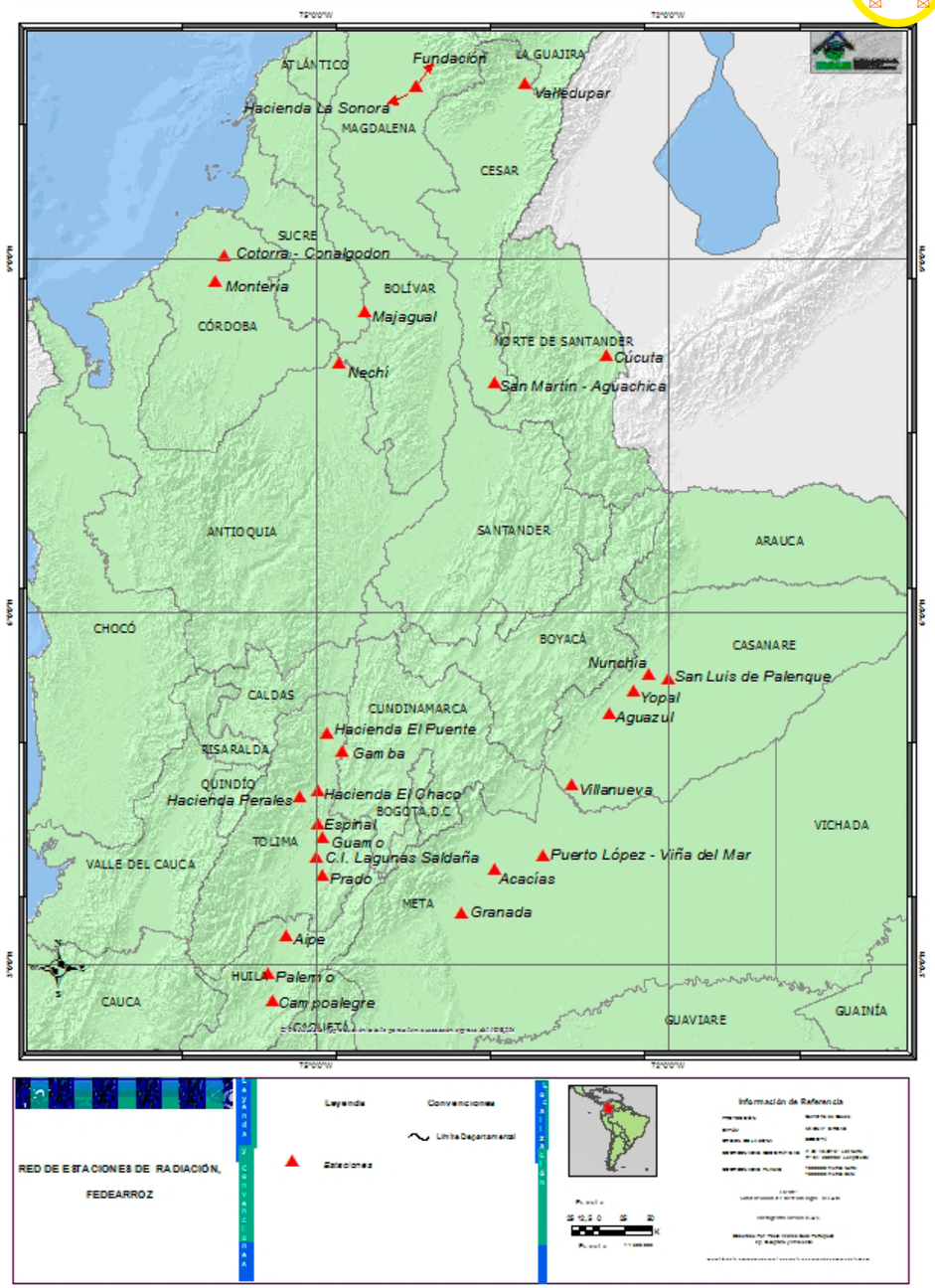
*Nota: Las estaciones sombreadas con color naranja no se incluyeron en el atlas.

F. Relación de otras redes de radiación

Se tiene conocimiento de la existencia de otras redes de radiación, pero no se utilizaron en el presente atlas, ya que se prefirió el análisis de las estaciones del IDEAM que estaban ubicadas en la misma área (y que fueron calibradas) o desafortunadamente porque no se tuvo acceso a la información. Las entidades que cuentan con sensores de radiación son: la Secretaria de Medio Ambiente de Bogotá (SDA) cuenta con 5 piranómetros automáticos (Escuela de Ingeniería, IDRD, Central de mezclas, Vitelma y Usme), estos reportan a nivel horario y han medido la radiación global desde 1997; otras Corporaciones Autónomas Regionales – CARs (Corantioquia, CVC); Departamentos Administrativos del Medio Ambiente (DAGMA, DAMAB, AMVA) y otros centros de investigación universitarios (Distrital, Córdoba, Tolima y la Fundación Universitaria Los Libertadores, principalmente)..

Fuente: IDEAM.

Figura 39. Red de estaciones de radiación global de Fedearroz.



Fuente: IDEAM, 2005.

4.1.2 Instrumentos de medida de la radiación global

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

Los radiómetros solares como los piranómetros y los pirheliómetros, según sus características (ver tabla 12), pueden servir para medir la radiación solar incidente global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa, la neta y el brillo solar.

Los radiómetros se pueden clasificar según diversos criterios: el tipo de variable que se pretende medir, el campo de visión, la respuesta espectral, etc.

Tabla 12. Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación

Tipo de Instrumento	Parámetro de medida
Piranómetro	i) Radiación global, ii) Radiación directa, iii) Radiación difusa iv) Radiación solar reflejada. Usado como patrón nacional
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación global
Pirgeómetro	Radiación difusa
Radiómetro neto o piranómetro diferencial	Radiación neta
Heliógrafo	Brillo solar

1. **Piranómetro:** es el instrumento más usado en la medición de la radiación solar (ver Figura 40). Mide la radiación semiesférica directa y difusa (la suma de estas dos es la radiación global) sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados, obtenida a través de la diferencia de calentamiento de dos sectores pintados alternativamente de blanco y negro en un pequeño disco plano. Cuando el aparato es expuesto a la radiación solar, los sectores negros se vuelven más cálidos que los blancos. Esta diferencia de temperatura se puede detectar electrónicamente generándose un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente. En la variación de la temperatura puede intervenir el viento, la lluvia y las pérdidas

térmicas de la radiación al ambiente. Por lo tanto, el piranómetro tiene instalado una cúpula de vidrio óptico transparente para proteger el detector, permite la transmisión isotrópica del componente solar y sirve para filtrar la radiación entre las longitudes de onda que oscilan aproximadamente entre 280 y 2.800 nm. Un piranómetro acondicionado con una banda o disco parasol, que suprime la radiación directa, puede medir la radiación difusa.

Fuente: Eppley, Kipp & Zonen, Thies Clima.

Figura 40. Piranómetros.



a. Piranómetro blanco y negro Eppley (BWP)



b. Piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP)



c. Piranómetro CMP11 (fuente Thies Clima)

De acuerdo con las especificaciones de la OMM existen varias clases de piranómetros, los cuales son clasificadas por la ISO 9060 en patrones secundarios, de primera y segunda clase. Generalmente, los de primera emplean una termopila como elemento de detección. Los de segunda, emplean las fotocélulas como elemento de detección y son menos costosos que los otros tipos de piranómetros empleados generalmente. Los piranómetros de primera clase son usados para medir la radiación solar global normalmente. Un ejemplo de piranómetro de primera clase es el blanco y negro Eppley de la Figura 40(a) y otro de patrón secundario es el espectral de precisión Eppley (Ver Figura 40(b)).

El sensor en todas las estaciones satelitales del IDEAM es el piranómetro CMP 11 de la empresa alemana Adolf Thies GmbH & Co. KG, mostrado en la Figura 40(c).

Se pueden usar filtros en lugar de la bóveda de cristal para medir la radiación en diversos intervalos espectrales como, por ejemplo, la radiación ultravioleta. En las aplicaciones que requieren datos de radiación ultravioleta no se deben emplear los piranómetros de principio fotovoltaico debido a que estos no son sensibles a la radiación UV.

2. **Pirheliómetros:** son instrumentos usados en la medición de la radiación solar directa. Esto se consigue colocando el sensor normalmente en el foco solar, bien sea manualmente o sobre un montaje ecuatorial.

Figura 41. Pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6.

Fuente: PMOD WRC.

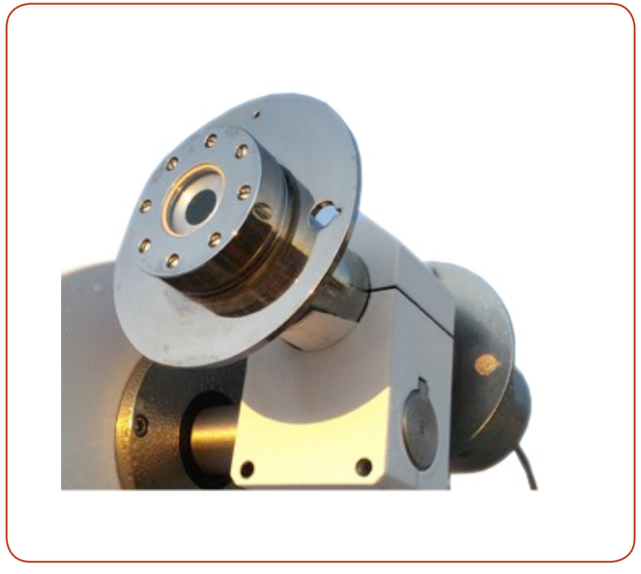


i. Pirheliómetro de cavidad absoluta. El instrumento posee dos cavidades cónicas idénticas, una externa, que se calienta al estar expuesta a la radiación solar, mientras la otra cavidad, oculta en el interior del instrumento, se calienta utilizando energía eléctrica hasta obtener una temperatura igual a la cavidad externa, se le asigna el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente. La Figura 41 presenta el pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6, correspondiente al modelo de patrón nacional del que dispone el IDEAM.

ii. Pirheliómetros secundarios. Son Instrumentos que miden la radiación solar directa y se calibran por intercomparación con un Pirheliómetro de cavidad absoluta. Uno de los varios diseños existentes en el mundo es el Eppley de incidencia normal de la Figura 42, este posee un sensor de termopila compensada de bismuto-plata con 15 junturas y un tiempo de respuesta de aproximadamente 20 s. Este instrumento requiere un dispositivo que le permita seguir el movimiento del Sol durante su tránsito diurno por el cielo. El pirheliómetro secundario es estable y puede emplearse como patrón secundario para calibrar otros instrumentos.

Fuente: Eppley.

Figura 42. Pirheliómetro Eppley de incidencia normal.



3. **Actinógrafo:** es un instrumento para registrar la radiación global que funciona mediante un sensor termomecánico, protegido por una cúpula en vidrio. Está conformado por un arreglo bimetálico de dos superficies, una pintada de color negro para absorber las ondas electromagnéticas de la radiación solar y la otra, de blanco para que las refleje y así ocasionar la diferencia de temperatura con el fin de formar curvatura en la placa negra que se amplifica por medio de palancas y se transmite a un tambor movido por un mecanismo de reloj para describir una gráfica que registra los valores de la radiación global. La precisión de los valores de la radiación global que se obtienen con este instrumento es del orden de ± 8%. Estos instrumentos requieren una calibración con un patrón secundario una vez por año. El actinógrafo se diferencia de un piranómetro porque el sensor es una lámina bimetálica y el del piranómetro es una termopila.

La Figura 43 muestra un actinógrafo Fuess, similar a los utilizados en Colombia por el IDEAM. Es de anotar que otras instituciones regionales como Cenicafé disponen de actinógrafos Belfor con precisiones de ± 6%.

Figura 43. Actinógrafo bimetálico, tipo Robitzsch-Fuess 58dc.

Fuente: Rfuess-Mueller.



Cabe señalar que en la práctica, generalmente, es difícil obtener mediciones de buena calidad y para las operaciones de rutina sólo pueden lograrse con un equipo moderno, adecuadamente mantenido. .

4.1.3 Red nacional e instrumentos de medida del brillo solar

En la medición de la insolación o brillo solar se utiliza generalmente el heliógrafo de Campbell-Stokes, este es un instrumento relativamente sencillo, que detecta la luz solar cuando la energía de los rayos solares, concentrada mediante una lente, quema una cartulina especial. Este instrumento registrador, proporciona las horas de Sol efectivo en el día (insolación o brillo solar) asociadas a los periodos de tiempo de radiación solar directa que superan un valor mínimo. La duración de la insolación correspondiente a un período determinado, se define como la suma de los subperíodos durante los cuales la irradiancia solar directa rebasa los 120 W/m^2. El heliógrafo opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas (ver Figura 44) que, como resultado de la exposición a la radiación solar directa, se quema formando líneas, cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol.

Fuente:IDEAM.

Figura 44. Heliógrafo Campbell-Stokes.





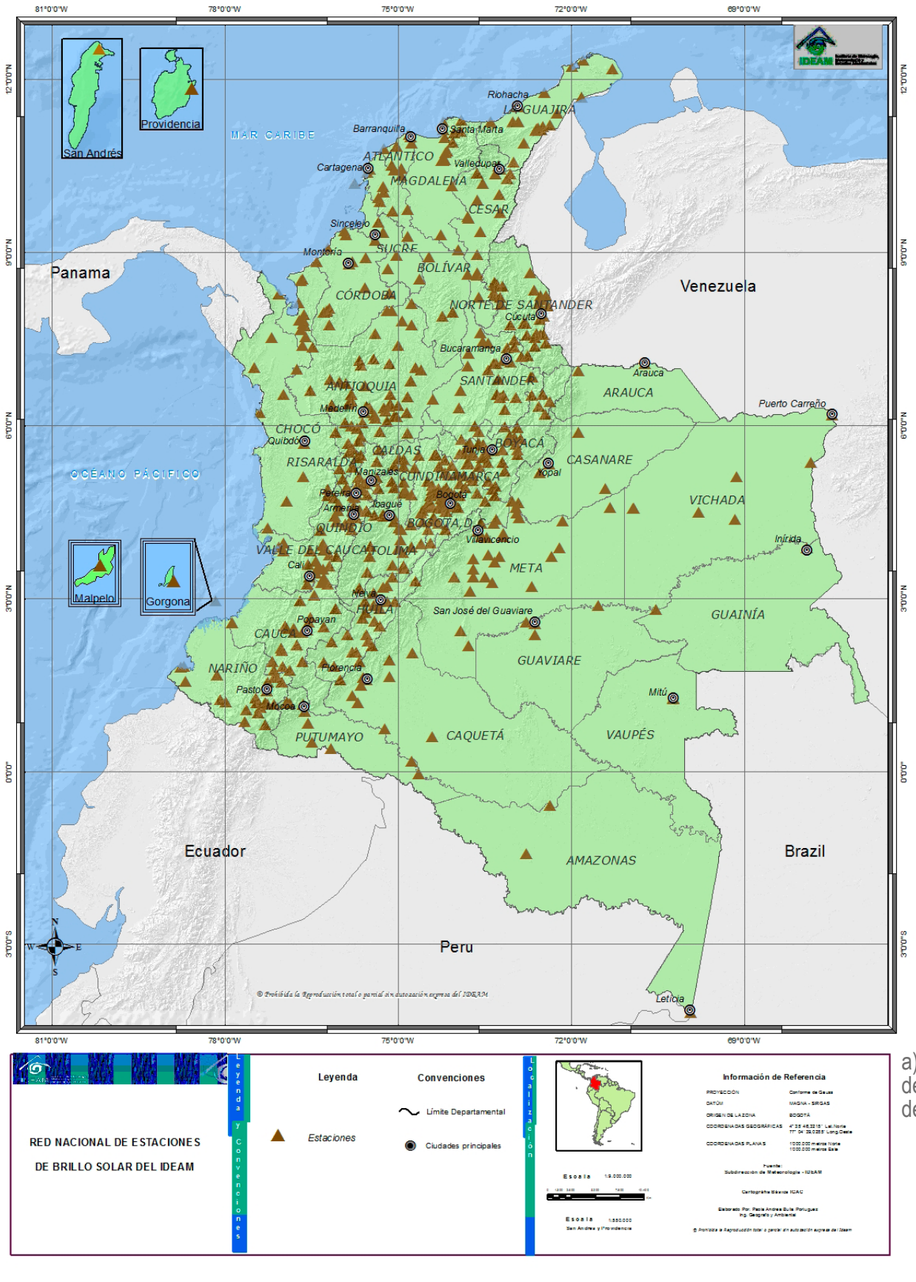
Para obtener mediciones de radiación de buena calidad, los sensores se deben calibrar y tener un mantenimiento adecuado

En localidades donde no se mida directamente la radiación solar global es posible obtenerla a partir de los valores de horas de brillo solar, mediante un modelo de regresión lineal simple llamado Ångström modificado.

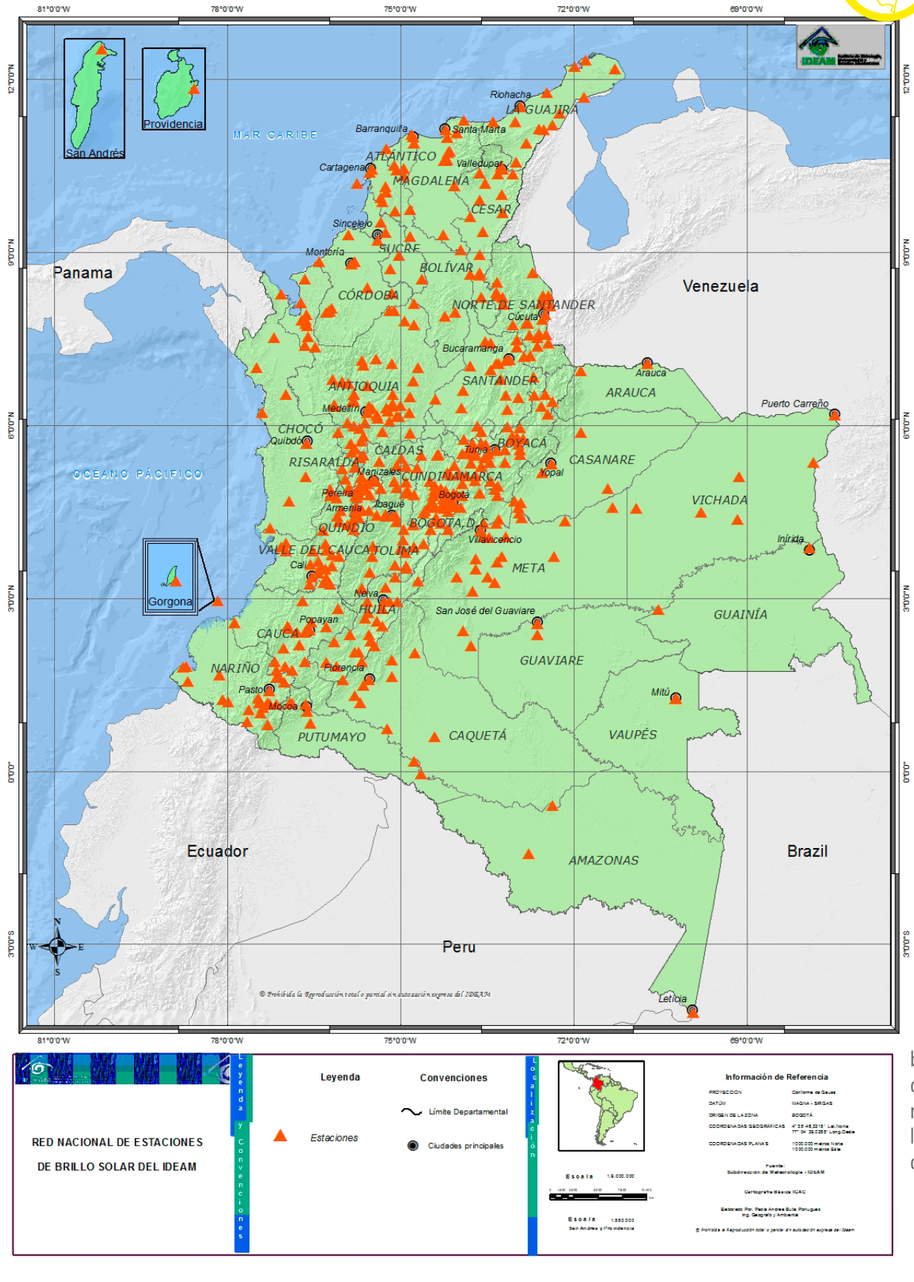
La red nacional de instrumentos del IDEAM que miden el brillo solar está compuesta por cerca de 607 heliógrafos, distribuidos a lo largo del territorio nacional, tal como se muestra en la Figura 45(a). De esta cantidad y teniendo como fecha límite diciembre de 2016, hay 369 sensores que tienen más de 10 años de información y 501 que tienen mínimo 3 años de información completa (ver Figura 45(b)). Estos últimos fueron los escogidos para realizar los mapas de brillo solar. Como se aprecia en las figuras, hay una gran densidad de sensores en las regiones Andina y Caribe y una baja densidad en la Orinoquía, Amazonía y la costa Pacífica.

Figura 45. Red nacional de heliógrafos del IDEAM.

Fuente: IDEAM.



a) Red Nacional de heliógrafos del IDEAM



b) Red de heliógrafos del IDEAM seleccionados para incluir en los mapas de brillo del Atlas

4.2 UNIDADES DE MEDIDA

4.2.1 Unidades de medición de la radiación global

La tasa de transferencia de energía por radiación electromagnética es llamada **flujo radiante,** el cual tiene unidades de energía por unidad de tiempo, este es expresado como:

$$F = dQ / dt$$

Esta es medida en joules por segundos (equivalente a vatios que es una unidad de potencia eléctrica). Por ejemplo, el flujo radiante del Sol es cercano a $3{,}90 \times 10^{26}$ vatios.

El flujo radiante por unidad de área $\frac{Energía}{Area\ Tiempo}$ es llamado irradiancia (o densidad de flujo radiante). Esta magnitud de radiación instantánea está expresada en unidades de potencia por unidad de superficie. Este se expresa como:

$$E = dQ / dt / dA$$

y es medido en vatios por metro cuadrado. La irradiancia de la radiación electromagnética del Sol (el cual tiene un radio aproximado de 7×10^8 metros) está dada por:

$$E_{(Sol)} = \frac{3{,}90 \times 10^{26}}{4\pi (7 \times 10^8)^2} = 6{,}34 \times 10^7\ W\ m^{-2}\ .$$

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía (flujo radiante) recibida por unidad de área en forma instantánea, como se mencionó anteriormente, mientras que la exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la irradiancia es integrada en el tiempo como $\frac{Energía}{Area}$ y cuya unidad es el kWh/m² por día (si es integrada en el día) o MJ/m² por día.

Por ejemplo, el piranómetro de Bogotá mide la potencia promedio por metro cuadrado cada minuto (W/m²). Estos valores se llevan a energía (en Wh/m²) al integrarlos en el tiempo (en este caso en una hora). La mejor manera de satisfacer las necesidades de exactitud es realizando observaciones cada minuto, incluso cuando los datos que finalmente se registrarán sean totales integrados para períodos de hasta una hora o más (ej. acumulados diarios). Los datos sencillos de un minuto pueden ser totales integrados o un flujo medio calculado entre seis o más muestras.

La tabla 13 presenta las conversiones más importantes utilizadas en el campo de la radiación.

Tabla 13. Conversiones útiles para radiación

Unidad	Equivalencia
1 vatio (W)	1 joule/segundo (J/s)
1 Wh	3.600 J
1 kWh	3,6 MJ
1 Wh	3,412 Btu
1 Caloría	0.001163 Wh
1 Caloría	4,187 Joule
1 Kcal/s	4,1868 kW
1 Kcal/h	1,163 W
1 cal/cm²	11,63 Wh/m²
1 cal/cm²	1 langley (ly)
1 langley/min	0.06978 W/cm² =697,8 W/m²
1 MJ/m²	0,27778 kWh/m²
1 MJ/m²	277,78 Wh/m²
1 MJ/m²	23,88 cal/cm²
1 BTU	252 calorías
1 BTU	1,05506 KJ
1 joule	9,48x10-4
1 Btu/pie²	0.271 cal/cm²
1 cal/(cm²*min)	60,29 MJ/m² por día

4.2.2 Unidades de medición de brillo solar

La magnitud física de la duración del brillo solar o insolación es el tiempo. La unidad que se emplea generalmente es la hora. Con fines climatológicos se utilizan

expresiones tales como: "horas de Sol al día", "horas de Sol efectivo en el día" u "horas de insolación diaria". También se hace referencia a la duración de la insolación extraterrestre posible (SDo) o a la duración de la insolación máxima posible (SDmax). Los promedios mensuales de horas de Sol al día se pueden multiplicar por los días del mes respectivo para obtener el promedio del acumulado de horas de Sol al mes.

4.3 MAPAS DE IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL Y BRILLO SOLAR

4.3.1 Distribución a nivel mundial de la irradiación global horizontal

La irradiación global horizontal es la suma de las componentes directa y difusa, además, es el parámetro más importante en la evaluación del potencial de la energía solar en una región en particular. Esta magnitud de radiación instantánea está expresada en unidades de potencia por unidad de superficie y es medida en vatios por metro cuadrado (W/m²). Las cantidades de radiación expresadas en términos de irradiancia son generalmente integradas en el tiempo como $\frac{Energía}{Area}$ y las unidades utilizadas son el kWh/m² por día (si es integrada en el día) o por año (si es integrada en el año).

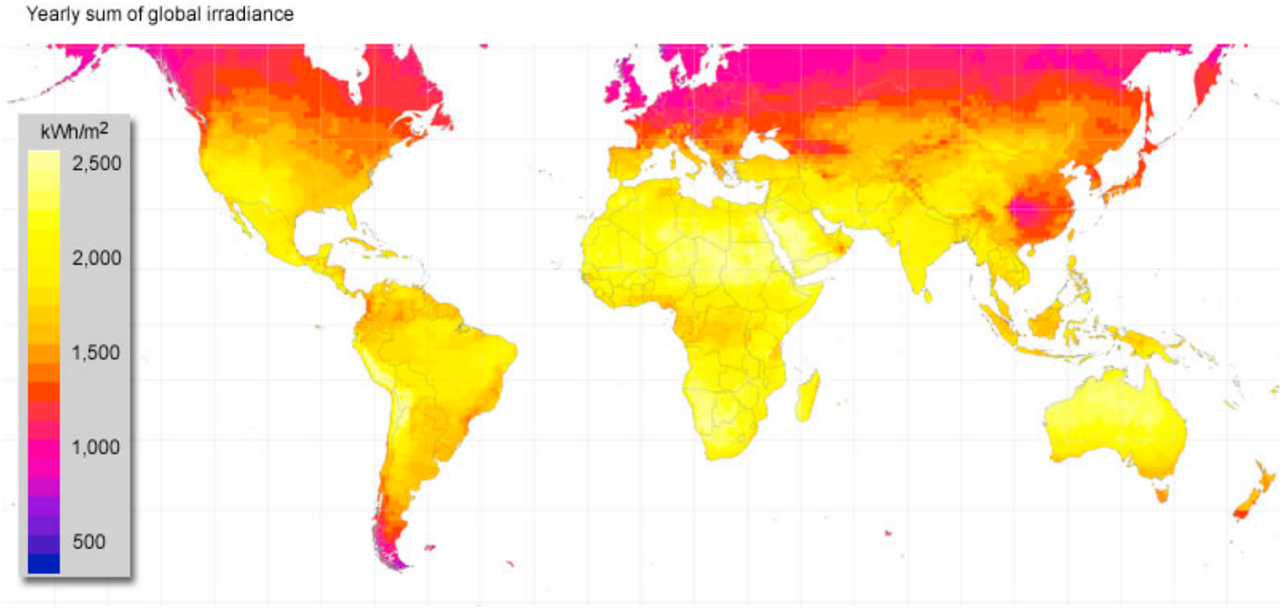
No todos los puntos de la superficie terrestre reciben la misma cantidad de radiación solar. La posición relativa de la Tierra respecto al Sol y el movimiento de esta alrededor del astro condicionan, por ejemplo, que en el ecuador se reciba más energía que en los polos y que en verano llegue más energía que en invierno.

La Figura 46 muestra la irradiación global horizontal media recibida en superficie, expresada en kWh/m² por año, la cual oscila desde un máximo de entre 2.500 y 2.600 kWh/m² por año (entre 6,8 y 7,2 kWh/m² por día) en las regiones despejadas de nubosidad del Sahara, Arabia y el desierto de Atacama, hasta un mínimo de 480 kWh/m² por año (1,3 kWh/m² por día) en las islas brumosas del Ártico. La media global está alrededor de los 4,0 kWh/m² por día.

Los valores máximos se concentran en las zonas entre los 15° y 30° de latitud, debido a que los rayos solares llegan a la superficie terrestre en forma más perpendicular que sobre otras latitudes, principalmente, en las épocas de verano de cada hemisferio. En la noche polar de cada hemisferio, la radiación solar en las zonas polares es cercana a cero. En el día polar, la radiación solar en los polos es equivalente a la radiación solar de latitudes medias del hemisferio opuesto al día polar, pero las temperaturas no son equivalentes, ya que en días polares las temperaturas son siempre cercanas o menores a o °C.

Figura 46. Irradiación global media incidente sobre una superficie horizontal recibida durante el año (kWh/m² por año).

Fuente: Green Rhino Energy.



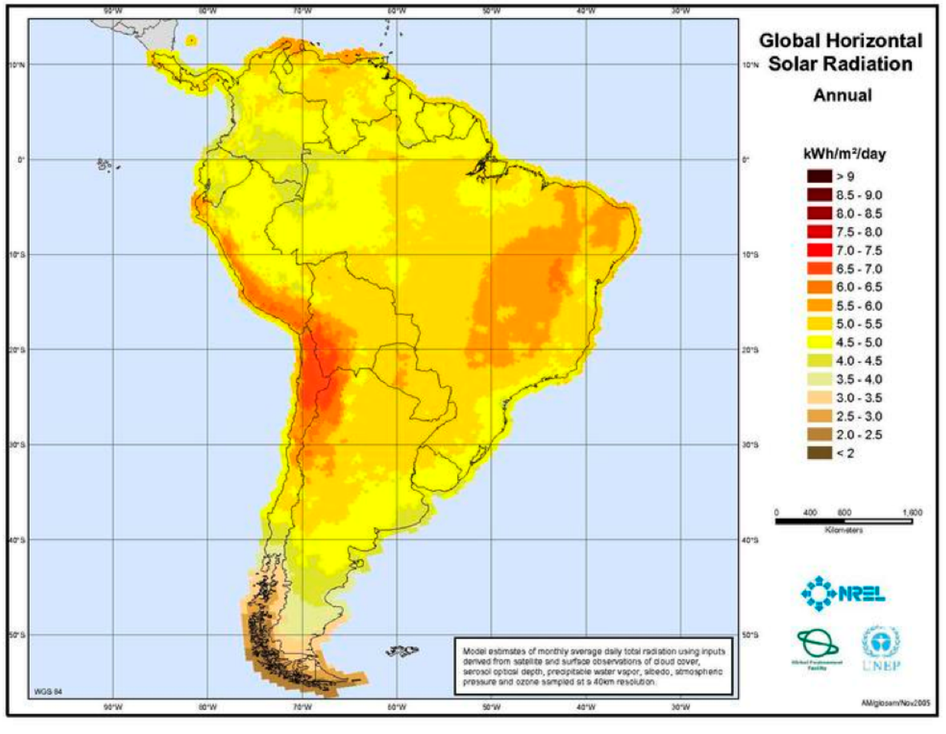
La Figura 47 registra la irradiación global horizontal media recibida en superficie, expresada en kWh/m² por día para Latinoamérica, oscilando entre los valores más altos de radiación a nivel del suelo de 7,0 a 7,2 kWh/m² por día (entre 2.555 y 2.600 kWh/m² por año) en el desierto de Atacama, hasta mínimos entre 2,0 y 2,5 kWh/m² por día (entre 730 y 915 kWh/m² por año) al sur del continente.

De acuerdo con esta figura, en Colombia los valores de irradiación global horizontal media recibida en superficie oscilan, desde un máximo de entre 5,5 y 6,0 kWh/m² por día (entre 2.000 y 2.200 kWh/m² por año) en el norte de la región Caribe,

hasta mínimos de entre 3,0 y 3,5 kWh/m² por día (entre 1.100 y 1.280 kWh/m² por año), en sectores de la región Pacífica. El mapa de la Figura 47 fue estimado a partir de un modelo que usa de entrada datos derivados de observaciones satelitales y de superficie relacionadas con cubrimiento de nubes, profundidad óptica de aerosoles, vapor de agua precipitable, albedo, presión atmosférica y columna de ozono.

Fuente: National Renewable Energy Laboratory. Periodo 1999-2011

Figura 47. Irradiación global media anual incidente sobre una superficie horizontal en Latinoamérica (kWh/m² por día).



En la figura 47, se presenta el análisis de los mapas de irradiación global horizontal media en Colombia, resultante de observaciones en superficie, de acuerdo con la Red Nacional de Medición de la Radiación Global que se describe en la sección 4.1.1 y de los resultados de la modelación. Los mapas se realizaron con base en los promedios mensuales de la irradiación global horizontal de las 240 estaciones escogidas, estos se complementaron con los resultados de la modelación de cerca de 340 sensores de brillo solar, de los 501, escogidos para aplicarles el modelo que convierte los datos de brillo solar a irradiación global. Los 161 sensores de brillo solar restantes se descartaron debido a que en su municipio o ciudad había alguno de los 240 sensores de radiación global seleccionados.

4.3.2 Distribución espacial y temporal de la irradiación global horizontal en Colombia

El conocimiento de la distribución espacial y temporal del potencial energético solar es importante en la identificación de regiones estratégicas, en donde es más adecuada la utilización de la energía solar para lograr la solución de necesidades energéticas y otras aplicaciones.

a) Análisis promedio anual

En la Figura 48 se presenta el promedio anual multianual de la irradiación global recibida en superficie sobre el territorio colombiano, junto con los histogramas de las principales ciudades del país. El valor de la energía corresponde al valor agregado de los kWh que en promedio incide durante el día en un metro cuadrado, expresado en kWh/m² por día. Este es una distribución espacial más detallada y real que la mostrada en el comportamiento de la irradiación global horizontal en el mundo y en Latinoamérica. Se destacan los promedios más altos en amplios sectores de la región Caribe, la Orinoquia y los valles interandinos, mientras que los menores se dan en amplios sectores de la región Pacífica, el occidente de la Amazonía y en algunos sectores aislados de las tres cordilleras.

Colombia, debido a su posición geográfica, es favorecida con una gran disponibilidad de recurso solar. Las zonas de mayor intensidad de radiación solar global, superiores a los 4,5 kWh/m² por día, son: las Islas de San Andrés y Providencia, amplios sectores de la región Caribe, Vichada, Arauca, Casanare, Meta, el norte, sur y oriente de Antioquia, el centro y norte de Boyacá, el occidente de Cundinamarca, el oriente y centro del Tolima, el norte del Huila; la zona que se inicia en el norte

del Cauca, atraviesa el Valle del Cauca de sur a norte y llega hasta el Eje Cafetero, así como sectores puntuales del norte de Nariño, del norte de Norte de Santander y del suroriente de Santander. Los valores más altos (superiores a los 5,5 kWh/m² por día) se muestran en pequeños sectores del centro y norte de La Guajira.

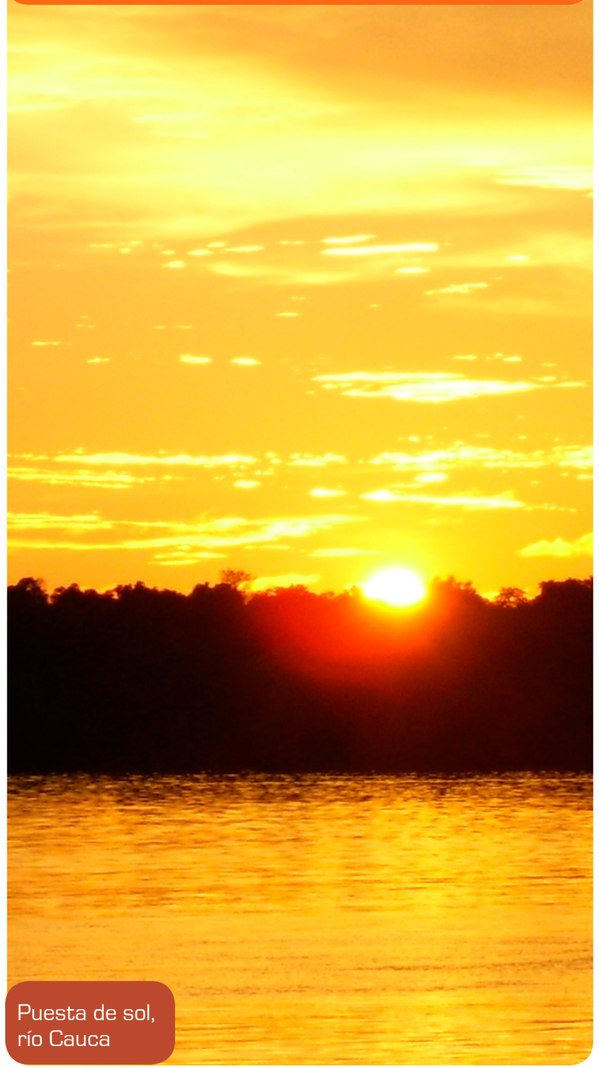
Las zonas con menor intensidad de radiación solar global en Colombia, con promedios inferiores a los 3,5 kWh/m² por día, se registran en sectores del occidente del Chocó, occidente de Putumayo, oriente de Cauca, oriente, sur y noroccidente de Nariño y en pequeños sectores de Caquetá, Huila, Cundinamarca, Quindío, Boyacá y Santander.

b) Análisis espacio-temporal a lo largo del año

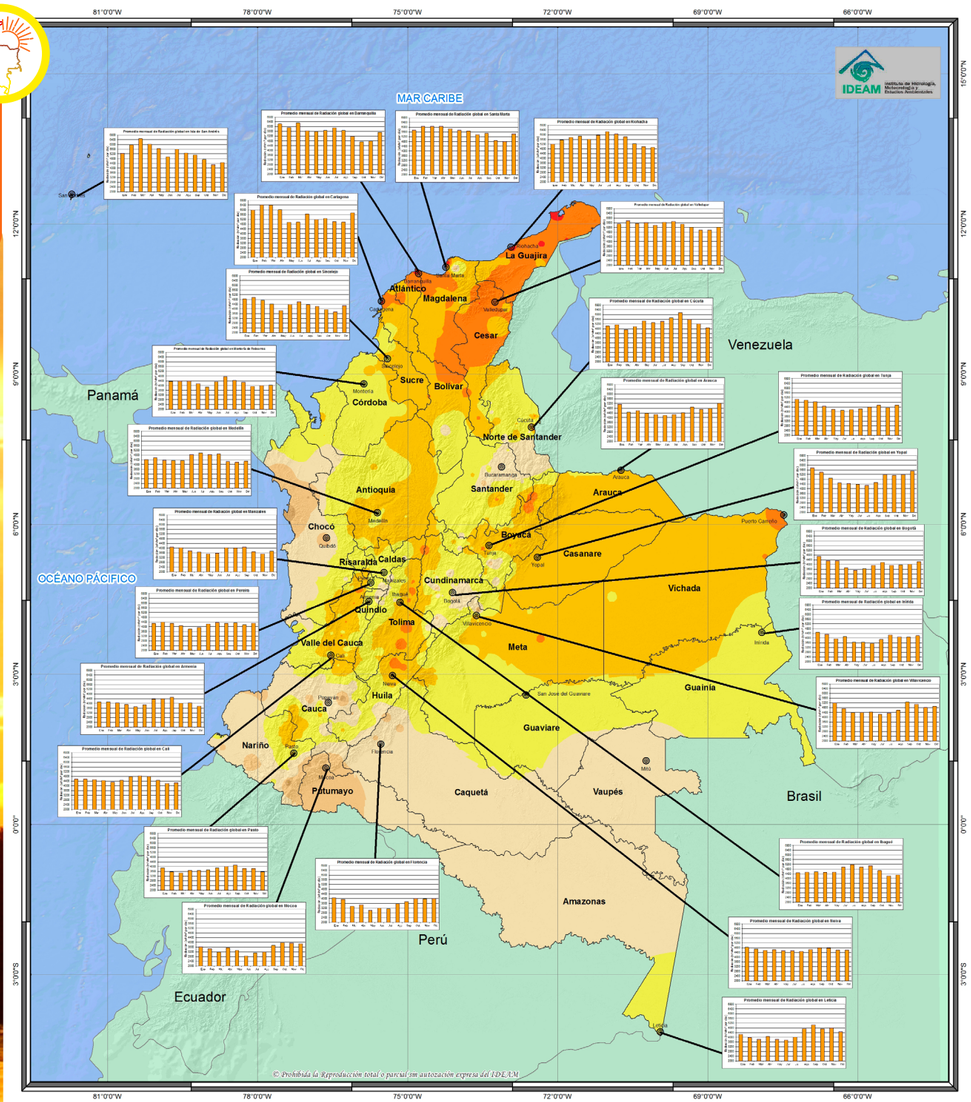
En los mapas 1 al 12 se presenta la distribución de la irradiación global media recibida en superficie, sobre el territorio colombiano a lo largo del año, expresada en kWh/m² por día. Teniendo en cuenta estos mapas y los histogramas de la Figura 48, se destaca lo siguiente:

- **Región Caribe:** en la mayoría de las estaciones se presenta un comportamiento bimodal, en el cual los promedios más altos se dan al inicio, en febrero y a mediados del

Figura 48. Promedio anual multianual de la irradiación global recibida en una superficie horizontal durante el día (KWh/m² por día), con histogramas de las principales ciudades del país. (Promedios mensuales en Wh/m² por día).



Puesta de sol, río Cauca



Fuente: IDEAM.

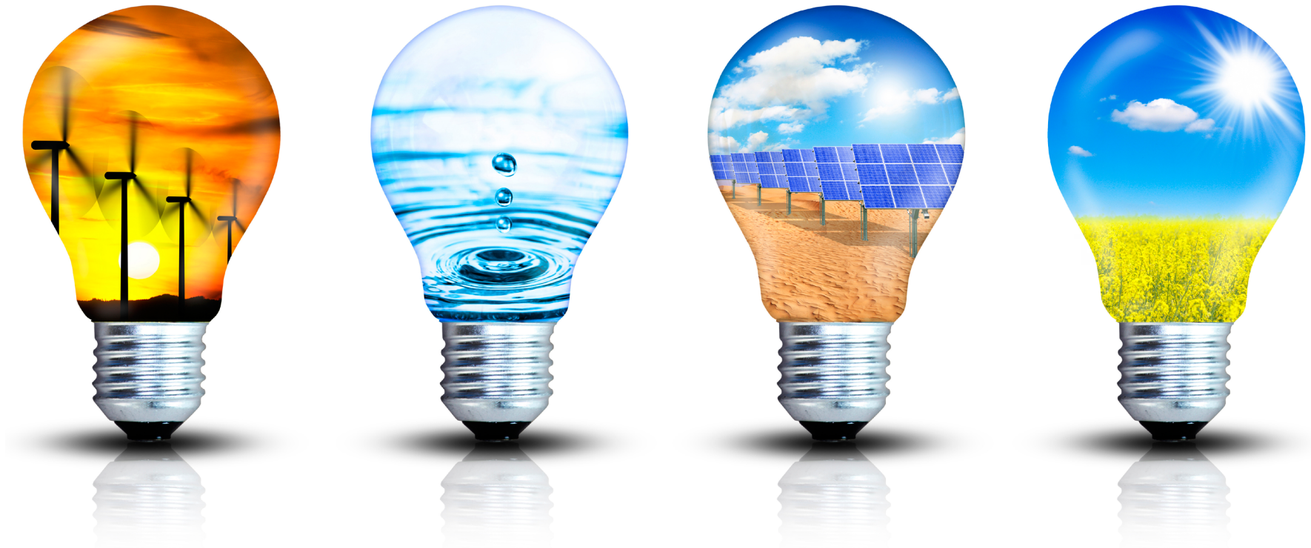
año, en julio y agosto. Los promedios más bajos son entre abril y mayo y entre septiembre y noviembre. En San Andrés y Providencia también se muestra un comportamiento bimodal, aunque el primer máximo (que es el mayor) se da entre marzo y mayo y el otro entre julio y agosto, mientras que los mínimos se dan en junio y entre octubre y diciembre.

- **Región Andina:** muestra un comportamiento bimodal, es decir, dos períodos de alta y dos de baja irradiación global durante el año. Los períodos con los valores más altos son entre enero y febrero y entre julio y agosto (en algunas estaciones puede incluir septiembre). Los meses con los valores más bajos de irradiación ocurren en abril, mayo, octubre y noviembre. En algunas estaciones de Nariño se presenta un comportamiento monomodal, con valores más bajos a principios y finales del año y más altos entre julio y septiembre, mientras que en algunas estaciones de Boyacá es opuesto al descrito.
- **Región Pacífica:** en el norte de la región se presenta un comportamiento monomodal, con valores más altos a mediados del año y más bajos a principios y finales del año. En el resto de la región, el comportamiento es bimodal con promedios más altos entre marzo y mayo y entre agosto y septiembre y los más bajos en junio, julio, noviembre, diciembre y enero.
- **Amazonía:** el sur de la región presenta un comportamiento monomodal, con valores altos a mediados del año y bajos a principios y finales del año. En el resto de la región el comportamiento es contrario al descrito.
- **Orinoquía:** gran parte de la región muestra un comportamiento monomodal con valores altos a principios y finales del año y bajos a mediados del año.

El Anexo 3 contiene la tabla con los promedios mensuales de la irradiación global acumulada diaria recibida en superficie en las principales ciudades del país, expresada en Wh/m² por día.

4.3.3 Comportamiento horario de la irradiación global horizontal en algunas ciudades del país

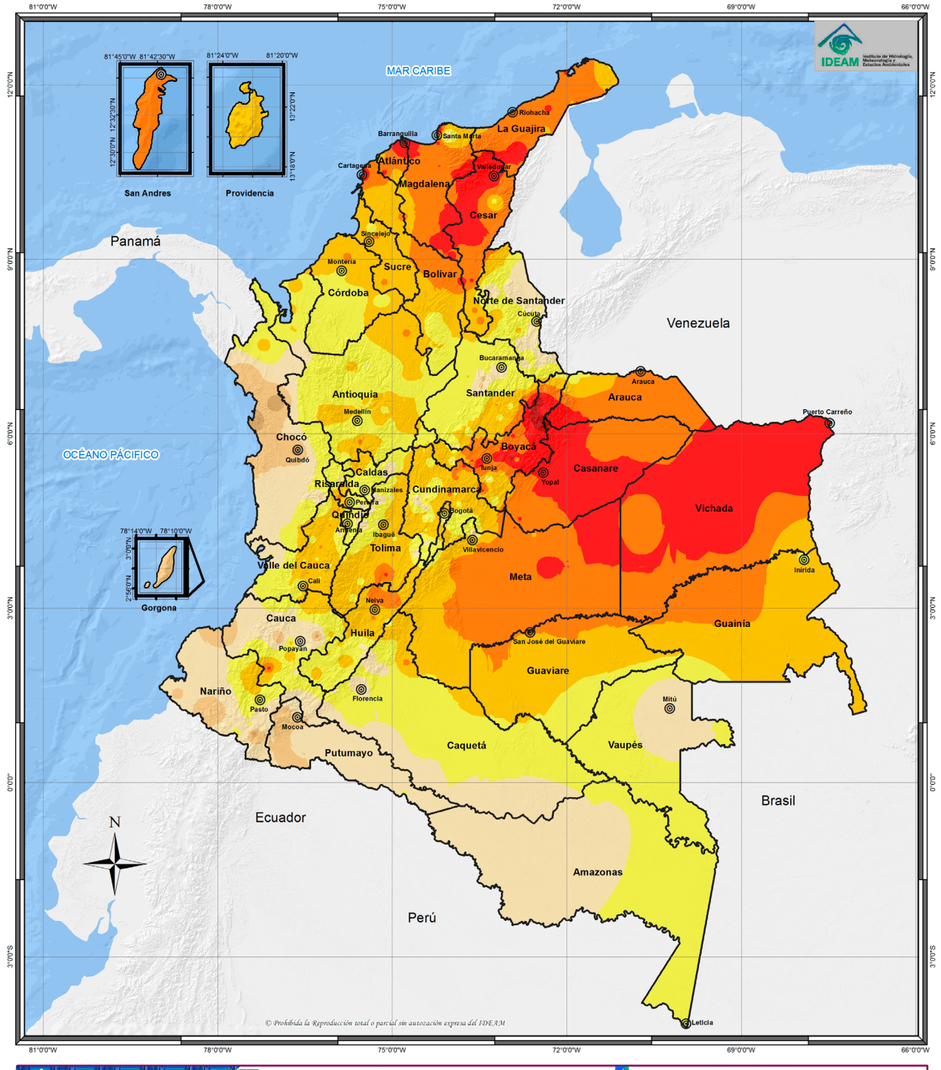
Con base en la información de las estaciones automáticas y Sutron del IDEAM y de las estaciones de la CAR, IPSE y Fedearroz, cuyos sensores proporcionan información a nivel horario, se generaron los promedios horarios a nivel mensual de la irradiación global horizontal. Para el resto de sensores, que generan un solo dato diario, equivalente al acumulado de la irradiación global durante el día, no fue posible realizar este análisis, por ejemplo, en las estaciones convencionales del IDEAM (actinógrafos y algunos piranómetros), Cenicafé (actinógrafos) y Cenicaña (piranómetros).

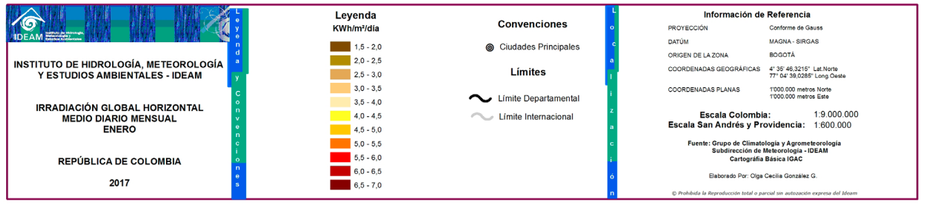


El Anexo 4, presenta las tablas con los promedios horarios mensuales de irradiación global media recibida en superficie, expresada en Wh/m², para algunas ciudades del país. Se generaron los promedios horarios en cerca de 145 estaciones (tanto del IDEAM como de la CAR, IPSE y Fedearroz) pero solo se muestran los promedios de la estación más representativa en las siguientes ciudades, dándole prioridad a las estaciones del IDEAM que fueron calibradas y cuya información está validada hasta diciembre del 2016: Armenia, Barranquilla, Bogotá, Cali, Cúcuta, Florencia, Ibagué, Inírida, Leticia, Medellín, Montería, Pasto, Riohacha, San Andrés, Santa Marta, Valledupar, Villavicencio y Yopal.

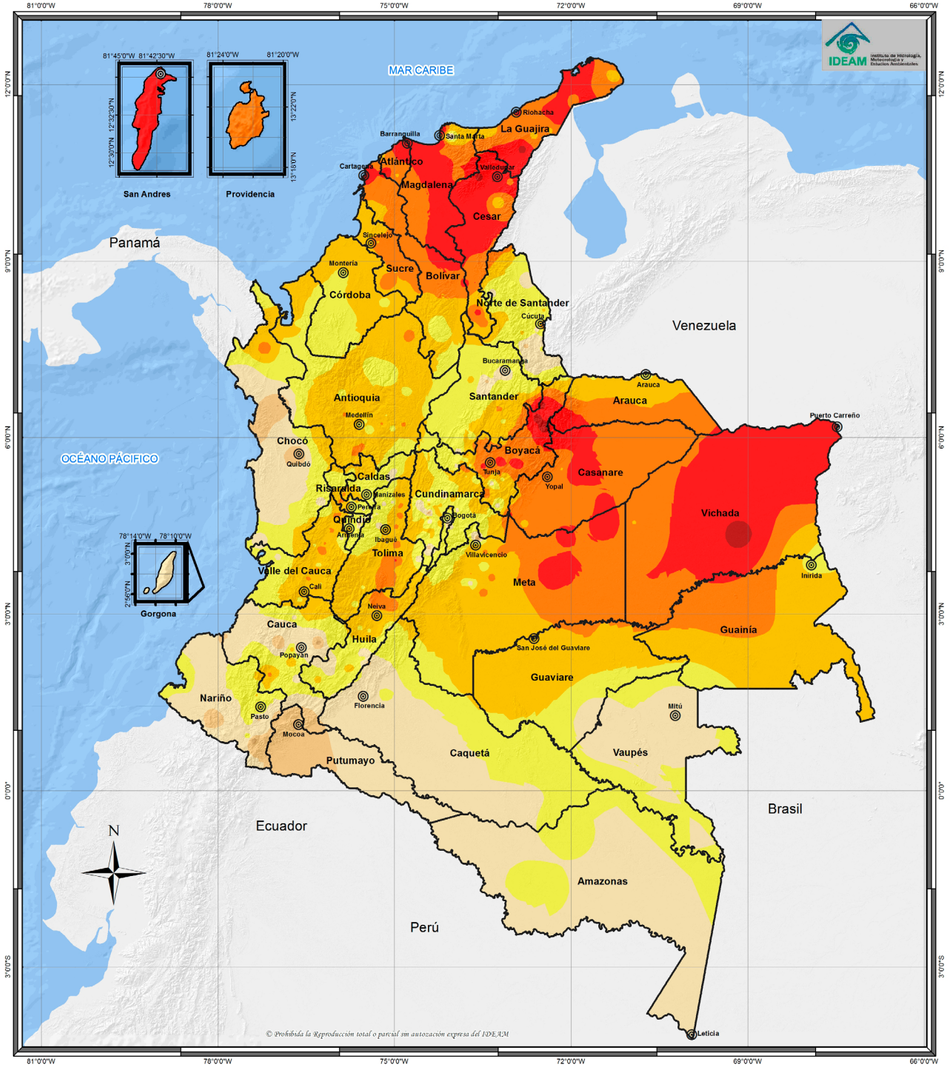
Para mejorar la interpretación de las tablas con los promedios horarios mensuales en cada ciudad, se generaron cinco rangos, cada uno de 200 Wh/m², con su respectivo color, en los que el verde son los promedios horarios más bajos de radiación y el amarillo y anaranjado, los más altos.

Mapa 1. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en enero (kWh/m² por día).



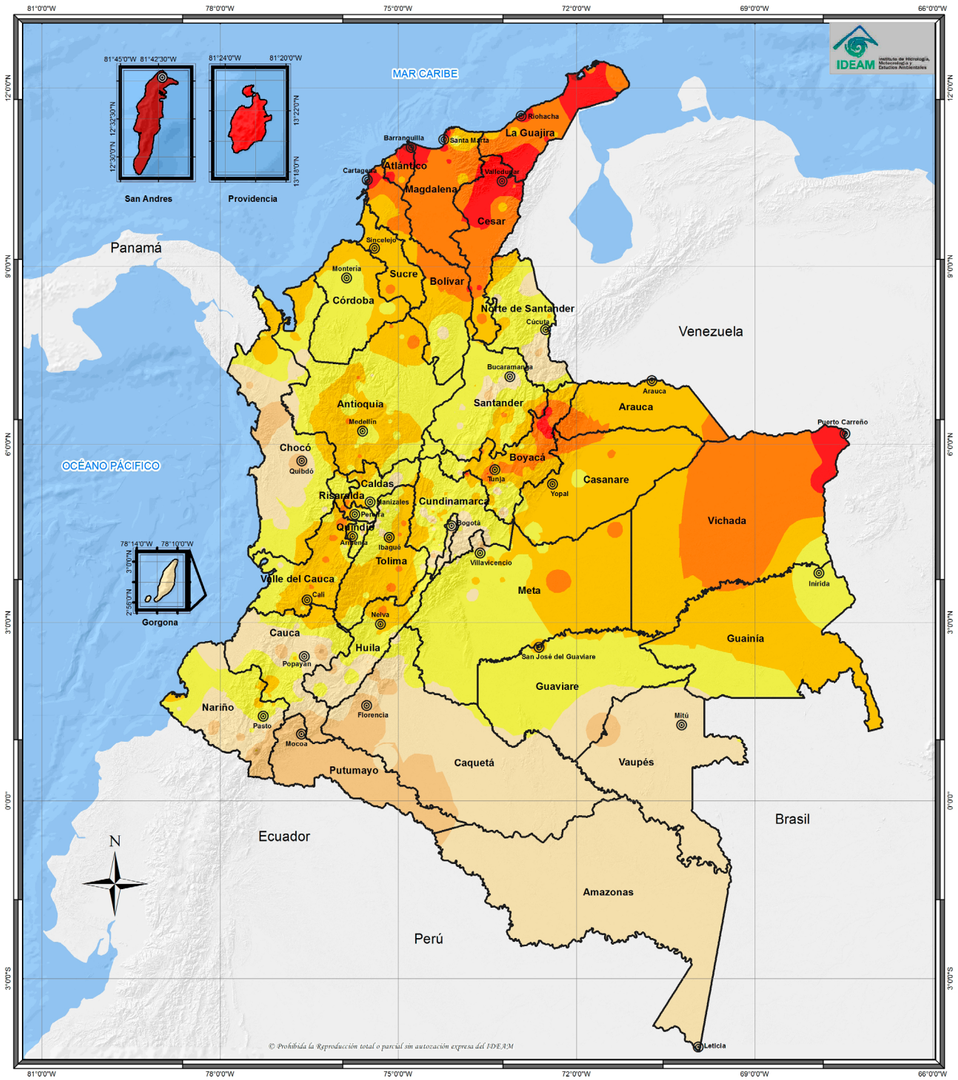


Mapa 2. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en febrero (kWh/m² por día).





Mapa 3. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en marzo (kWh/m² por día).



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL
MEDIO DIARIO MENSUAL
MARZO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda KWh/m²/dia

1,5 - 2,0
2,0 - 2,5
2,5 - 3,0
3,0 - 3,5
3,5 - 4,0
4,0 - 4,5
4,5 - 5,0
5,0 - 5,5
5,5 - 6,0
6,0 - 6,5
6,5 - 7,0

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

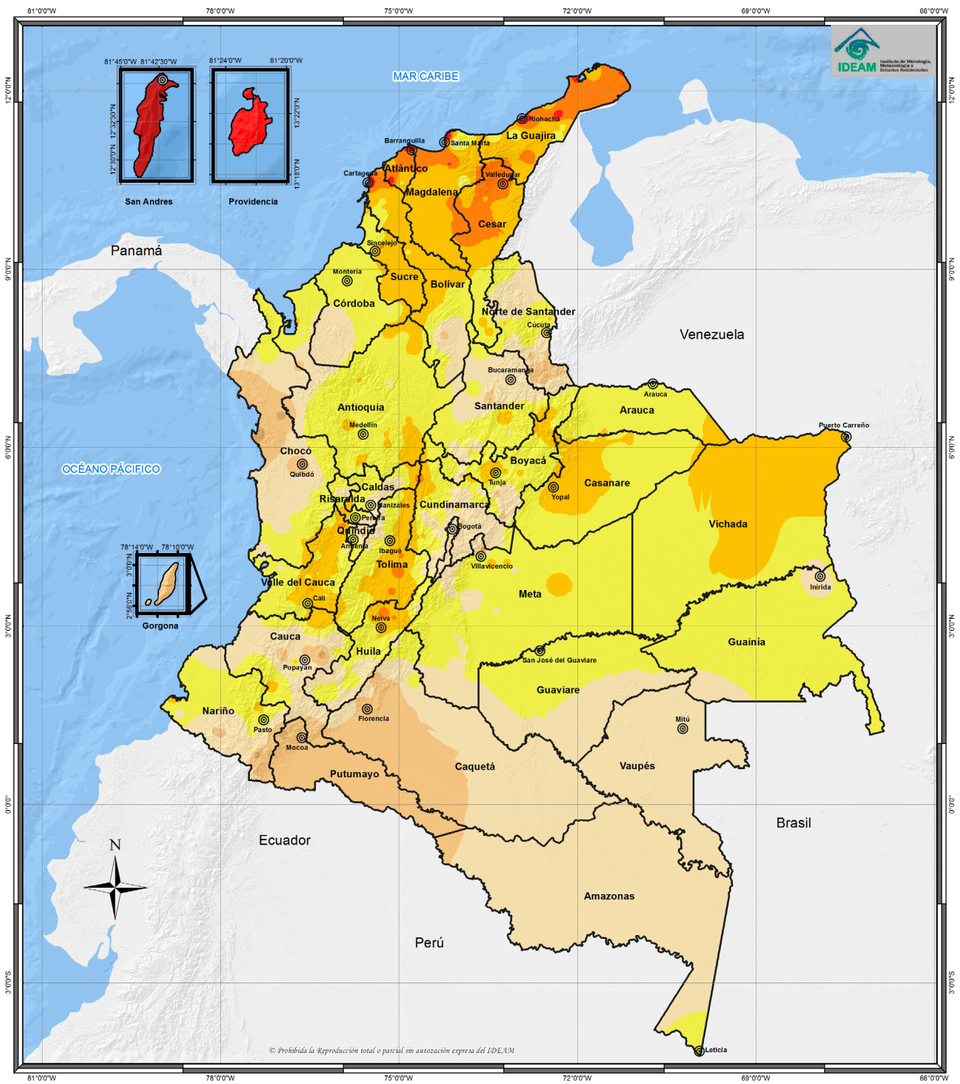
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 4. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en abril (kWh/m² por día).



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL
MEDIO DIARIO MENSUAL
ABRIL

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda KWh/m²/dia

1,5 - 2,0
2,0 - 2,5
2,5 - 3,0
3,0 - 3,5
3,5 - 4,0
4,0 - 4,5
4,5 - 5,0
5,0 - 5,5
5,5 - 6,0
6,0 - 6,5
6,5 - 7,0

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

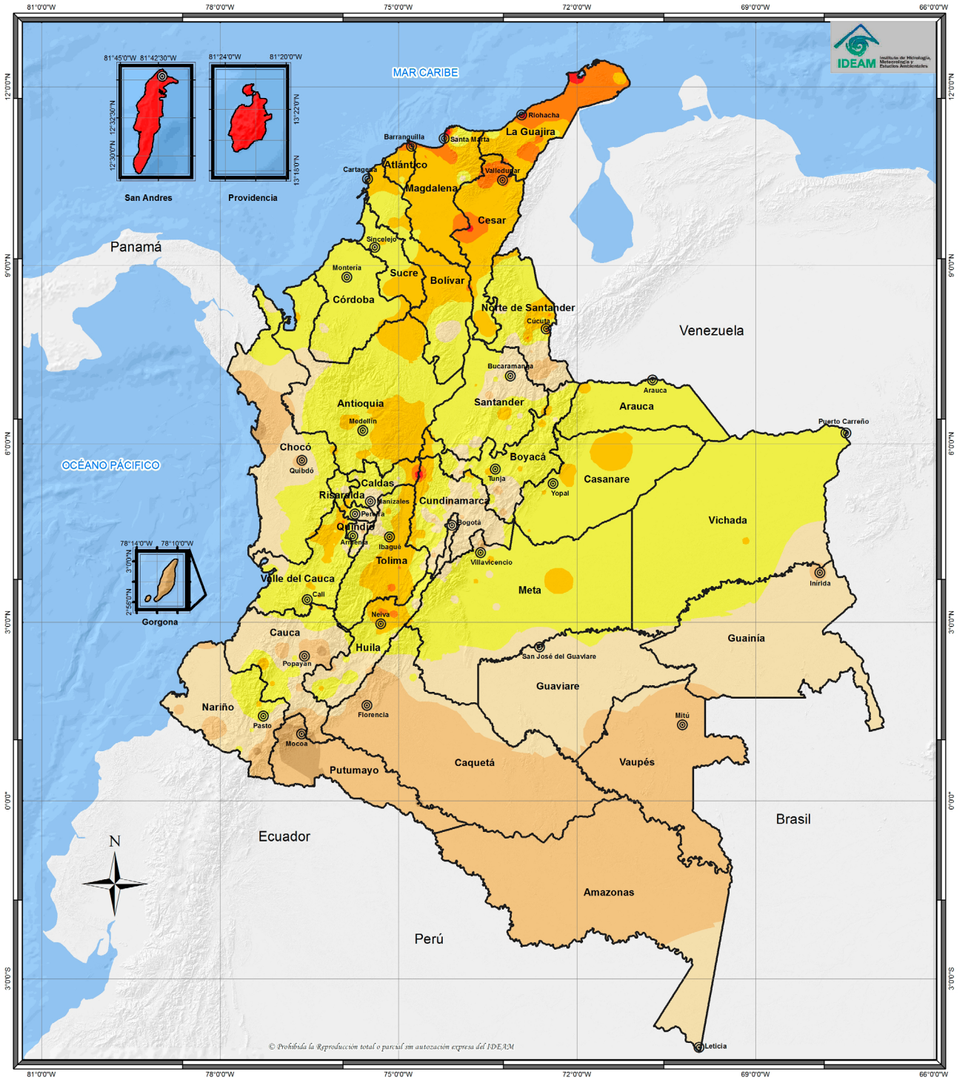
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 5. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en mayo (kWh/m² por día).



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL MEDIO DIARIO MENSUAL MAYO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda
KWh/m²/día
- 1,5 - 2,0
- 2,0 - 2,5
- 2,5 - 3,0
- 3,0 - 3,5
- 3,5 - 4,0
- 4,0 - 4,5
- 4,5 - 5,0
- 5,0 - 5,5
- 5,5 - 6,0
- 6,0 - 6,5
- 6,5 - 7,0

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

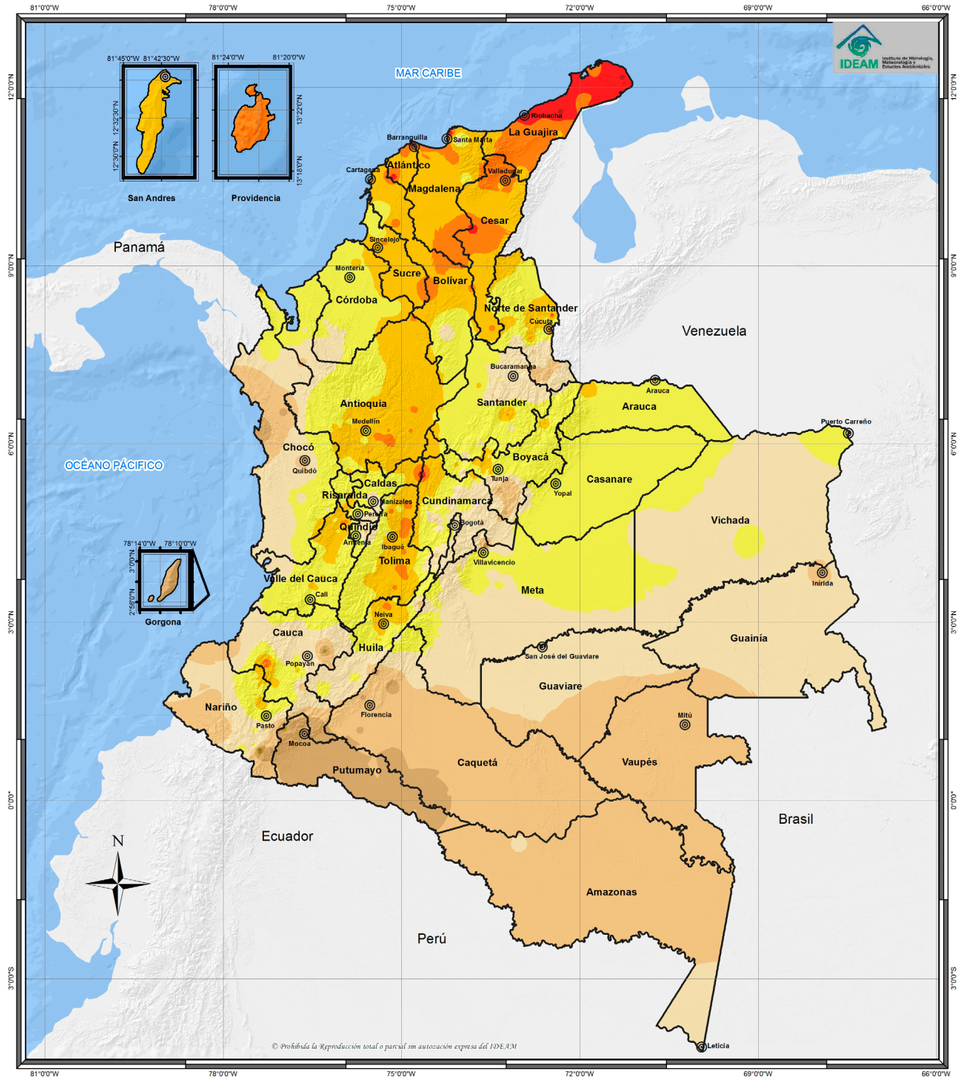
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 6. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día junio (kWh/m² por día).



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL MEDIO DIARIO MENSUAL JUNIO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda
KWh/m²/día
- 1,5 - 2,0
- 2,0 - 2,5
- 2,5 - 3,0
- 3,0 - 3,5
- 3,5 - 4,0
- 4,0 - 4,5
- 4,5 - 5,0
- 5,0 - 5,5
- 5,5 - 6,0
- 6,0 - 6,5
- 6,5 - 7,0

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

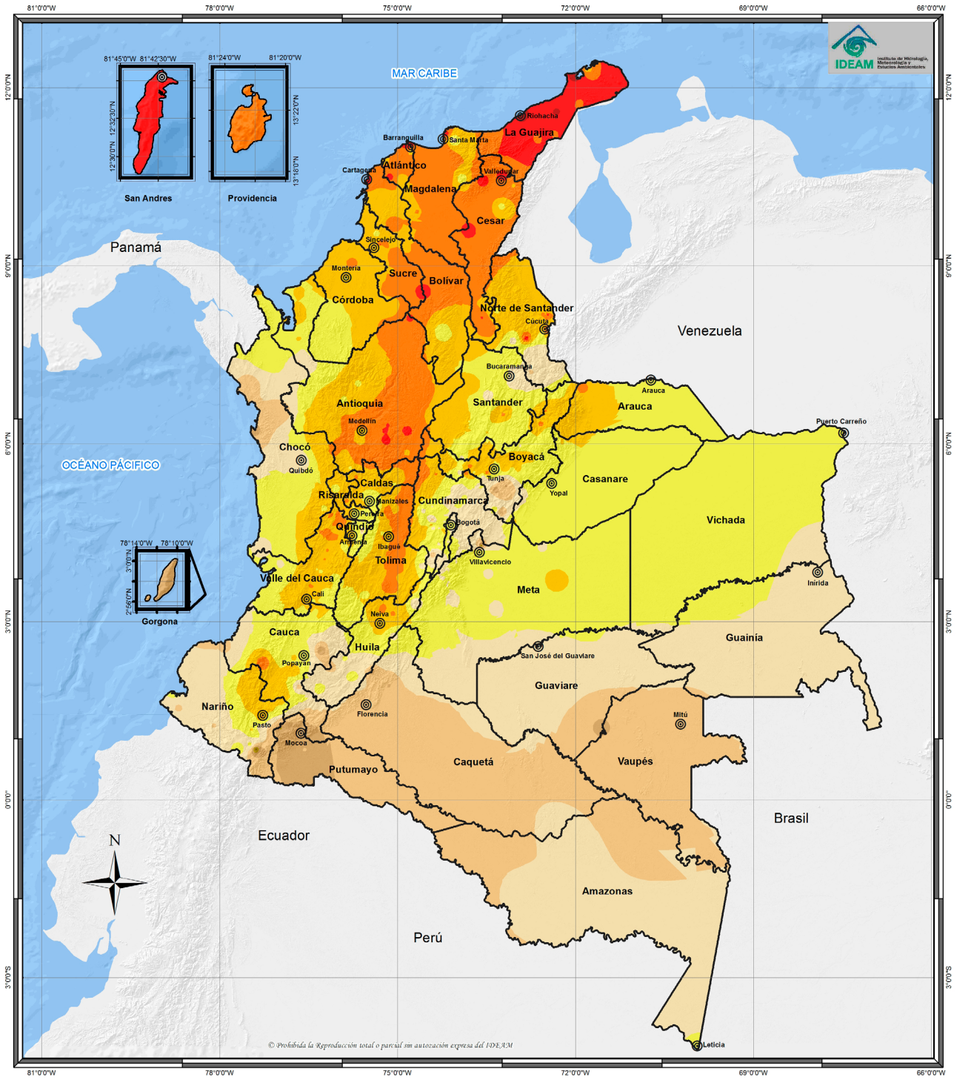
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

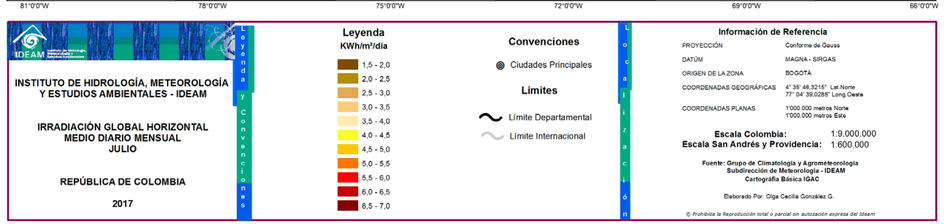
Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

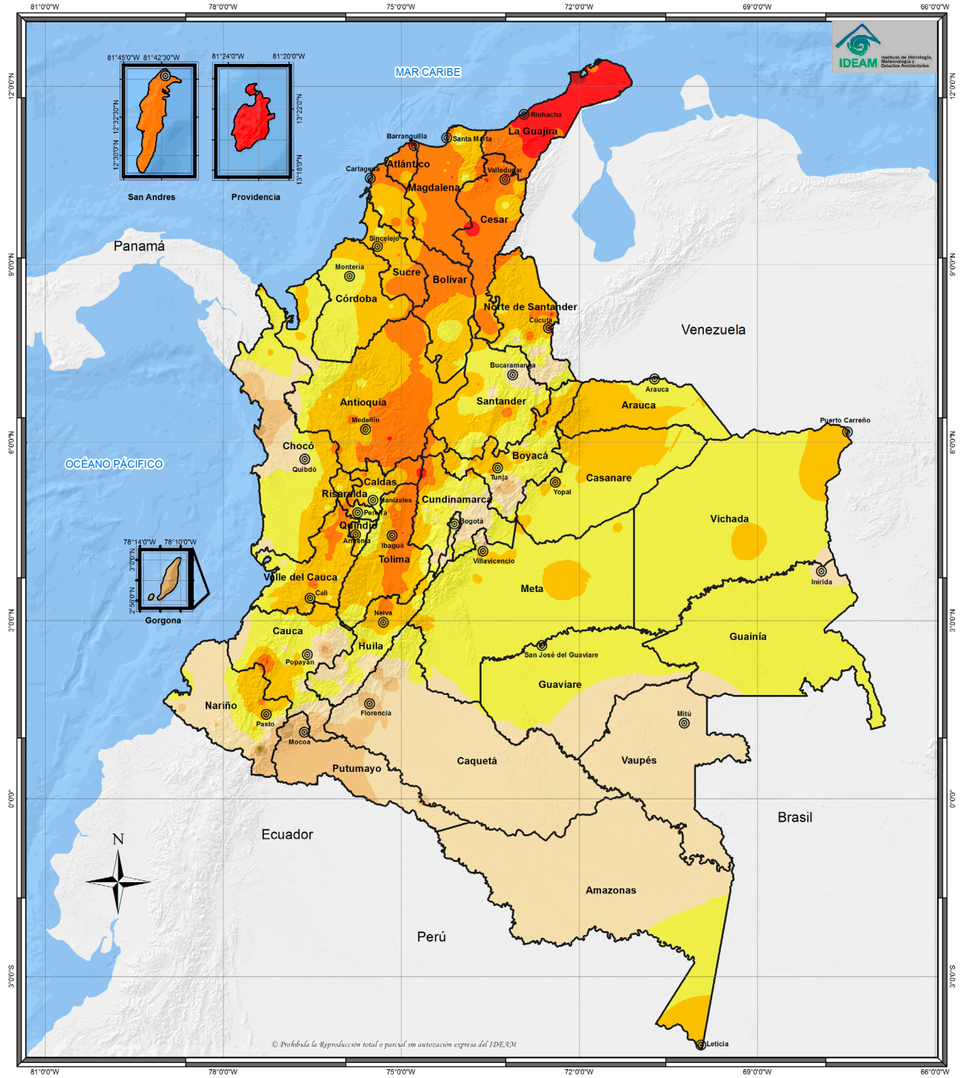
© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

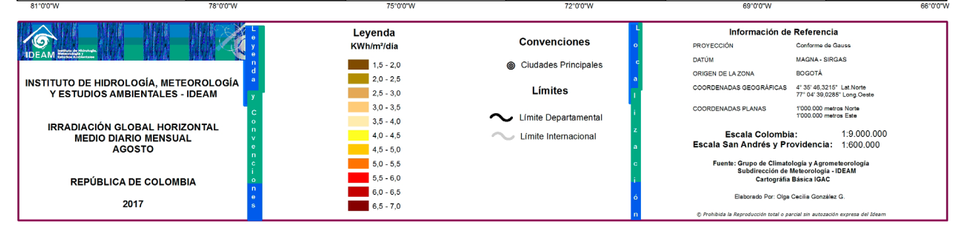
Mapa 7. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en julio (kWh/m² por día).



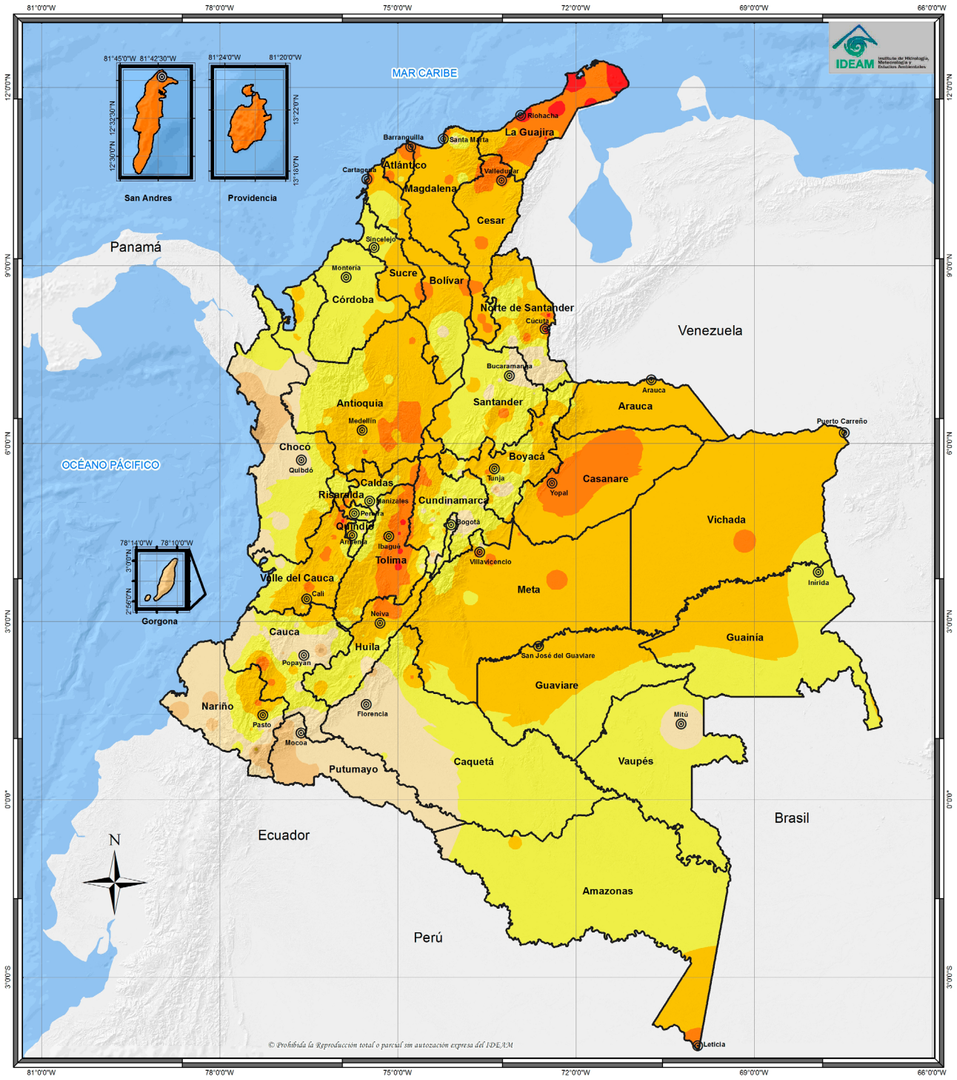


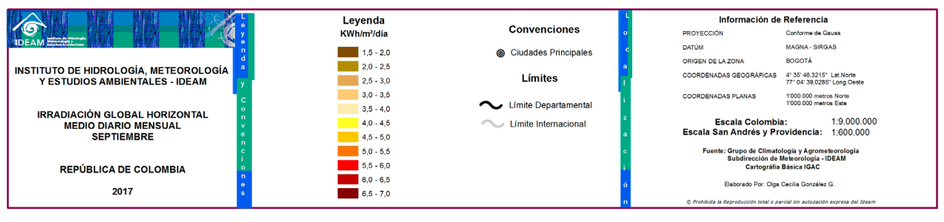
Mapa 8. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en agosto (kWh/m² por día).



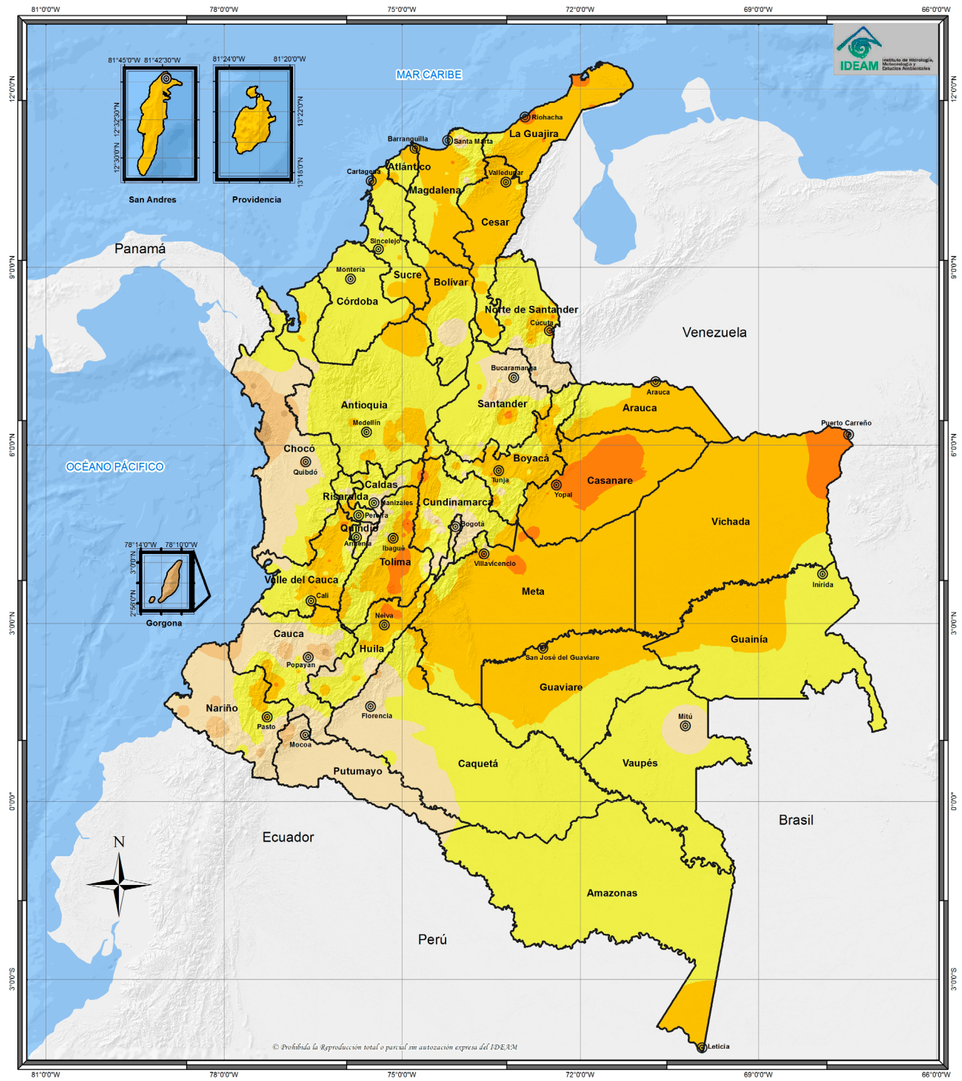


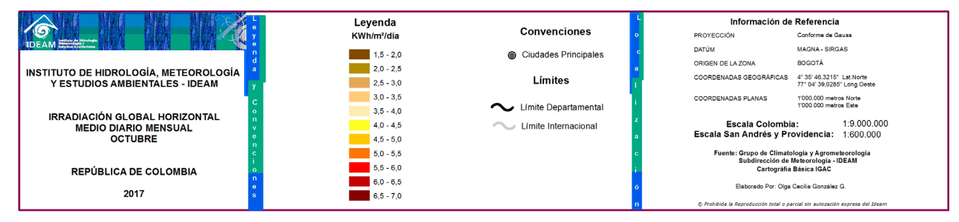
Mapa 9. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en septiembre (kWh/m² por día)



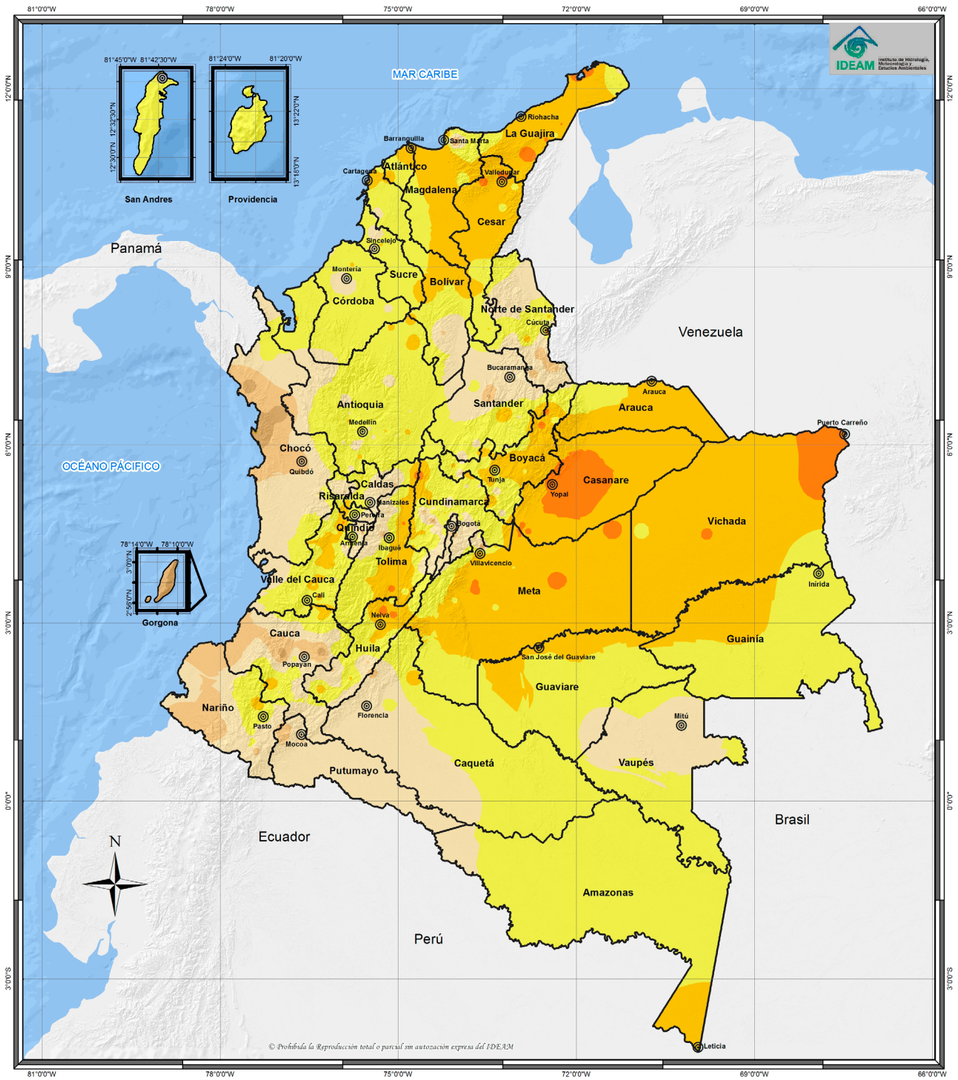


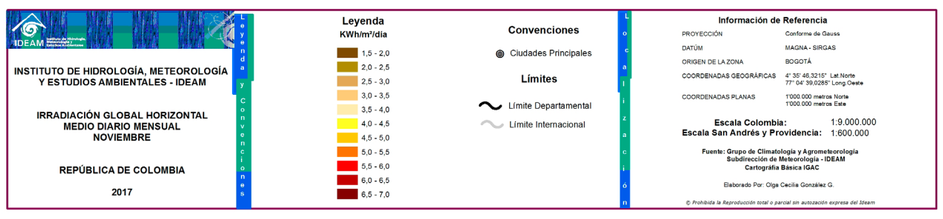
Mapa 10. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en octubre (kWh/m² por día).



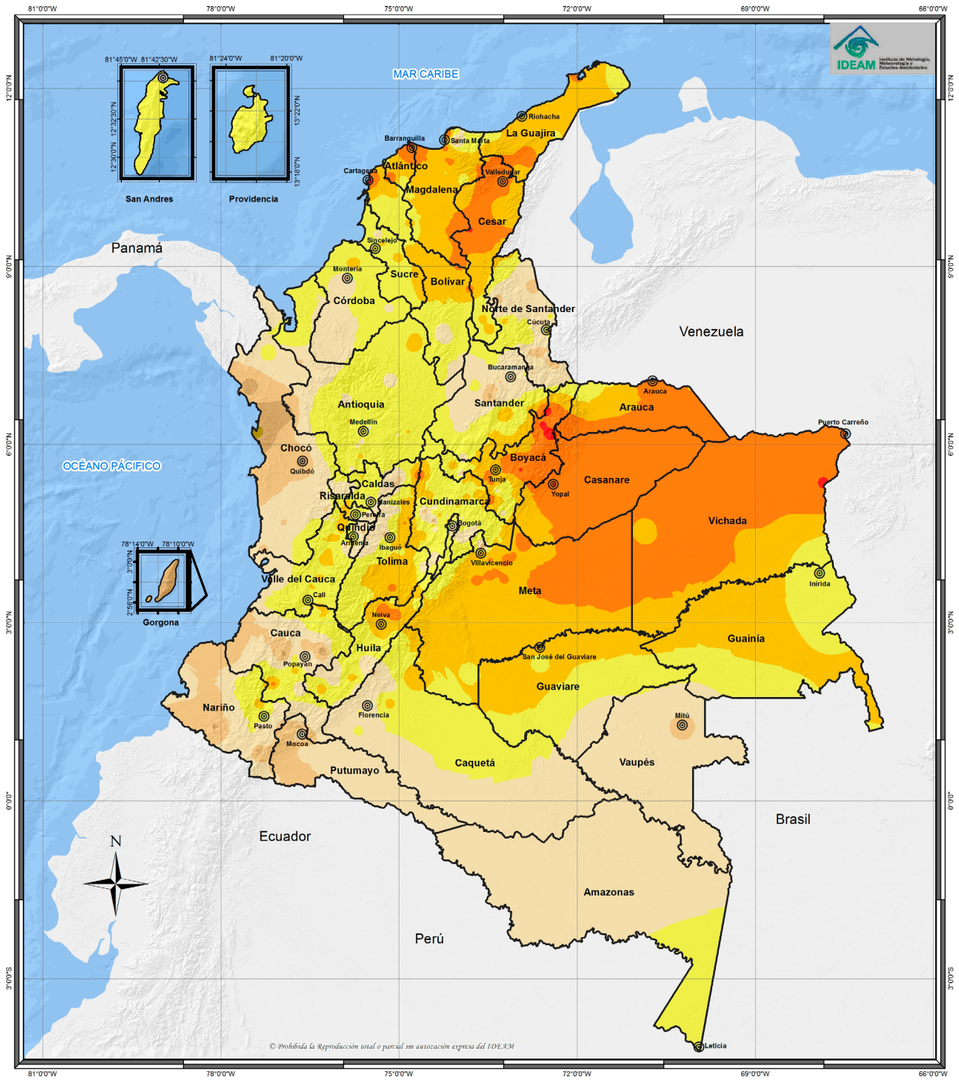


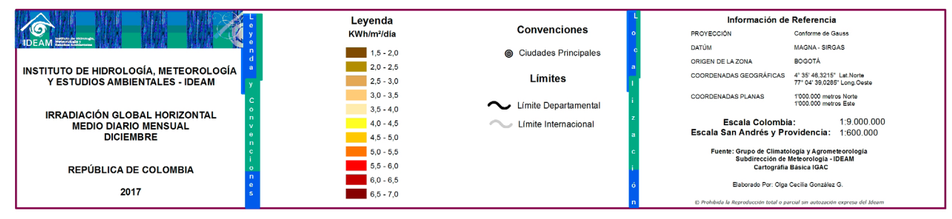
Mapa 11. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en noviembre (kWh/m² por día)



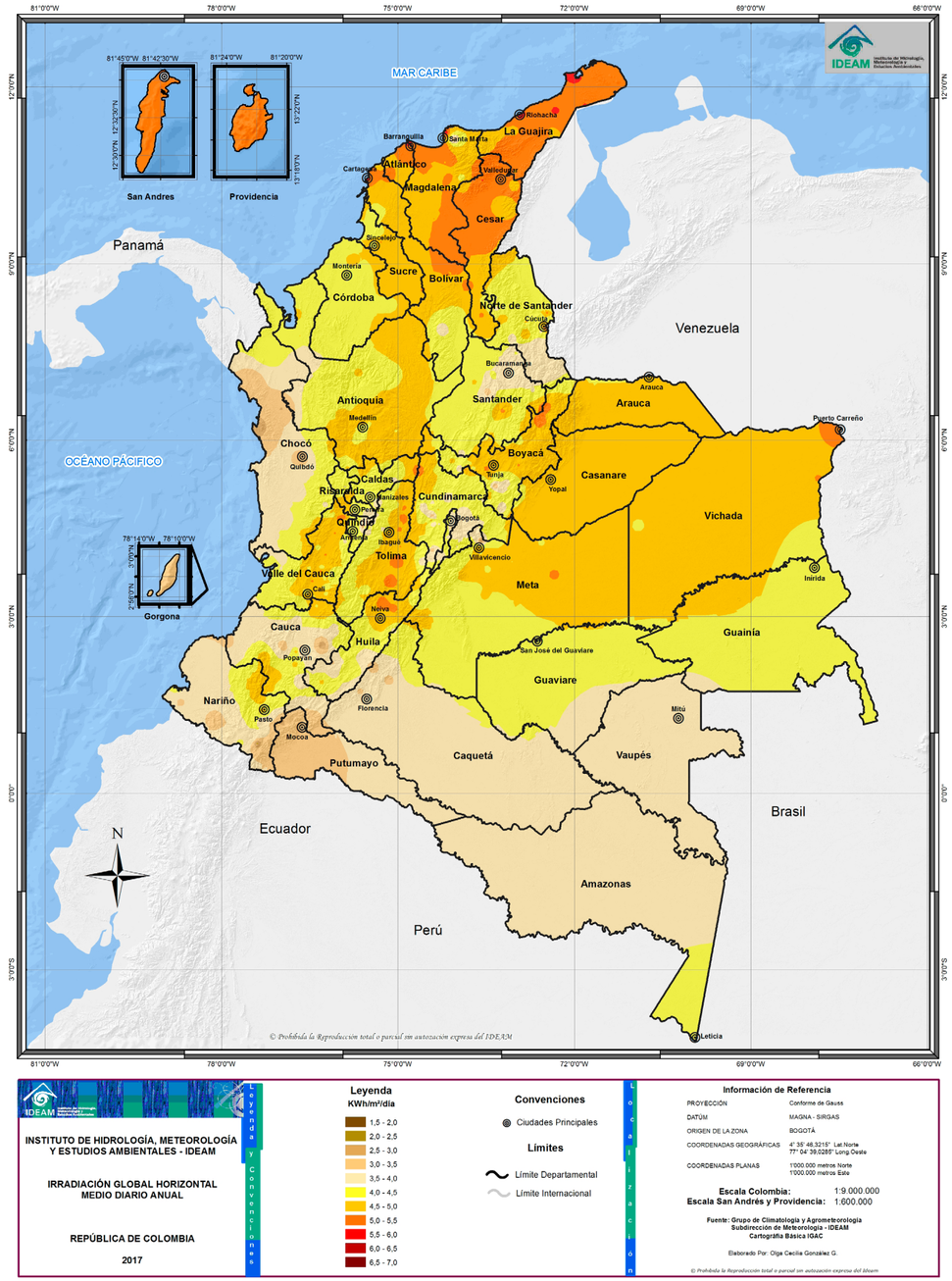


Mapa 12. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en diciembre (kWh/m² por día)





Mapa 13. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día, promedio anual multianual (kWh/m² por día).



4.3.4 Distribución espacial y temporal del brillo solar en Colombia

Otra forma de conocer la radiación del Sol es a través de la medición de las horas de Sol efectivo en el día (brillo solar o insolación), esta se asocia a la cantidad de tiempo durante el cual la superficie del suelo es irradiada por la radiación solar directa. Según la OMM, la duración de la insolación correspondiente a un periodo determinado se define como la suma de los subperiodos durante los cuales la irradiancia solar directa supera los 120 W/m².

a) Análisis promedio anual

El promedio de horas de Sol al día (hSd) en Colombia se muestra en los mapas 14 al 25 a nivel mensual y en el mapa 26 a nivel anual. El mapa 27 indica el promedio de número de días al mes sin brillo solar. Estos mapas fueron obtenidos con información de las 501 estaciones presentadas en el mapa (b) de la Figura 45. Se utilizó información para cada estación, desde su instalación hasta el 31 de diciembre de 2016 o hasta que dejó de funcionar si fue antes de esta fecha.

En la Figura 49 se presenta el mapa nacional con el promedio anual multianual de horas de Sol al día (hSd), junto con los histogramas de las principales ciudades del país, que presentan los promedios de los acumulados mensuales de horas de Sol. De acuerdo con este mapa, los mayores valores de brillo solar medio diario están en la región Caribe y la Orinoquía, destacándose lo siguiente:

- **La región Caribe** presenta amplios sectores en La Guajira y el norte del Cesar tienen promedios entre 7 y 9 horas de Sol al día (hSd); en gran parte del centro y el resto del norte de la región, valores entre 6 y 7 hSd, mientras que al sur de la región están entre 4 y 6 hSd. **En esta región se encuentra el municipio con mayor promedio de brillo solar en el país, el cual es Uribia en el departamento de la Guajira con 8,4 hSd.**
- **La Orinoquía** presenta dos pequeños sectores con promedios entre 6 y 7 hSd en Vichada y Arauca, mientras que gran parte de la región tiene valores entre 5 y 6 hSd.
- **La región Andina** tiene pequeños sectores con promedios entre 6 y 7 hSd en los santanderes, Tolima, Huila y Antioquia. También hay amplios sectores con promedios entre 5 y 6 hSd, localizados en los santanderes, Antioquia, Boyacá,

Huila y Tolima, así como en algunos sectores de Cundinamarca, Eje Cafetero, Cauca, Valle del Cauca y Nariño.

Por otro lado, los promedios más bajos en el país, entre 2 y 3 hSd, están en pequeños sectores de Chocó, Valle del Cauca, Cauca, Nariño y Putumayo. **Teniendo en cuenta la red del IDEAM, el municipio con menor promedio de brillo solar en el país es Totoró en el Cauca con 1,6 hSd.**

b) Análisis espacio-temporal a lo largo del año

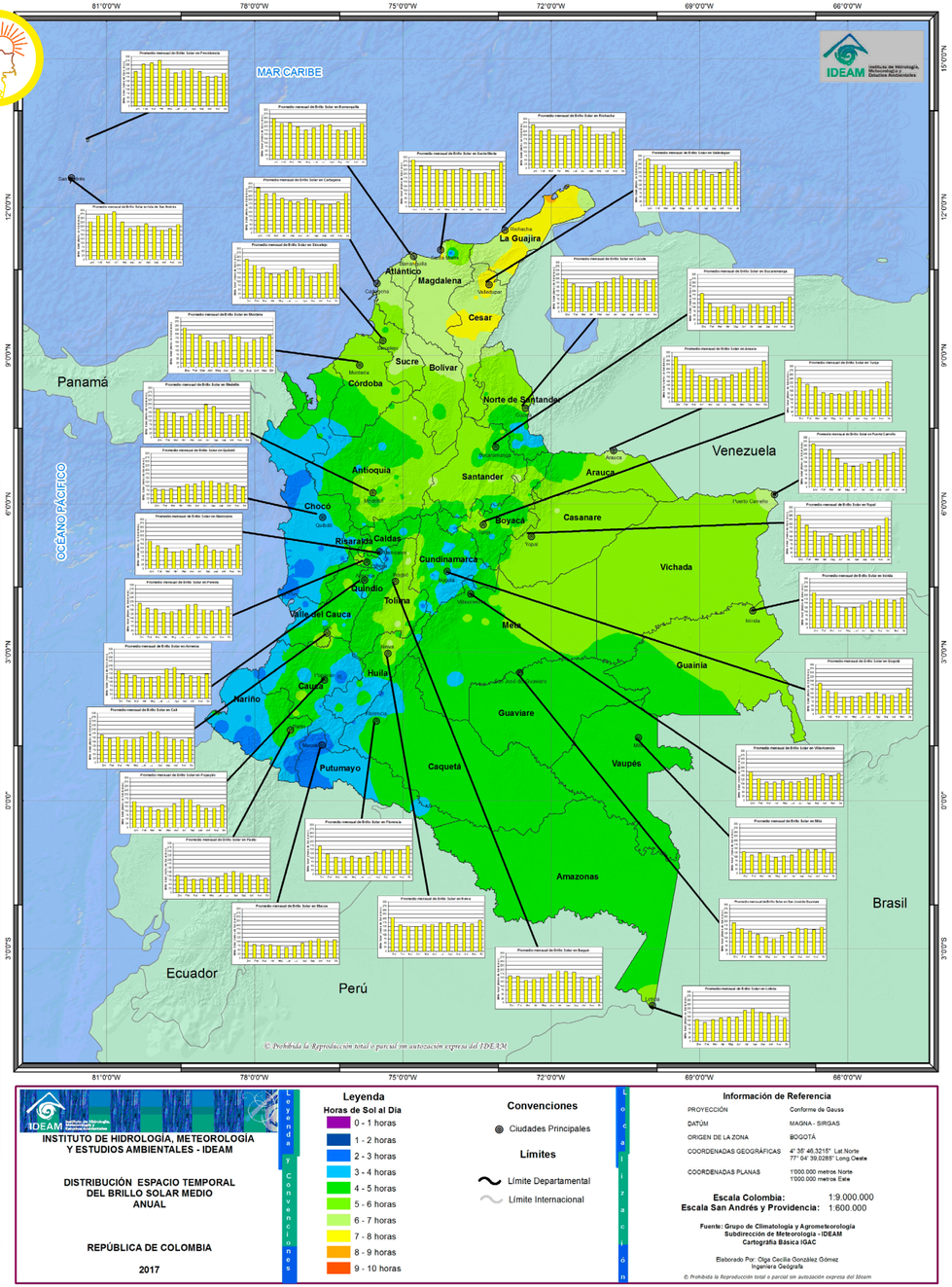
En los mapas del 14 al 25 se presenta la distribución espacial y temporal del brillo solar a lo largo del año. Teniendo en cuenta estos mapas y los histogramas de la Figura 49, se observa lo siguiente:

- **Región Caribe:** muestra un comportamiento bimodal, en el cual los mayores promedios se dan en enero, luego disminuyen hasta un mínimo en mayo, seguido por un incremento de los promedios hasta julio y agosto y una disminución hasta un segundo mínimo en octubre. En esta región los promedios mensuales son más altos a principios de año (enero) que a mediados (agosto) y son más

Figura 49. Promedio anual multianual de horas de Sol al día con histogramas de las principales ciudades del país.



Rivera del río Bogotá



Fuente: IDEAM.

bajos, en la mayoría de las estaciones, en el segundo mínimo (octubre) que en el primero (mayo). En las Islas de San Andrés y Providencia se presenta también un comportamiento bimodal, ya que el primer máximo se da en abril, seguido del primer mínimo en junio, con un segundo máximo en agosto y un segundo mínimo en octubre y noviembre.

- **Región Andina:** presenta un comportamiento bimodal, los mayores promedios se dan en enero y febrero, seguidos de una disminución hasta un mínimo en abril y mayo y de un incremento hasta julio y agosto. Posteriormente, se registra una disminución hasta un segundo mínimo en octubre y noviembre, finalizando con un incremento para llegar nuevamente a los máximos de enero. En esta región, en la mayoría de las estaciones los promedios son más altos a principios del año (enero) que a mediados (agosto) y son más bajos en el primer mínimo (abril-mayo) que en el segundo (octubre). En algunas estaciones del sur de la región, se presenta un comportamiento monomodal, con los valores más bajos a principios y finales del año y valores altos en el resto de año.
- **Región Pacífica:** gran parte de esta región tiene comportamiento monomodal con valores más altos a mediados del año y más bajos a principios y finales del año.
- **Amazonía:** el suroriente de la región presenta comportamiento monomodal, con valores altos a mediados del año y bajos a principios y finales. En el resto de la región se observa un comportamiento opuesto al descrito.
- **Orinoquía:** gran parte de la región presenta un comportamiento monomodal con valores altos a principios y finales del año y bajos a mediados del año.

El Anexo 5 muestra la tabla con los promedios mensuales de brillo solar en las principales ciudades del país. Las unidades son horas de Sol al día (hSd). En la última columna se presenta el periodo de información analizado y la cantidad aproximada de años completos con información para cada estación. Se puede apreciar que 27 de las 33 estaciones relacionadas cuentan con más de 30 años de información.

4.3.5 Comportamiento promedio del número de días al mes sin brillo solar

Para optimizar el aprovechamiento confiable de la energía solar en las diferentes clases de aplicaciones energéticas (calentadores, paneles solares, entre otras), los diseños deben involucrar respaldos económicamente viables, bien sea almacenando la energía mediante baterías o utilizando plantas auxiliares (gasolina, diésel, etc.) para poder suplir los requerimientos en épocas críticas, como en el invierno, en las cuales disminuye notoriamente la intensidad de la radiación solar debido a las condiciones del cielo completamente nublado. Esta situación hace necesario establecer el número de días al mes sin brillo solar, el cual es muy importante por cuanto facilita atender las necesidades de los usuarios por medio de diseños adecuados, mediante proyectos que involucren el confort necesario ante situaciones de épocas con baja o nula disponibilidad de radiación solar. En este caso se contabilizan y promedian los días del mes en los cuales las horas de brillo solar estuvieron en el rango entre 0,0 y 0,5 hSd.

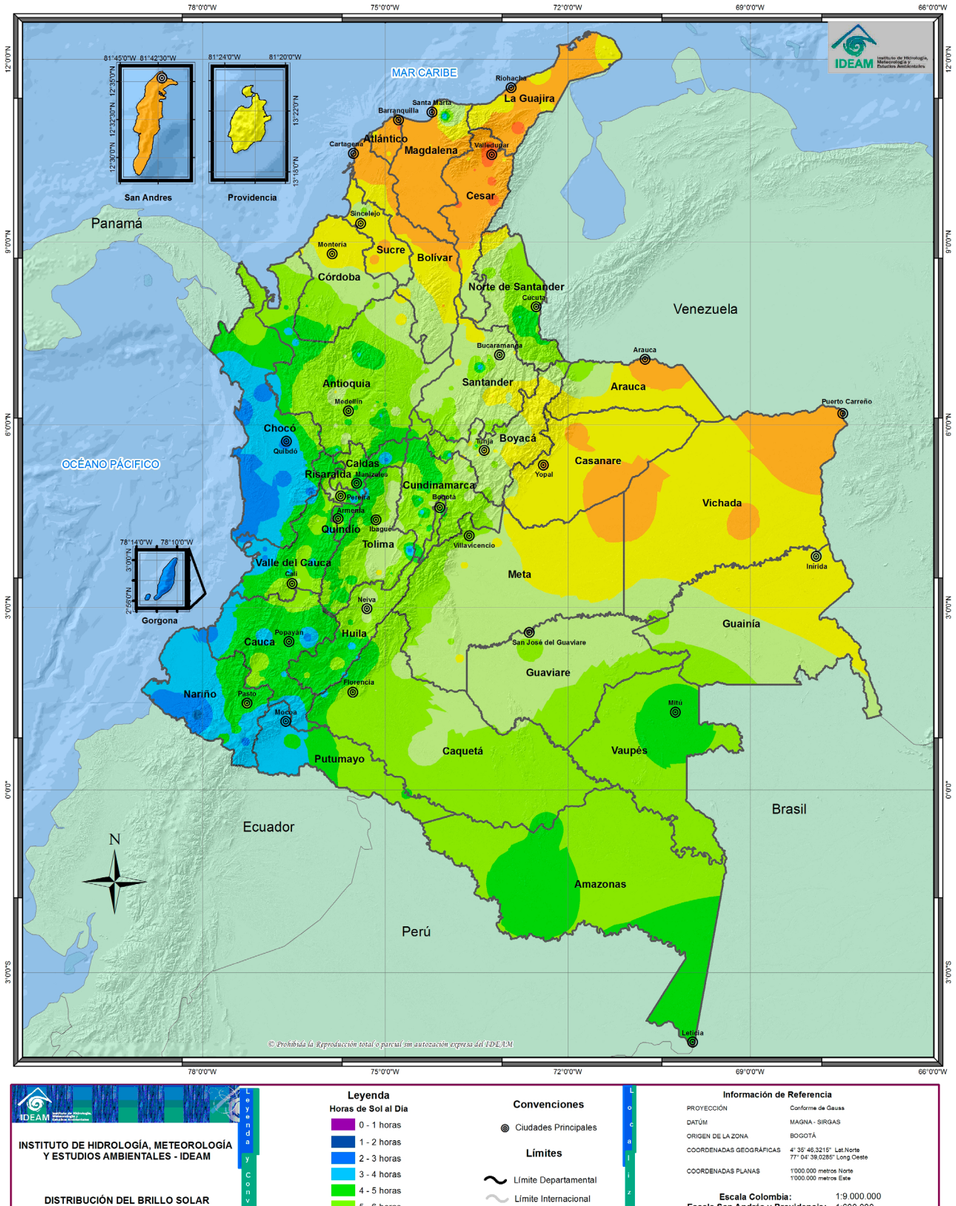
El mapa 27 presenta el promedio anual multianual del número de días al mes sin brillo solar, obtenido con información de las 501 estaciones con las que se realizaron los mapas de brillo solar. En este mapa se destaca lo siguiente:

- Los promedios más bajos (inferiores a 2) se registran en la región Caribe, norte de la región Andina, amplios sectores de los valles interandinos, el oriente, centro y sectores del occidente de la Orinoquia, el nororiente de la Amazonía y en el norte de Nariño, sur del Cauca, Amazonas y Caquetá.
- Los promedios más altos se observan en amplios sectores de la región Pacífica, sur de la región Andina y el occidente de la Amazonía.

El municipio con el menor promedio de número total de días al mes sin brillo solar es Maicao en La Guajira con 0,25 días, mientras que el municipio con el mayor promedio es Totoró en el Cauca con 10,97 días.

El anexo 6 presenta la tabla de los promedios mensuales del número total de días sin brillo solar en las principales ciudades del país.

Mapa 14. Promedio de horas de Sol al día en enero



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR MEDIO DIARIO ENERO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

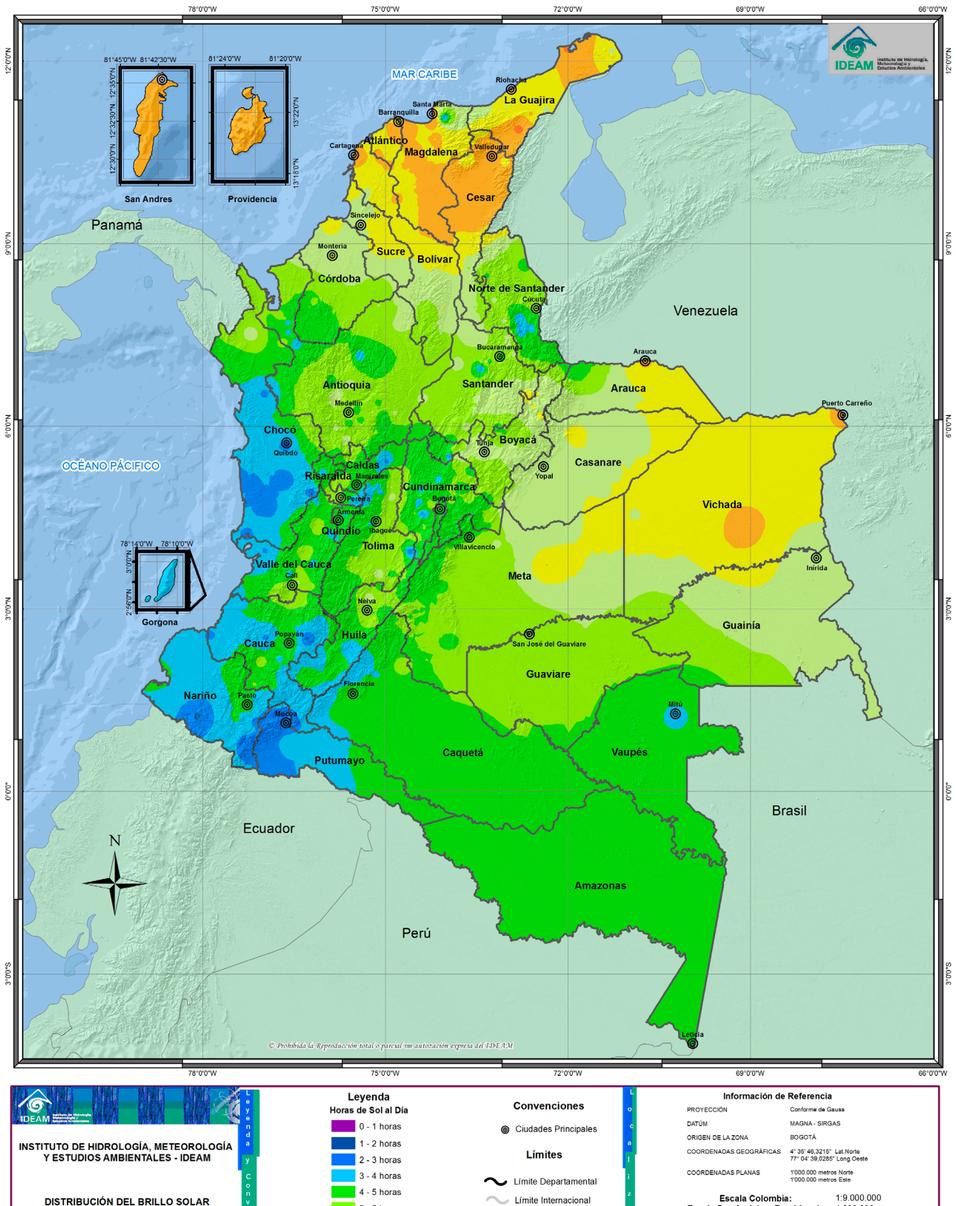
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 15. Promedio de horas de Sol al día en febrero



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR MEDIO DIARIO FEBRERO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

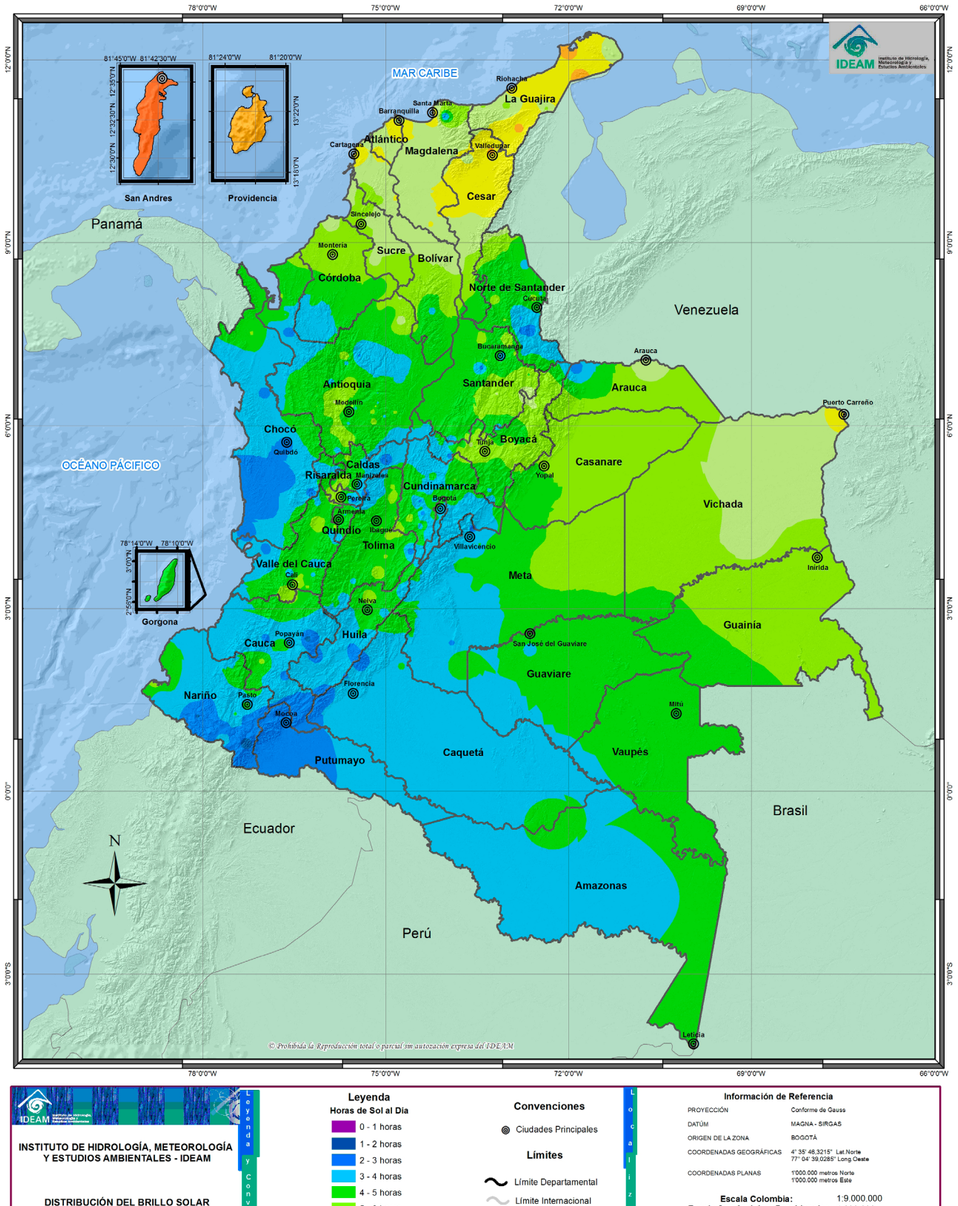
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 16. Promedio de horas de Sol al día en marzo



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR MEDIO DIARIO MARZO

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

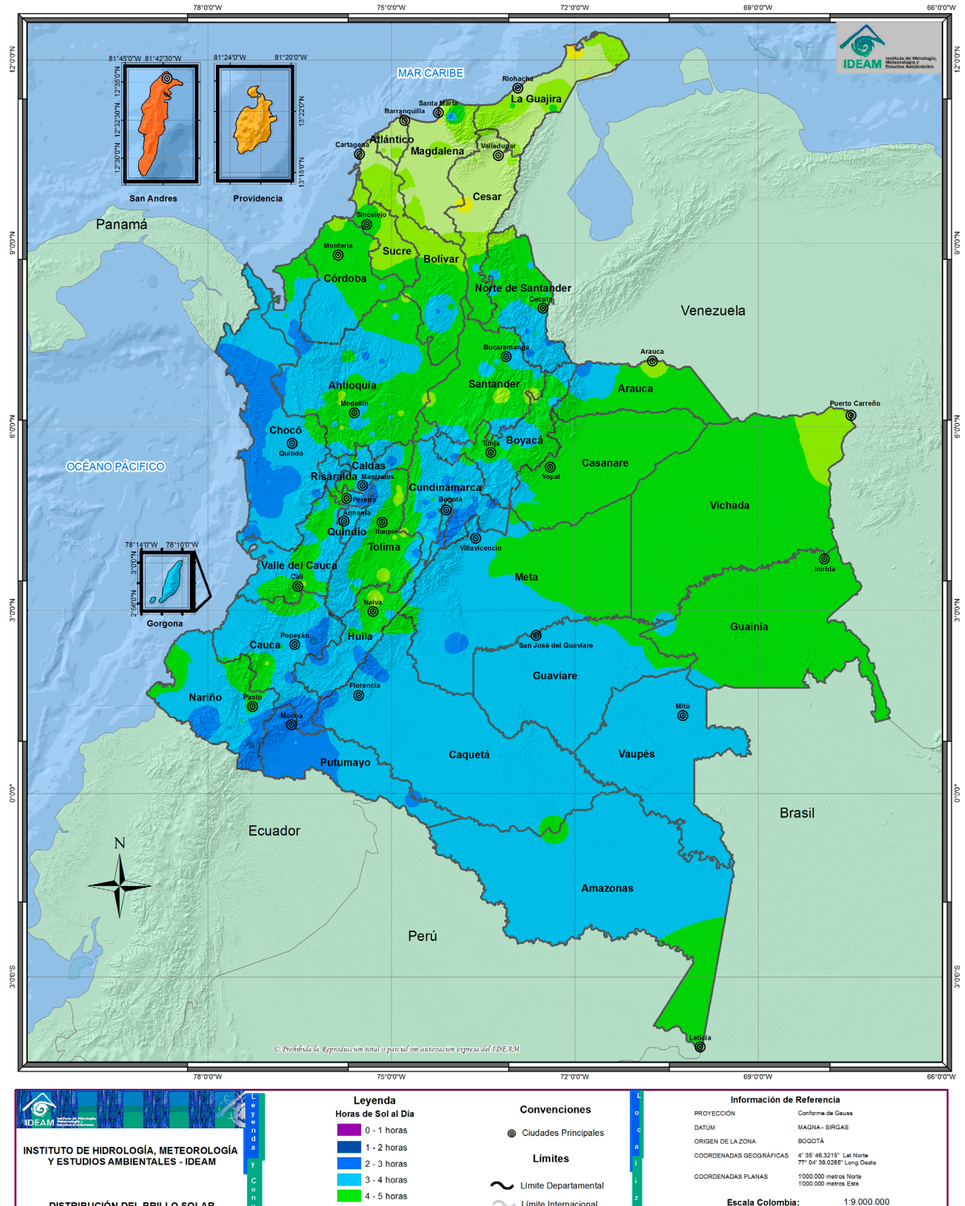
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 17. Promedio de horas de Sol al día en abril



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR MEDIO DIARIO ABRIL

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2017

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

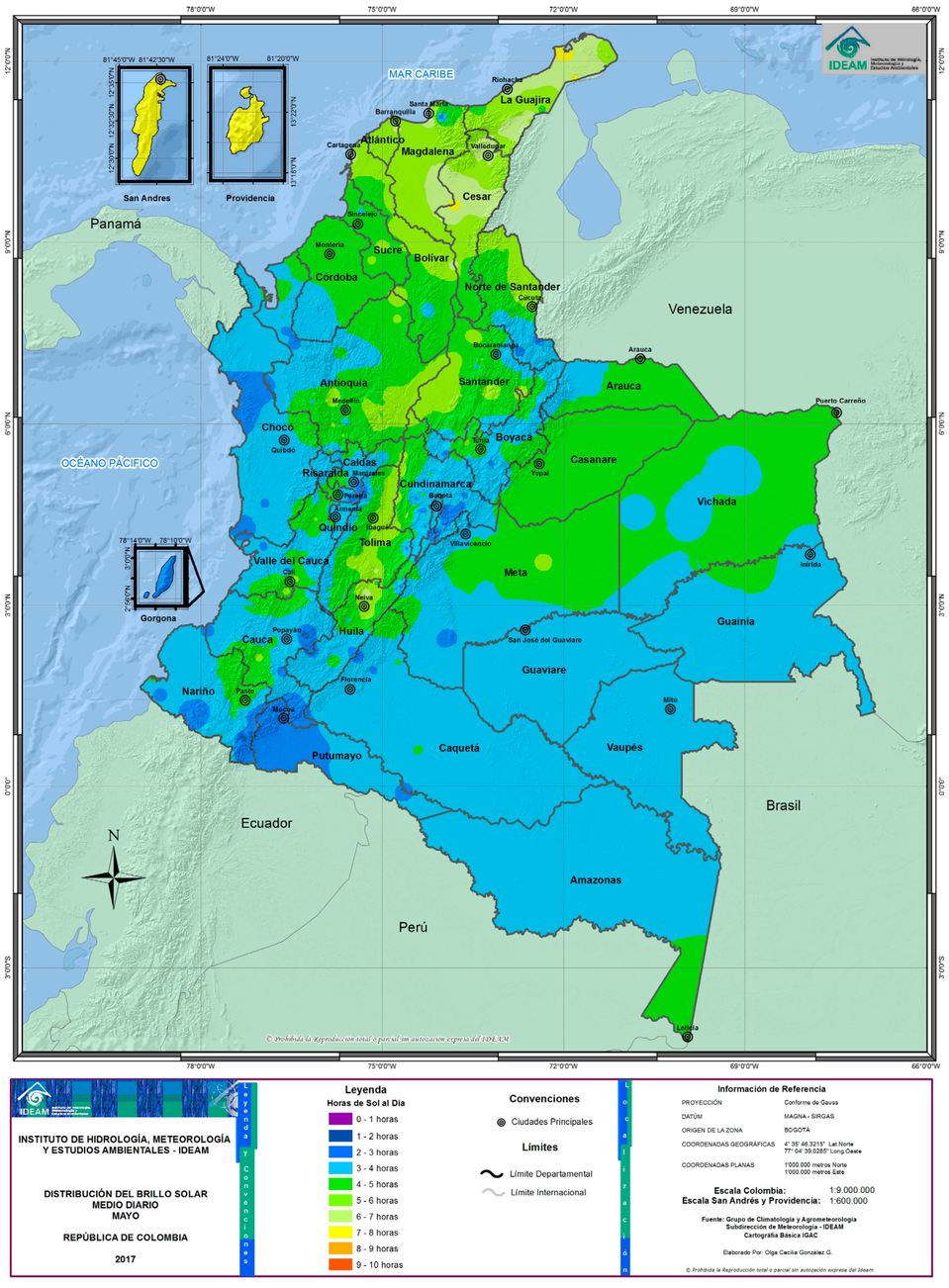
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

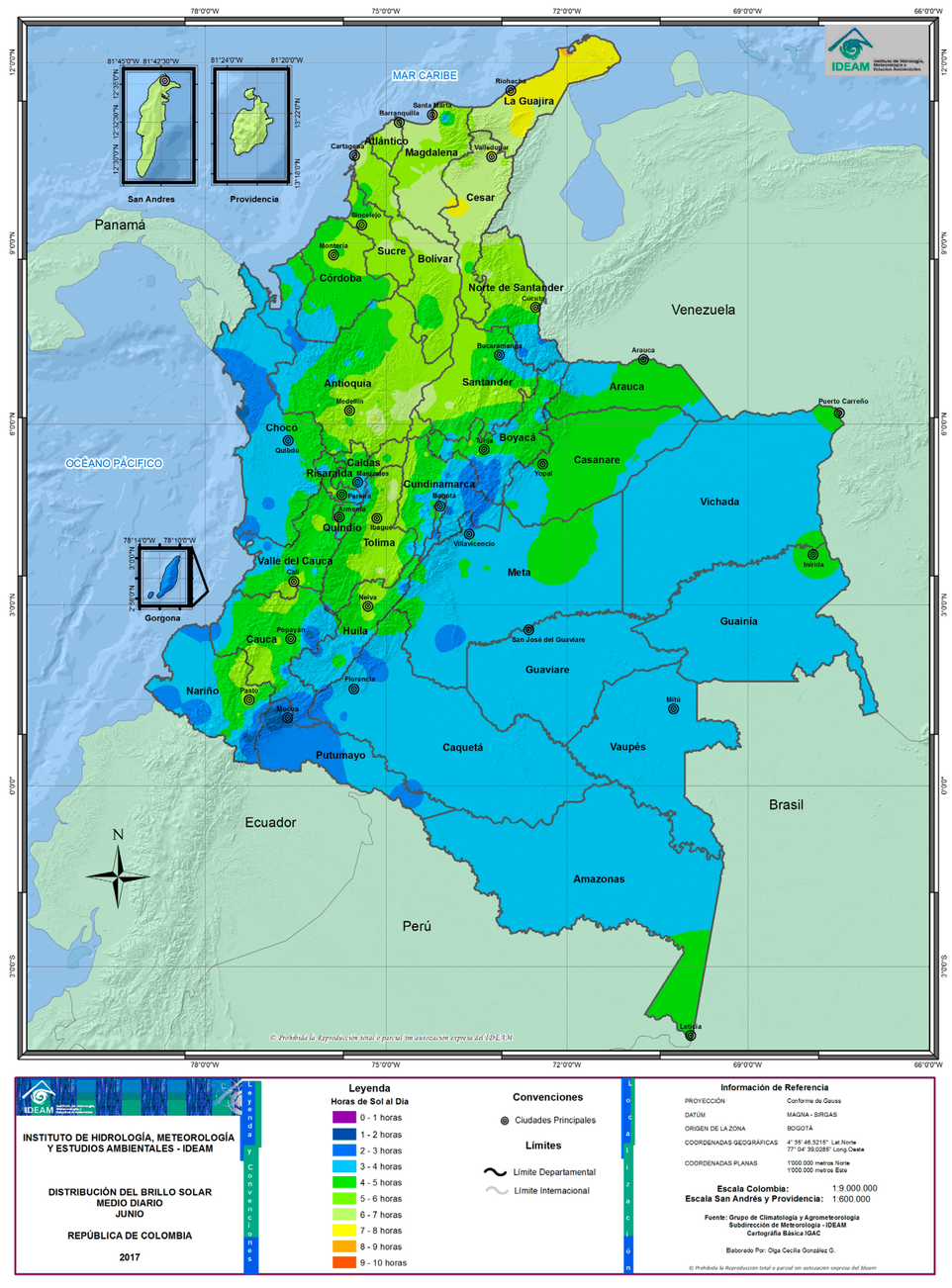
Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

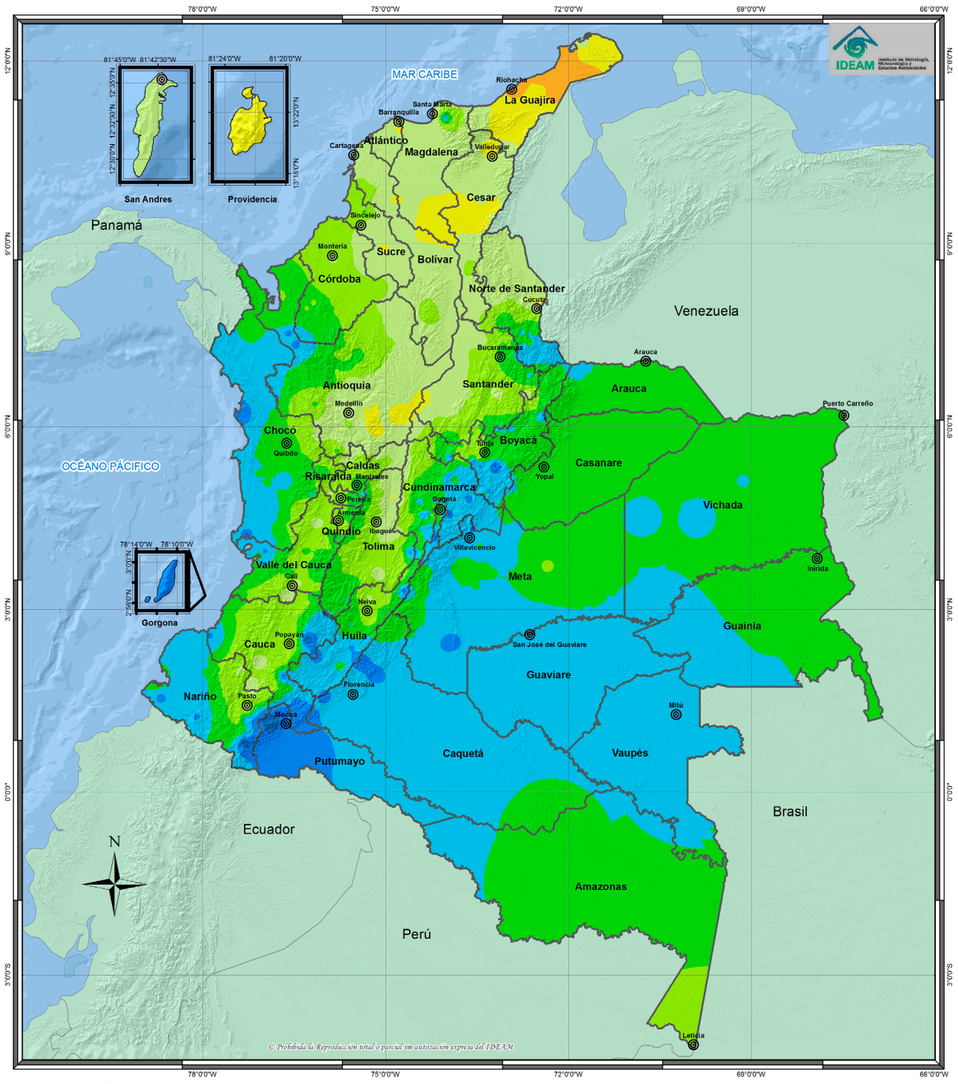
Mapa 18. Promedio de horas de Sol al día en mayo



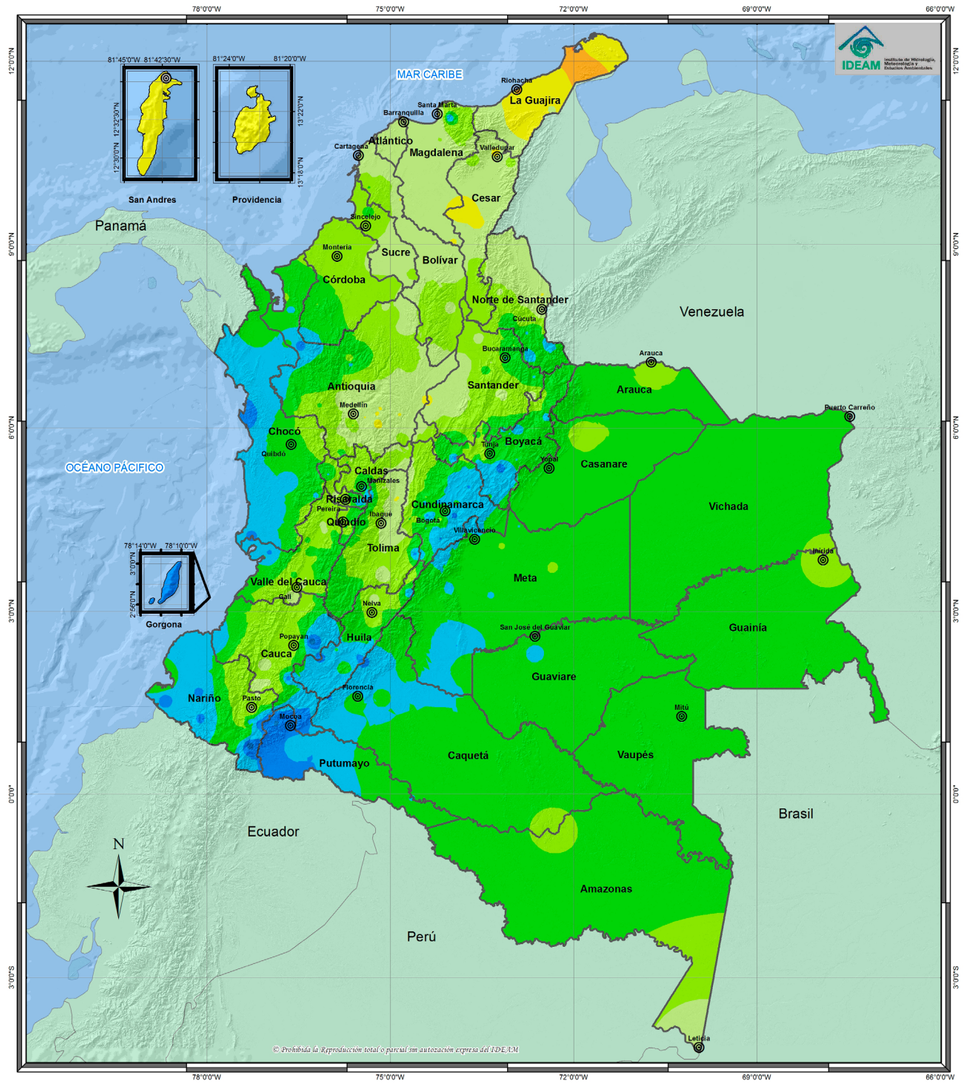
Mapa 19. Promedio de horas de Sol al día en junio



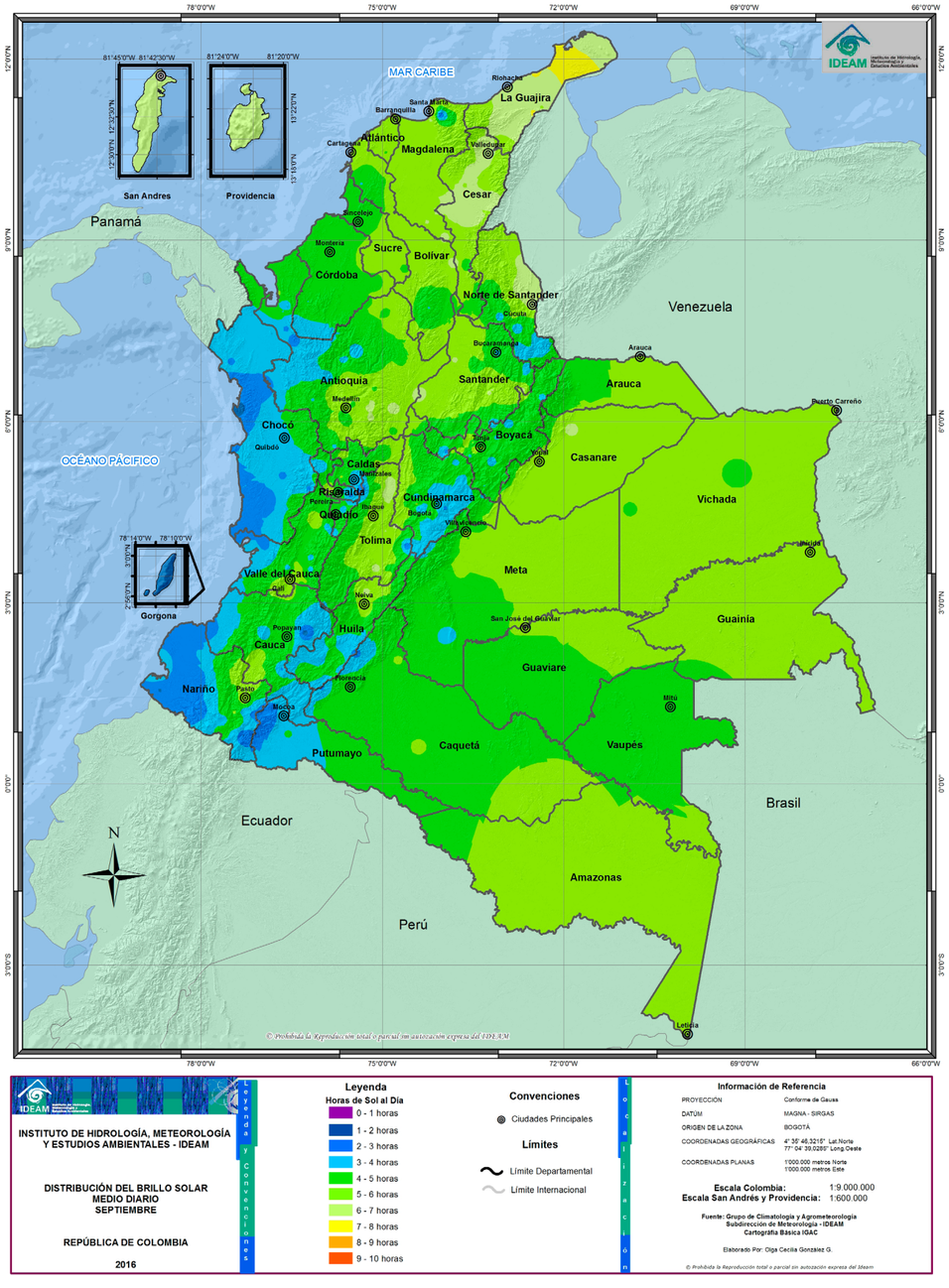
Mapa 20. Promedio de horas de Sol al día en julio



Mapa 21. Promedio de horas de Sol al día en agosto



Mapa 22. Promedio de horas de Sol al día en septiembre



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR
MEDIO DIARIO
SEPTIEMBRE

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2016

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

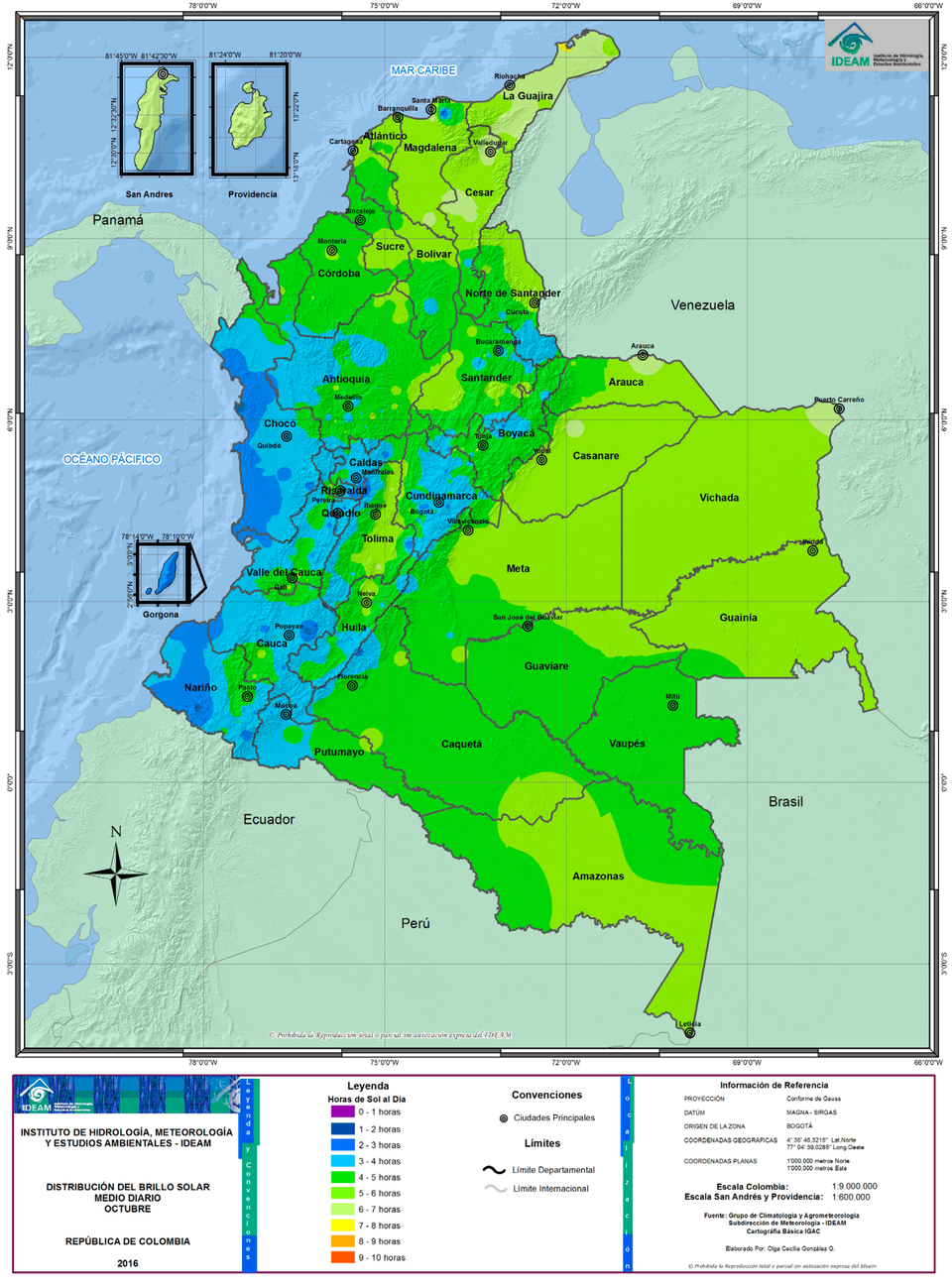
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 23. Promedio de horas de Sol al día en octubre



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR
MEDIO DIARIO
OCTUBRE

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2016

Leyenda
Horas de Sol al Día
- 0 - 1 horas
- 1 - 2 horas
- 2 - 3 horas
- 3 - 4 horas
- 4 - 5 horas
- 5 - 6 horas
- 6 - 7 horas
- 7 - 8 horas
- 8 - 9 horas
- 9 - 10 horas

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

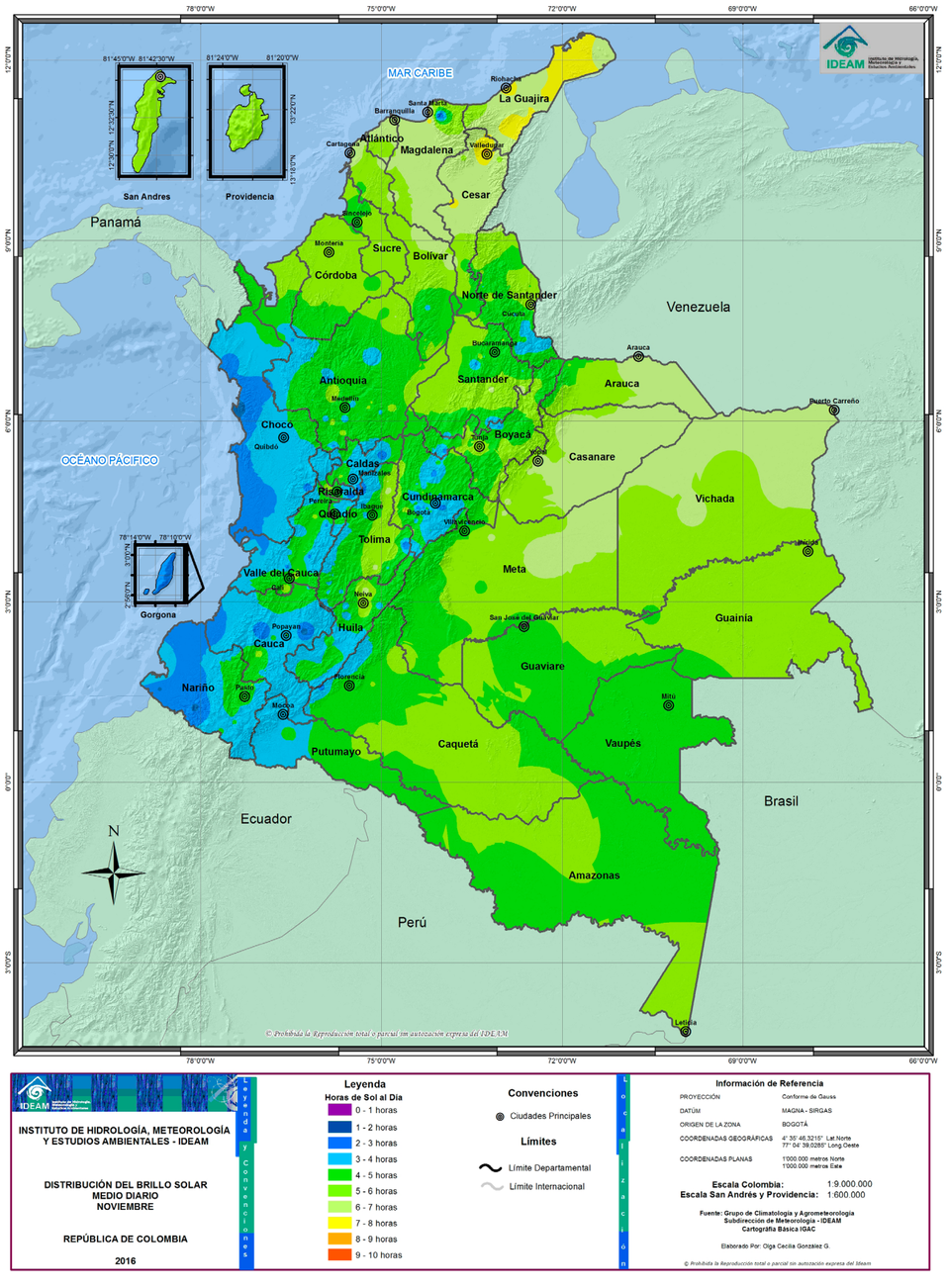
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

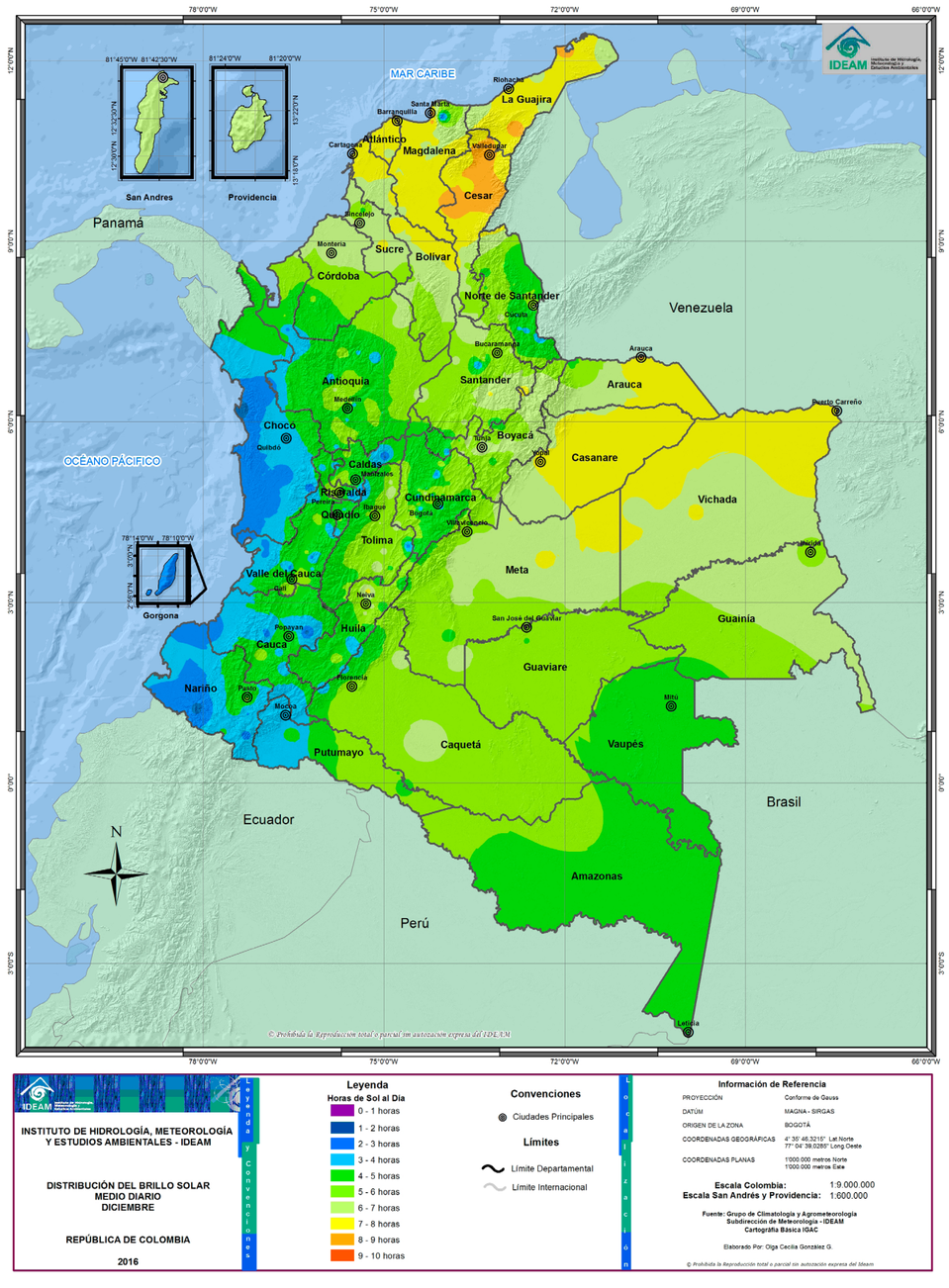
Elaborado Por: Olga Cecilia González G.

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

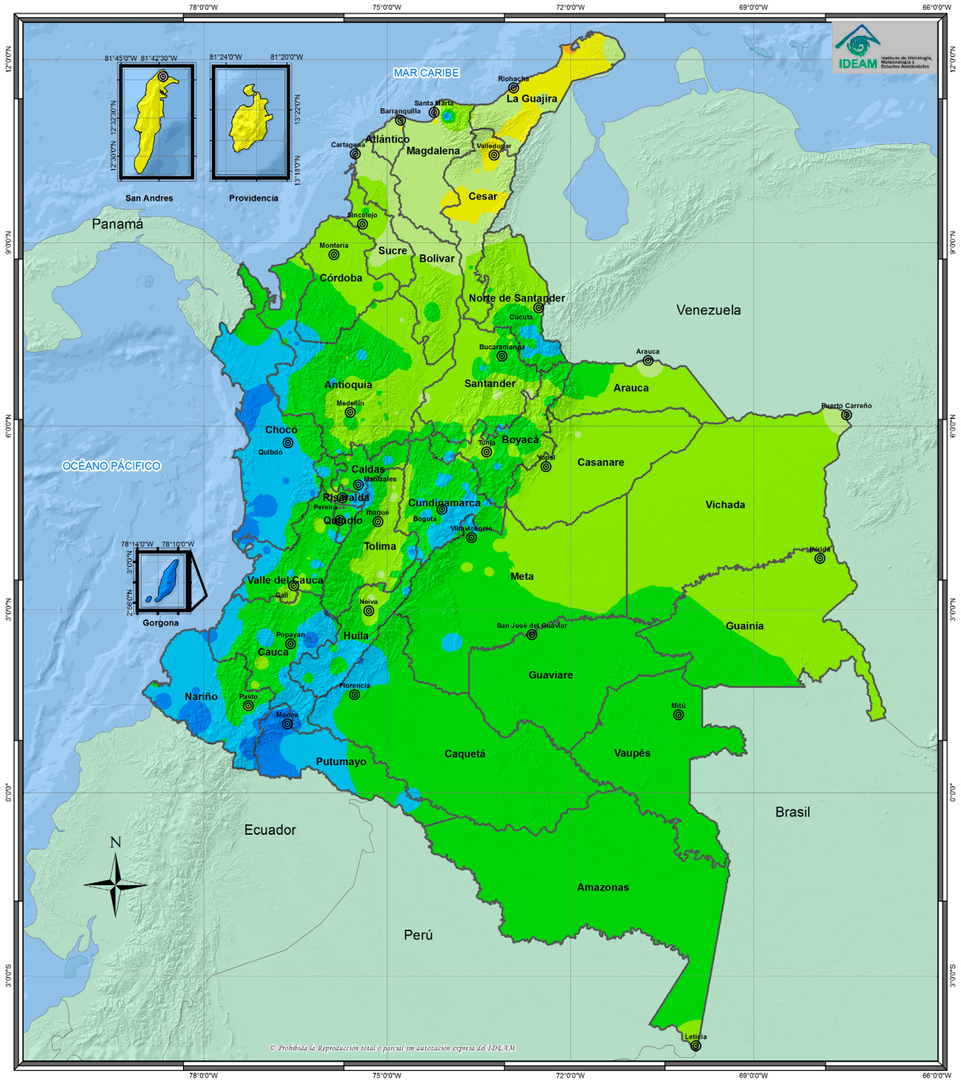
Mapa 24. Promedio de horas de Sol al día en noviembre

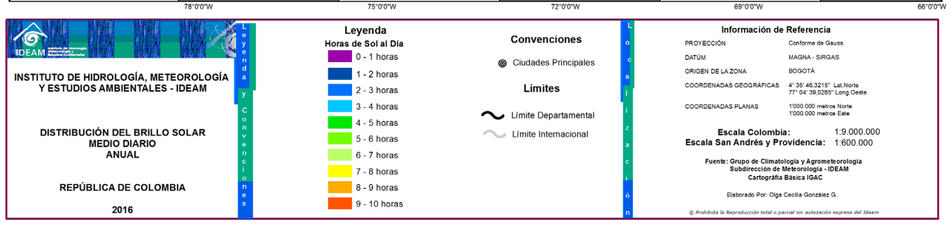


Mapa 25. Promedio de horas de Sol al día en diciembre

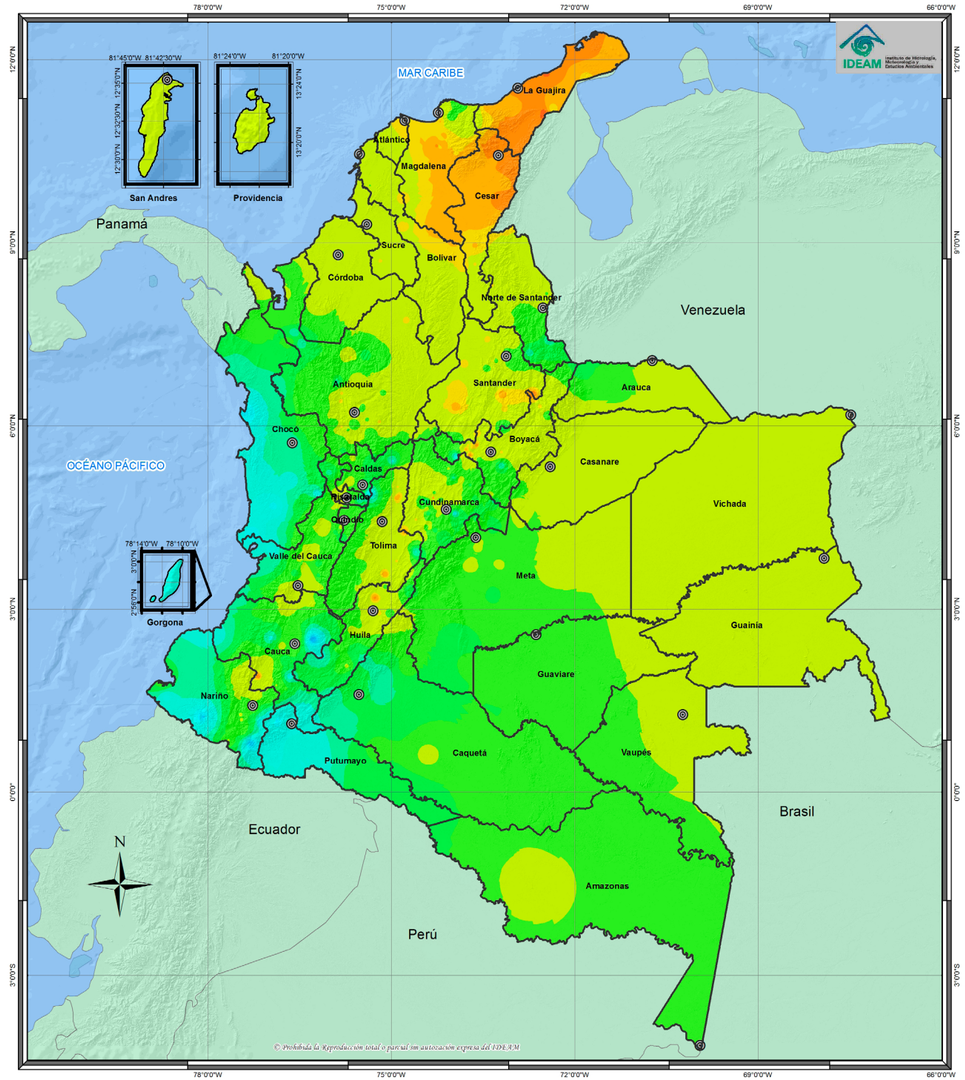


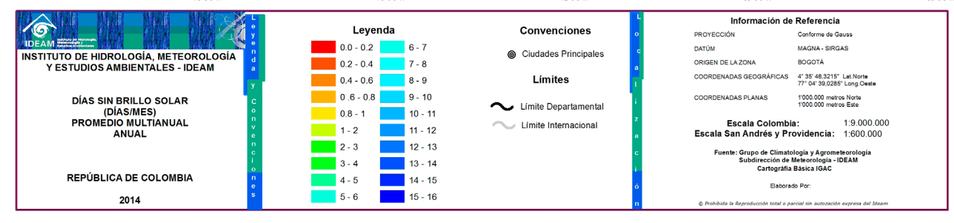
Mapa 26. Promedio anual multianual de horas de Sol al día.





Mapa 27. Promedio anual multianual del número de días al mes sin brillo solar sobre el territorio colombiano.





4.4 ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE RADIACIÓN GLOBAL Y DE LA VALIDACIÓN DE DATOS DE RADIACIÓN

4.4.1 Metodología en la calibración de radiómetros

En la calibración de sensores que miden la radiación directa y global, ya sea pirheliómetros, piranómetros o actinógrafos, se utiliza como referencia un pirheliómetro de cavidad absoluta de primer orden de precisión (ver Figura 41), con certificación del Centro Mundial de Referencia de Radiación Solar (WRR) de Davos (Suiza) y siguiendo las normas ISO. El país cuenta con dos pirheliómetros de este tipo, uno pertenece al IDEAM y el otro pertenece a la Fundación Universitaria Los Libertadores.

En agosto de 2013, se realizó en Cartagena la segunda jornada de calibración de piranómetros (ver Figura 50), este evento fue organizado por el IDEAM y la Fundación Universitaria Los Libertadores, gracias al apoyo económico de la UPME, contó con la participación de 25 técnicos de diferentes entidades que miden la radiación global en el país, como Cenicaña, Cenicafé, CAR, Universidad Distrital, Universidad de Córdoba, Universidad del Tolima, la Fundación Universitaria Los Libertadores y el IDEAM. En este taller se calibraron algunos piranómetros del IDEAM, estos han servido de subpatrones para calibrar en terreno, los sensores de radiación global de la entidad en su red de estaciones meteorológicas automáticas satelitales (EMAS).

4.4.1.1 *Calibración de piranómetros*

La calibración de un piranómetro consiste en determinar un factor K de calibración, que correlacione los datos de radiación solar que mide con los datos de la referencia mundial. El método de calibración se ajustó a las normas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y puede llevarse a cabo de la siguiente forma:

- Por comparación con un pirheliómetro patrón (que mide solo la radiación directa) y el piranómetro que tiene un disco oscurecedor movible, de tal forma que el pirheliómetro patrón determina el haz solar directo y el piranómetro la radiación global y difusa en forma alternada, para después determinar la fracción directa.

Figura 50. Segunda jornada de calibración de piranómetros en Cartagena.

Fuente: IDEAM.





- Por comparación con un piranómetro subpatrón que previamente haya sido calibrado con el pirheliómetro patrón.

En los dos casos los piranómetros deben ser calibrados en la posición normal de uso.

A. Calibración de piranómetros utilizando un pirheliómetro patrón

El método de calibración de un piranómetro utilizando un pirheliómetro como instrumento patrón (el cual solo mide la radiación solar directa que llega sobre una superficie normal al rayo solar), se basa en determinar la radiación solar que llega de forma perpendicular sobre el piranómetro y que se llama componente vertical de la radiación solar directa, cuyo valor es calculado por la expresión matemática $I_n$senh, siendo I_n el valor de la radiación directa y senh corresponde a la altura del Sol sobre el horizonte al momento de la medida.

La radiación solar global (R_G) es determinada por la igualdad:

$$R_G = I_n \text{senh} + R_d$$

R_d es la radiación que llega a la superficie terrestre después de que ha sido difundida por la atmósfera en todas las direcciones y se denomina radiación difusa. Por lo tanto, para calibrar un piranómetro por este método, se realizan tres tipos de medidas: una para medir la radiación directa con el pirheliómetro y dos medidas consecutivas con el piranómetro cada 90 segundos, la primera con el piranómetro completamente libre de sombras y la segunda con un disco de sombra lo suficientemente pequeño que apenas sombree el tamaño del sensor del piranómetro y que va a corresponder a la radiación difusa, tal como se muestra en la Figura 51.

En la Figura 52 se presenta la geometría de los rayos solares cómo llegan a los instrumentos de medida: la radiación directa I_n que llega al pirheliómetro y la componente vertical de la radiación directa que llega al piranómetro $I_n$senh, sobre una superficie horizontal del horizonte geográfico del sitio de medida. Las componentes astronómicas y geométricas para el cálculo de senh, en la sección 3.4.4.

Figura 51. a) Piranómetro destapado (mide radiación global) y b) tapado (mide radiación difusa).

Fuente: Fundación Universitaria Los Libertadores.

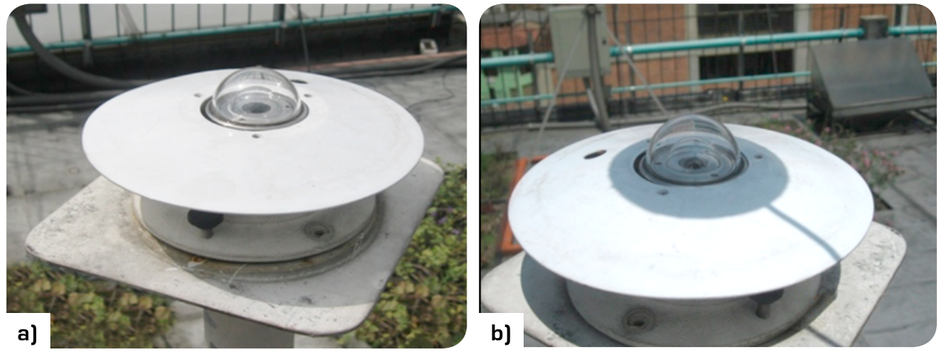
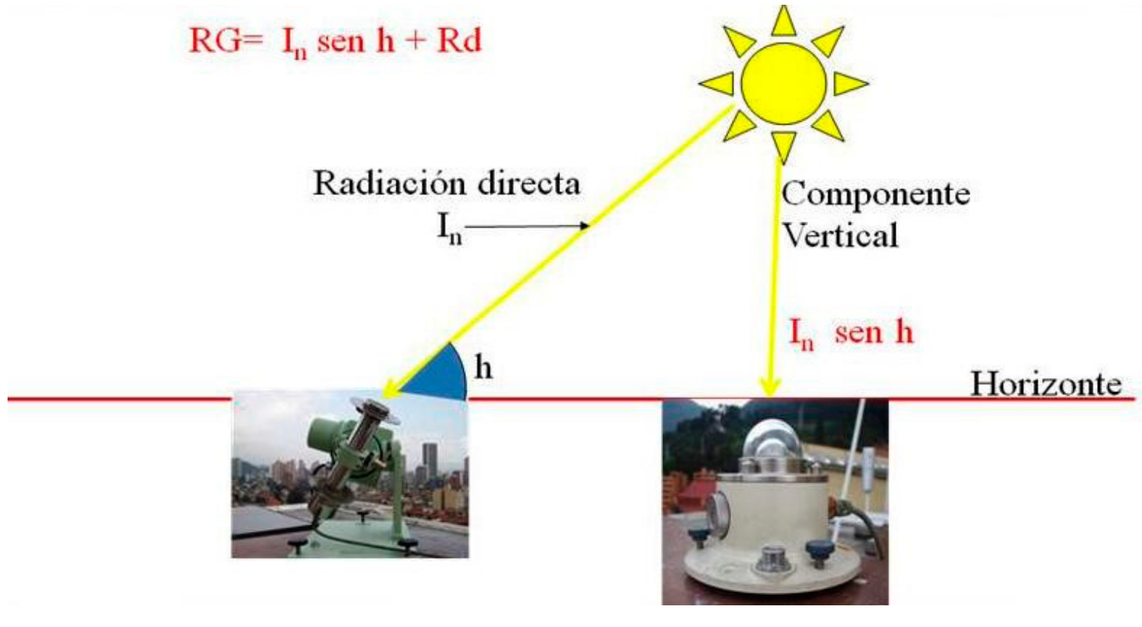


Figura 52. Geometría de los rayos solares.

Fuente: Fundación Universitaria Los Libertadores.

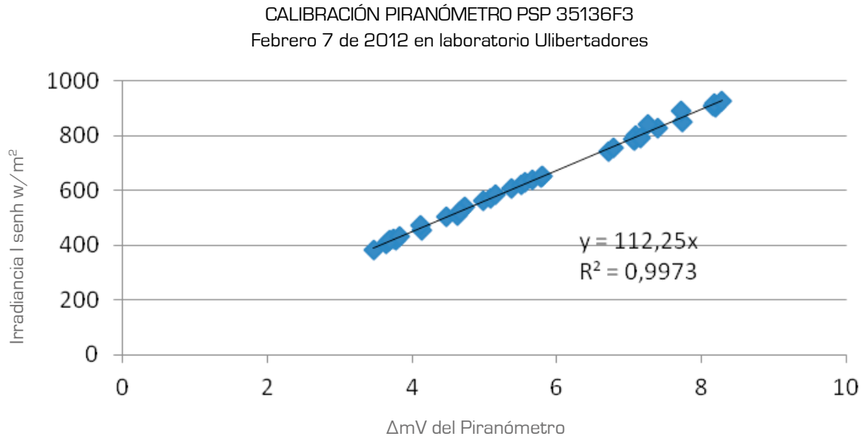


Las unidades eléctricas comúnmente usadas cuando se trata de radiómetros son los voltios (V), milivoltios (mV) o microvoltios (µV) y las unidades de irradiancia que por sugerencia de la OMM se vienen empleando desde 1980, son los Watts por metro cuadrado (W/m²).

Después de realizar las tres mediciones, al valor en mV del piranómetro destapado se le resta el valor medido del piranómetro sombreado; de esta forma la componente directa que recibe el piranómetro queda expresada como ΔmV. Finalmente, se correlacionan los pares de valores $I_n$senh con ΔmV, ajustando la recta que pase por el origen, de tal forma que el valor de la pendiente es el "Factor o Constante de Calibración". La correlación de la Figura 53 corresponde a un piranómetro calibrado en el laboratorio radiométrico de la Fundación Universitaria Los Libertadores y que ha quedado como uno de los subpatrones para calibrar los piranómetros de la red del IDEAM donde están instalados.

Fuente: Fundación Universitaria Los Libertadores.

Figura 53. Gráfica de correlacionan de los valores de Insenh contra ΔmV. .



Con la constante K (pendiente de la recta) se establece la siguiente igualdad matemática para calcular la radiación solar RG instantánea en W/m², en función de los mV medidos por el piranómetro, así:

$$RG\ (W/m^2) = K * mV$$

Donde K es la pendiente (en este ejemplo K es igual a 112,25 y mV son los milivoltios que el piranómetro mide en ese instante o momento en particular).

B. Calibración de piranómetros en terreno utilizando un piranómetro subpatrón

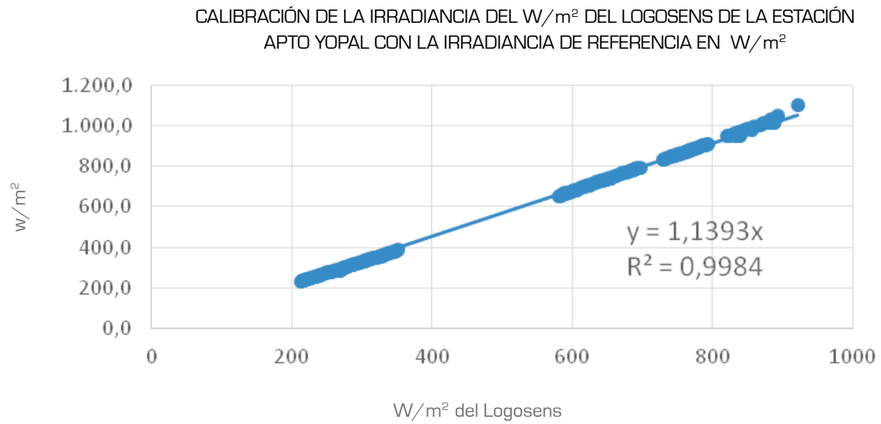
Un piranómetro que haya sido calibrado previamente con un pirheliómetro de Cavidad Absoluta, se denomina piranómetro subpatrón o patrón secundario y puede ser utilizado en la calibración de los piranómetros instalados en las estaciones de campo. Este método es el recomendado por la OMM para calibraciones en terreno, para evitar desmontar los instrumentos de sus estaciones y trasladarlos a los centros nacionales de calibración y de esta forma no se interrumpen las series de medidas que se están realizando.

En la calibración de los piranómetros de las estaciones de campo de la red del IDEAM se procedió de la siguiente forma:

1) En el laboratorio de Radiometría Solar de la Fundación Universitaria Los Libertadores se calibró un piranómetro Eppley espectral de precisión PSP con un pirheliómetro de Cavidad Absoluta PMO6 adquirido por la universidad al Centro Mundial de Radiación Solar de Davos (Suiza) en el 2012.
2) El piranómetro calibrado queda como subpatrón, para ser desplazado a las estaciones de campo y calibrar en terreno el piranómetro allí instalado, en sus condiciones ambientales de funcionamiento.
3) Para el proceso de calibración se realizan medidas simultáneas de las potencias (en W/m²) entre el patrón y la lectura de la pantalla del logosens de la estación correspondiente. Después de un buen número de observaciones simultáneas se grafican y se efectúa el ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados. La Figura 54 muestra la correlación entre las medidas simultáneas de una calibración realizada en la estación del aeropuerto de Yopal en el 2014.

Fuente: Fundación Universitaria Los Libertadores.

Figura 54. Gráfica de correlación entre la irradiancia del sensor de referencia y la del logosens de la estación del aeropuerto de Yopal en el 2014.



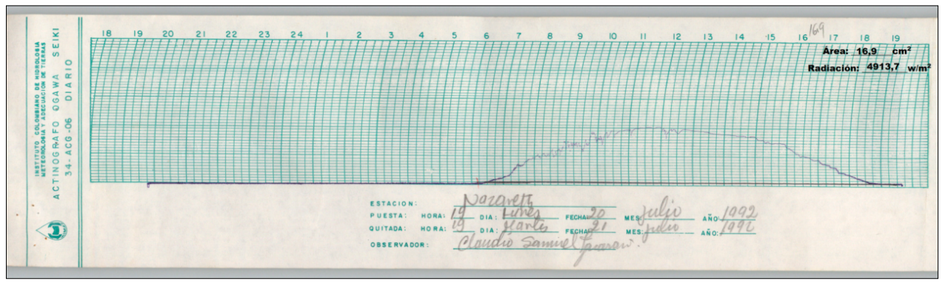
4.4.1.2 *Calibración de actinógrafos utilizando un piranómetro subpatrón*

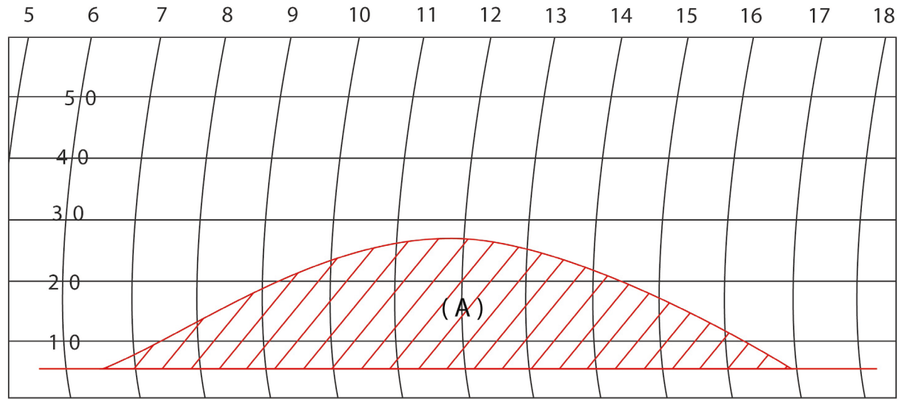
A los actinógrafos se les determina un factor K de calibración para convertir las unidades de medida que son centímetros cuadrados (cm²), correspondientes al área bajo la curva de las gráficas que se generan diariamente a Wh/m² por día.

La radiación solar global diaria (Q) se calcula determinando el área (A) registrada por el actinógrafo, que queda comprendida entre la curva obtenida durante el día y la línea de base determinada por la recta obtenida durante la noche (ver Figura 55). El área puede estimarse utilizando un planímetro o cualquier otro método que permita su correcta medición.

Figura 55. Gráfica de actinógrafo. Arriba gráfica del actinógrafo de la estación Nazareth en La Guajira para el 21 de julio de 1992. Abajo, área bajo la curva.

Fuente: IDEAM.







Dependiendo de la intensidad del fenómeno de El Niño o La Niña, el promedio anual de la radiación global aumenta o disminuye entre un 5% y un 10%, respectivamente, con respecto al promedio anual multianual de la estación.)

Como la magnitud de la radiación incidente es proporcional al área bajo la curva, se tiene que:

$$Q = K \times A$$

Donde K es la constante del actinógrafo.

Para determinar esta constante de calibración (K), se efectúan observaciones diarias entre el actinógrafo a calibrar y un piranómetro calibrado como subpatrón.

Una vez obtenido un número suficientemente grande de observaciones simultáneas, se correlacionan los pares de valores Q obtenido del piranómetro patrón y A de la gráfica, para determinar la constante K.

4.4.2 Criterios en las validación de datos de radiación global

Una vez revisada la información de radiación global en las estaciones del IDEAM (automáticas, convencionales y Sutron), CAR, Cenicaña, Cenicafé, IPSE y Fedearroz, se lograron establecer los siguientes criterios para validar los datos:

1. El principal objetivo de validar los datos de radiación global de cualquier tipo de sensor y sin importar la escala temporal en la cual se genera la información (cada 10 o 30 minutos, horaria o diaria), es la de obtener el comportamiento promedio mensual de la radiación global acumulada diaria, que es lo que finalmente se plasma en los mapas de los atlas. Adicionalmente, si la información lo permite, se puede generar el promedio horario mensual de la radiación global a lo largo del año.
2. Antes que nada, cualquiera de los criterios que se presentan a continuación, no tendrán mucha aplicación si el sensor de radiación global no ha sido calibrado con un subpatrón, que haya sido calibrado con un pirheliómetro de Cavidad Absoluta de primer orden de precisión, con certificación de la Referencia Mundial de Radiación Solar (WRR), dada por el Centro Mundial de Radiación Solar de Davos (Suiza).
3. Tratar de llevar todos los datos originales a nivel horario. Si los datos se generan cada 10 minutos, promediar los seis datos de la hora para obtener uno solo.
4. Cuando se tiene una hora sin valor de radiación, no tener en cuenta dicha hora, ni introducir ceros en la celda o valores que puedan afectar los promedios horarios o la radiación acumulada del día. Debido a lo anterior, esa fila se debe eliminar.
5. Se ha observado, en algunas de las estaciones, que la información de radiación global en horas de la noche, presenta valores en el rango de -100 Wh/m^2 a 100 Wh/m^2, valores que debieran de estar cercanos a cero debido a la ausencia de radiación solar. Por lo anterior, el valor más representativo de este desajuste se debe sumar o restar a los valores horarios de radiación del día respectivo. Se debe sumar el menor valor de desajuste presentado en la noche, cuando este es positivo (ejemplo, si en el reporte horario entre la una y las cinco de la mañana y entre las 7 y 12 de la noche del día, el desajuste varía entre 30 y 35 Wh/m^2, se debe restar el valor de 30 a todos los datos horarios de ese día). Por el contrario, en los casos cuando el desajuste esté por debajo de cero, se debe sumar el mayor valor negativo a todos los datos horarios del día. Lo anterior se debe realizar diariamente ya que el valor de desajuste puede variar de un día a otro. Lo anterior busca que se obtengan datos lo más cercanos a cero en el ajuste, durante la noche.
6. Corregir las horas que no correspondan a la hora exacta. Por ejemplo, si aparece una fila con una hora diferente en minutos (ej.: 8:05), se debe ajustar para que quede solo la hora exacta (8:00) con su correspondiente valor de radiación.
7. En algunos casos, para ciertas entidades, no hay correspondencia entre el valor de la radiación con la hora (por ejemplo, el dato horario entre las 6:00 y las 6:59, es muy alto y corresponde mejor a lo que ocurre entre las 7:00 y las 7:59; en este caso el dato de radiación está adelantado una hora), posiblemente por mala configuración del sistema que recibe los datos del sensor. En esta situación se debe ajustar la hora verdadera con el dato correspondiente.
8. Después de realizar la anterior validación de la información, se debe ajustar cada dato (horario o diario) aplicando la constante de calibración específica para el sensor de radiación. Lo anterior se realiza multiplicando el dato por la constante.
9. Eliminar datos horarios extremos por encima de 1100 Wh/m^2, solo después de aplicar los anteriores criterios. También se deben eliminar todos los datos negativos de radiación global en cualquier hora del día.

A continuación se definen valores máximos de radiación para cada hora del día, que sirven como filtro para el análisis de los datos:

- Entre las 6 y 7 a. m. no pueden dar valores mayores a 100 Wh/m².
- Entre las 7 y 8 a. m. no pueden dar valores mayores a 200 Wh/m².
- Entre las 8 y 9 a. m. no pueden dar valores mayores a 600 Wh/m².
- Entre las 9 y 10 a. m. no pueden dar valores mayores a 750 Wh/m².
- Entre las 10 a. m. y las 2 p. m. no pueden dar valores mayores a 1100 Wh/m².
- Entre las 2 p. m. y las 3 p. m. no pueden dar valores mayores a 750 Wh/m².
- Entre las 3 p. m. y las 4 p. m. no pueden dar valores mayores a 500 Wh/m².
- Entre las 4 p. m. y las 5 p. m. no pueden dar valores mayores a 300 Wh/m².
- Entre las 5 p. m. y las 6 p. m. no pueden dar valores mayores a 100 Wh/m².

11. Cabe anotar, que los anteriores intervalos ayudan a tener un orden de magnitud y a tener una referencia, pero hay que tener en cuenta algunas estaciones como casos especiales y cuyos valores pueden diferir un poco con respecto a los sugeridos en el criterio anterior, debido a que dichas estaciones pueden estar influenciadas por factores como la ubicación (en zona de pendiente), clima, obstáculos alrededor, etc.
12. Verificar cuando la radiación acumulada diaria (suma de la radiación horaria entre las 5 a. m. y las 7 p. m.) sea menor de 1000 Wh/m² y cuando sobrepase los 7000 Wh/m². En este caso se debe realizar un análisis subjetivo por parte del curador de la variable, para confirmar que se dieron las condiciones meteorológicas necesarias para que se den dichos valores extremos de radiación.
13. Eliminar datos en periodos de tiempo que presenten interrupciones o que no son continuos, ya que pueden venir de algún problema en el sensor o en la transmisión de los datos y muy probablemente no son confiables. Se aconseja eliminar los datos que presenten problemas hasta que la serie vuelva a ser uniforme y lógica.
14. Si hay pocos días con datos completos de radiación acumulada diaria en un mes (menos de 10 días), su promedio no se debe tener en cuenta en la obtención de los promedios multianuales del mes respectivo. Si el número de días con información completa es mayor a 10 en el mes y si su promedio difiere notoriamente de los promedios mensuales de la estación para dicho mes, ese dato no se debe tener en cuenta en la obtención de los promedios multianuales del mes.
15. Cuando ya se hayan generado los promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria en la estación analizada, se puede verificar la consistencia de

Tabla 14. Promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria en la estación automática satelital de Zaragoza (Cartago-Valle del Cauca).

Fuente: IDEAM.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedios
2005						4958,0	5827,9	5343,0	5690,4	4955,3	5458,4	4675,0	5272,6
2006								4416,6			2398,4		3407,5
2007		2913,2	3532,3										3222,7
2008				2969,7	2834,0	2445,9	2670,0	2627,2	2617,7	2695,3			2694,2
2009			2950,9	2872,9	2644,4	2524,9	2726,9	2819,2	3183,4	2617,5	2410,8	2095,3	2684,6
2010	2481,9	2568,6	2628,9	2646,2	3017,8	2391,1	2474,7	2184,8	2493,8	2796,5	2127,9	2151,2	2496,9
2011	2539,0	2541,1	2654,9	2626,3	2543,2	2529,4	2709,2	2891,2	2868,1	2485,9	2656,7	2335,5	2615,0
2012	2532,5	3071,5	2780,5	2706,5	2625,5	2306,2	2544,0	3004,7	2793,4	2921,1	1976,1	2303,1	2630,4
2013	2327,0	2469,6	2380,9			1937,4		2390,8	5948,0	5540,1		4725,9	3465,0
2014	4799,7	4982,9	5277,9	5463,6	5230,3	5199,1	5880,8	5435,9	5488,0	4895,7	4847,4	4888,3	5199,2
2015	5014,4	5146,6	5407,7	5255,8	5238,5	5220,3	5078,0			4874,0	4529,3	5006,2	5077,1
2016	5320,4	5042,4	5688,2	5117,6	4901,2	5438,6	5085,3				5488,7	5083,3	5240,6
Promedios	**5044,8**	**5057,3**	**5457,9**	**5279,0**	**5123,4**	**5204,0**	**5468,0**	**5389,4**	**5708,8**	**5066,3**	**5081,0**	**4875,7**	**5229,6**

los promedios en la estación y los periodos en los cuales el sensor pudo estar funcionando mal. En la tabla 14, se presenta el ejemplo en la estación Zaragoza en Cartago, en la cual no se tuvo en cuenta el periodo comprendido entre agosto de 2006 y agosto del 2013 (datos en amarillo), ya que los promedios son bajos con relación a lo que se conoce de radiación global y brillo solar en la zona y respecto a los promedios que se obtuvieron después de aplicar la constante de calibración a toda la serie de datos (el sensor se calibró en el 2014).

16. Para complementar los criterios relacionados anteriormente, se debe analizar la consistencia en los comportamientos de los promedios multianuales de la radiación global acumulada diaria obtenidos en la estación, con los promedios multianuales de brillo solar y precipitación en la zona. Lo anterior puede ayudar a determinar si hay errores en la validación, si el sensor está funcionando bien o no y si hay consistencia en los comportamientos de estas tres variables. En la Figura 56 se presenta la estación ubicada en Mosquera (Cundinamarca), un comparativo entre los promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria frente al brillo solar (relación directa: si el dato de brillo es alto, el valor de la radiación es alta y en forma contraria) y frente a la precipitación (relación inversa, aunque no en todas las zonas del país se cumple en forma estricta, cuando en la zona existe un alto porcentaje de precipitaciones nocturnas), observando que el sensor genera un comportamiento lógico y ajustado al de las otras dos variables.
17. También se debe comparar el promedio anual de la radiación global acumulada diaria con el promedio anual del acumulado mensual de horas de Sol de brillo solar (ver en la Figura 56 los datos enmarcados en azul), estableciendo algunos rangos de ocurrencia y que relacionan estas dos variables. De acuerdo a la experiencia del evaluador de los datos, para un rango del promedio anual entre 130 y 140 horas de Sol acumuladas en el mes, se puede llegar a tener promedios anuales de la radiación global acumulada diaria entre 3900 y 4200 Wh/m² por día.
18. Finalmente, se debe conocer muy bien el entorno donde está ubicada la estación para poder justificar el comportamiento mensual de la radiación global y las posibles diferencias con los comportamientos del brillo solar y la precipitación de la Figura 56, ya que los sensores pueden estar influenciados por la ubicación de la estación (en zona de pendiente, plana, urbana, rural, entre otras), el clima, los obstáculos alrededor, el tipo de plataforma colectora de datos de la estación, etc.

Figura 56. Comparativo entre los promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria, el brillo solar y la precipitación en la estación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca).

Fuente: IDEAM.

Instituto de hidrología,Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM

ESTACIÓN TIBAITATÁ
LATITUD : 4,69
LONGITUD : -74,21
ALTURA : 2593

Promedio periodo 2005/2016

VALORES PROMEDIO TOTALES DE RADIACION SOLAR GLOBAL (Wh/m²)

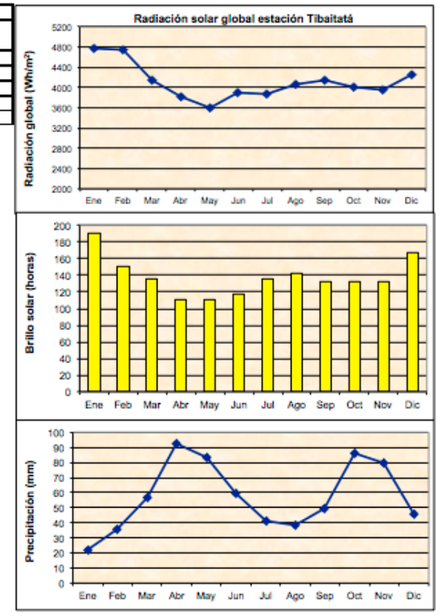
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
Promedios	4789.7	4755.4	4152.4	3822.9	3587.1	3887.9	3882.2	4062.9	4141.9	4023.0	3943.8	4255.5	4109.5

PRECIPITACIÓN
Estacion Tibaitata (Mosquera) periodo 1981-2010

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
22.3	35.8	57.2	92.8	83.5	59.1	40.9	38.1	49.6	85.9	79.3	45.1

Brillo solar
Estacion Tibaitata (Mosquera) periodo 1982-2015

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
191.0	150.0	135.7	110.7	110.5	117.7	135.3	142.8	132.4	132.1	132.5	167.9
									Promedio		138.2



LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN COLOMBIA

Cabo de la Vela, Guajira



Entre un 6% y un 7% de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, corresponde a la ultravioleta (UV).

5.1 RED NACIONAL DE MEDICIÓN E INSTRUMENTOS DE MEDIDA

El IDEAM ha establecido una red nacional para la vigilancia y monitoreo de la radiación ultravioleta, con cinco estaciones convencionales de superficie ubicadas en Riohacha, Bogotá, Pasto, Leticia y San Andrés. Los lugares fueron escogidos por su posición geográfica representativa, tomando en cuenta las variaciones latitudinales a lo largo del territorio nacional.

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

Cada estación cuenta con un espectrorradiómetro con cuatro rangos espectrales de medida de la radiación ultravioleta en las bandas UV-A, UV-B y la banda integral de la radiación activa en fotosíntesis (PAR, por sus siglas en inglés). El espectrorradiómetro utilizado es el ultravioleta Biospherical GUV-511 (ver Figura 57a), el cual cuenta con cinco canales de medida distribuidos así: UV-B (305 nm), UV-B (320 nm), UV-A (340 nm), UV-A (380 nm) y el rango entre 400 nm y 700 nm para la radiación visible o activa en fotosíntesis (PAR). Los instrumentos realizan medidas puntales en fracciones de segundo para cada canal de medida y las integra en intervalos de un minuto; las medidas luego se almacenan en valores máximos, integrales horarios y totales diarios.

Figura 57. a) Dos de los Espectrorradiómetros Biospherical GUV-511 utilizados por el IDEAM. b) Espectrorradiómetro Biospherical GUV-2511 utilizado por la Fundación Universitaria Los Libertadores.



El Espectrorradiómetro físicamente consiste en un sensor de cinco canales a temperatura controlada, por medio de una interfase que también permite la comunicación con un computador personal. Este instrumento ha sido utilizado con éxito en todo el mundo bajo las más adversas condiciones climáticas, siendo

considerado como un sistema de punta en el monitoreo a largo plazo de la radiación ultravioleta y la radiación fotosintéticamente activa del espectro solar.

La mayoría de las estaciones fueron instaladas en 1998, como se observa en la siguiente tabla, pero en la actualidad solo están funcionando las de Bogotá y Pasto. Las otras estaciones, debido a diferentes circunstancias, han dejado de funcionar.

Tabla 15. Estaciones convencionales de radiación visible y ultravioleta

Estación	Inicia	Información hasta
Bogotá	1 de enero de 1998	Actualmente en funcionamiento
Riohacha	1 de agosto de 1998	9 de abril de 2001
Pasto	1 de enero de 1998	Actualmente en funcionamiento
Leticia	1 de marzo de 1998	7 de marzo de 1999
Isla de San Andrés	18 de noviembre de 1999	27 de septiembre de 2003

5.2 RED NACIONAL DE SOLMÁFOROS

Teniendo en cuenta que la función principal de la Capa de Ozono es servir de escudo para absorber los rayos ultravioleta (UV) del Sol, los cuales han sido relacionados con efectos perjudiciales sobre la salud de los seres humanos, durante el año 2012 la Unidad Técnica Ozono (UTO) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), con el acompañamiento del IDEAM y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), realizó una campaña nacional para difundir información concerniente a la capa de ozono y el índice UV (IUV) en Colombia.

En junio de 2012, la UTO, en cooperación con el IDEAM y el PNUD, instaló el primer solmáforo en la ciudad de Bogotá D. C., en el recinto ferial Corferias. Asimismo, durante el mes de septiembre, como parte de la celebración del Día Internacional de la Preservación de la Capa de Ozono, se instalaron cinco (5) solmáforos en las ciudades de Cartagena, Cali, Medellín, Pereira y Pasto. Estos cinco solmáforos cuentan con un sistema de transmisión de datos de radiación UV e índice de radiación (IUV), que se espera envíen la información de los solmáforos a la sede del IDEAM en Bogotá D. C., entidad que se encargará de su mantenimiento, calibración y de la publicación de los datos a través de la web.

La Red Nacional de Solmáforos de Colombia está conformada inicialmente por los siete (7) solmáforos que se incluyen en la Tabla 16. Seis de estos solmáforos fueron adquiridos a través del PNUD, en el marco de la implementación del Protocolo de Montreal, mientras que el séptimo fue instalado y donado al IDEAM por la empresa Scandinavia Pharma, como parte de su campaña de responsabilidad social.

Tabla 16. Solmáforos instalados en Colombia

No.	Ciudad	Lugar	Fecha de instalación
1	Bogotá D. C.	Plaza de Banderas de Corferias	Junio 8 de 2012
2	Bogotá D. C.	Estación Héroes de TransMilenio. (Donado por Scandinavia Pharma)	Octubre 18 de 2012
3	Cartagena de Indias	Muelle Turístico La Bodeguita	Septiembre 15 de 2012
4	Cali	Estación Universidad Metrocali	Septiembre 16 de 2012
5	Pereira	Plaza Cívica Ciudad Victoria	Septiembre 16 de 2012
6	Pasto	CAI Morasurco	Septiembre 24 de 2012
7	Medellín	Parque de los Pies Descalzos	Septiembre 28 de 2012

¿Para qué sirve el solmáforo?

El solmáforo es un dispositivo que además de permitir la medición instantánea de la radiación ultravioleta (UV, entre 280 y 390 nm), empleando sensores ópticos, entrega el índice UV mediante el uso del código internacional de colores definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el PNUD y la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. El código de colores en el solmáforo hace muy sencillo alertar a la gente sobre la peligrosidad de la radiación ultravioleta y sirve para concientizarlos sobre la exposición saludable al Sol. A partir de este código, se pueden dar recomendaciones a la población sobre las medidas de protección necesarias, tal como se muestra en la Tabla 17, las cuales están impresas en el pedestal de los solmáforos instalados en el país (ver Figura 58).

Tabla 17. Categoría de exposición y medidas de protección recomendadas de acuerdo al IUV

Categoría de exposición	Índice UV	Protección recomendada	Factor de protección solar (FPS) recomendado	
			Piel clara	Piel oscura
BAJA	< 2,5	No necesita protección. Puede permanecer en el exterior sin riesgo	15	8
MODERADA	2,5 A 5,5	Evite permanecer tiempos prolongados (más de 30 minutos) expuesto a los rayos solares.	25	15
ALTA	5,5 A 7,5	Necesita protección: manténgase a la sombra entre las 10 a. m. y las 2 p. m.; use camisa, sombrero, crema de protección solar y gafas con filtro solar UV-B y UV-A	30	25
MUY ALTA	7,5 A 10,5	Necesita protección extra: Evite salir entre las 10 a. m. y las 2 p. m.; busque la sombra; son imprescindibles camisa de manga larga, sombrero, crema de protección solar y use gafas con filtro solar UV-B y UV-A	50+	30
EXTREMADAMENTE ALTA	Mayor a 10,5	Necesita protección extra: Evite permanecer más de diez minutos a los rayos solares y salir entre las 10 a. m. y las 2 p. m.; busque la sombra; son imprescindibles camisa de manga larga, sombrero, crema de protección solar y use gafas con filtro solar UV-B y UV-A.	50+	50+

Elaborado a partir de las siguientes fuentes: Índice UV solar, Guía práctica. OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP. 2003 y tutiempo.net para el FPS.

Figura 58. Solmáforos instalados en Bogotá-Corferias (izquierda) y Cartagena (derecha)

Fuente: IDEAM



De acuerdo con el código de colores, cuando el solmáforo está en verde el riesgo de la exposición al Sol en las salud humana es bajo, cuando se encuentra en amarillo el riesgo es moderado, el color naranja indica un riesgo alto y necesidad de usar elementos de protección, como protector solar, gafas y sombrero. Los colores rojo y morado indican una alta radiación UV y un alto riesgo en la salud cuando las personas se exponen por un periodo prolongado al Sol, por lo que se recomienda mantenerse a la sombra.

En el anexo 10 se presentan las especificaciones técnicas de los solmáforos instalados en el país.

5.3 UNIDADES DE MEDIDA

Para la banda espectral ultravioleta se utilizan las siguientes unidades: instantánea (µW/cm²nm) e integrada (µWh/cm²nm), en cada longitud de onda medida (ver tabla 18).

Tabla 18. Conversiones útiles para radiación visible y ultravioleta

Unidad	Equivalencia
1 µW/cm^2	0,01 W m-2
1 klux	18 µmol m-2 s-1
1 W m-2	4.6 µmol m-2 s-1
1 klux	4 W m-2
1 µmol m-2 s-1	1 µE m-2 s-1
1 klux	18 µE m-2 s-1
1 W m-2	4,6 µE m-2 s-1
1 Wh	3,6 KJ

5.4 MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (ÍNDICE UV)

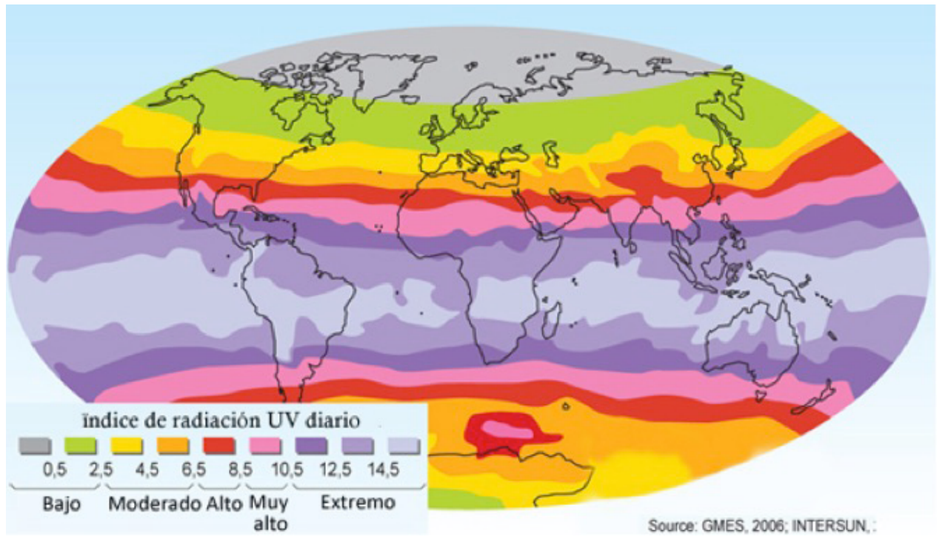
5.4.1 Distribución global de la radiación ultravioleta

La radiación UV varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial, como es el caso de Colombia, los rayos solares caen más directamente que en las latitudes medias y la radiación UV resulta ser más intensa en esa área.

Otro factor que influye en los valores de radiación UV en superficie es la cantidad de ozono en la atmósfera, ya que una reducción en esta implicará un aumento en la radiación que alcanza la superficie terrestre. Como se presenta en la Figura 65 (sección 6.3.1), en la cual se muestra la distribución global del ozono total, las zonas con menor contenido (en color blanco), están concentradas específicamente en el sector oriental de la cuenca del Pacífico Tropical y en amplios sectores del norte y centro de Suramérica, el Atlántico tropical y el centro de África, donde se registran valores por debajo de 240 Unidades Dobson (UD Unidad de medida para determinar la cantidad de ozono en toda la columna atmosférica). **Debido a lo anterior, estas zonas están expuestas a altos niveles de radiación en superficie durante todo el año.** En la sección 3.10.2 se describen otros factores que influyen en los niveles de radiación UV pero de carácter más local, como son: la posición del Sol durante el día, la altitud, el cubrimiento de las nubes, la contaminación atmosférica y la reflexión terrestre.

En la Figura 59 se muestra el máximo valor del índice (IUV) a nivel global, para cielos despejados de un día en particular (en este caso es el pronóstico del IUV para el 28 de octubre de 2006), el cual se puede presentar hacia el mediodía. Se observa que una de las zonas con valores más altos del índice es la parte central de Suramérica y la zona noroccidental donde están ubicadas las regiones Andina, Pacífica y Caribe de Colombia. Los valores en estas regiones de Colombia, alcanzan los valores más extremos y peligrosos de la escala, superiores a 14.5.

Figura 59 Máximo valor diario del índice UV (IUV) para cielos despejados.



Fuente: GMES, 2006, INTERSUN, Emmanuelle Bournay, UNEP/GRID-Arenda.

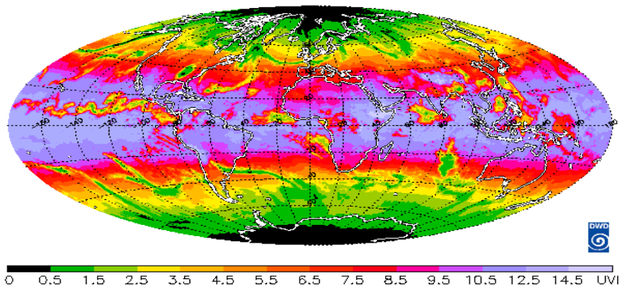
El índice UV (IUV) es una medición sencilla de la intensidad de la radiación ultravioleta en la superficie de la Tierra. Se ha desarrollado como un indicador que asocia la intensidad de la radiación solar ultravioleta (principalmente la UV-B) incidente

sobre la superficie de la Tierra, con posibles daños en la piel humana y es una medida de orientación dirigida a promover en la población una exposición saludable al Sol, ya que esta es necesaria para diversos procesos biológicos del organismo humano.

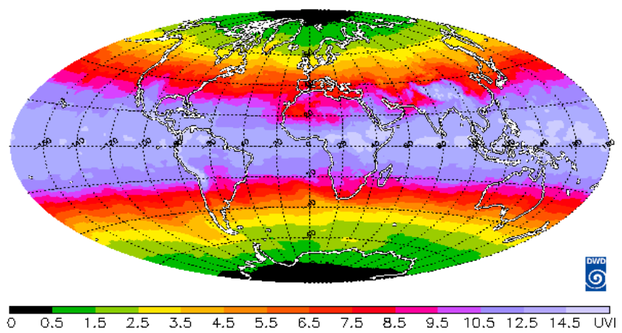
Los índices UV indican la intensidad de la radiación UV-B en una escala del 1 al 11+ (entre más alto sea el índice, más peligrosa la exposición a la radiación UV). De acuerdo con la Figura 60, en la cual se presenta el máximo valor diario pronosticado del índice UV a nivel global, teniendo en cuenta el cubrimiento de las nubes (a) y para cielos despejados (b), en ambos casos en los trópicos se pueden encontrar valores extremos del IUV, del orden de 14,5 o superiores.

Fuente: Deutscher Wetterdienst

Figura 60. Pronóstico del IUV para el 13 de septiembre de 2017 con nubosidad y para cielos despejados.



a. Índice (IUV) teniendo en cuenta la nubosidad.



b. Índice (IUV) para cielos despejados

El índice UV es una medida de orientación dirigida a promover en la población una exposición saludable al Sol.



Tradición de las Palanqueras, Cartagena.

Estos mapas de pronóstico del índice IUV realizados por el instituto alemán Deutscher Wetterdienst, muestran que la disminución del índice por el cubrimiento de las nubes no es tan alta, sobre todo en sectores de cordillera del país.

5.4.2 Distribución espacial y temporal de la radiación ultravioleta en Colombia

La intensidad de la radiación ultravioleta en el territorio nacional se presenta en los mapas 28 al 39 a nivel mensual y en el mapa 40 a nivel anual y en ellos se muestran los promedios mensuales del máximo valor diario del índice ultravioleta (IUV), que se puede presentar hacia el mediodía, con cielos despejados.

Para la elaboración de los mapas se utilizó el modelo matemático que expresa la atenuación de la radiación solar en términos de los efectos de absorción y dispersión de los componentes atmosféricos, a través de la ley de Lambert-Beer (ver sección 2.2.2). El modelamiento se realizó en las bandas espectrales 305, 320 y 340 nanómetros, sobre la superficie terrestre. El presente atlas contiene el mapa de radiación ultravioleta a 305 nm, que es la longitud de onda característica para estudios de impacto en salud humana, específicamente para cáncer de piel.

a) Análisis promedio anual

En el mapa anual se observa que el comportamiento espacial de la radiación ultravioleta en el país depende en un alto porcentaje del comportamiento que presente en la atmósfera el ozono total, el cual permite que llegue mayor o menor cantidad de radiación ultravioleta a la superficie del territorio nacional. Se presentan las menores intensidades del IUV en gran parte de la región Caribe y el norte de las regiones Pacífica y Orinoquia, con valores del IUV entre 9 y 10, catalogados como una exposición muy alta y peligrosa, de acuerdo con las especificaciones internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Los valores más altos del IUV se registran en amplios sectores de la región Andina y el sur de la región Pacífica, especialmente en zonas de montaña de Antioquia, santanderes, Boyacá, Cundinamarca, Eje Cafetero, Tolima, Huila, Valle del Cauca, Cauca, Nariño y Chocó, además en la Sierra Nevada de Santa Marta y el piedemonte Llanero, con valores del IUV entre 11 y 13, catalogados como una exposición extremadamente alta y peligrosa.

b) Análisis espacio-temporal a lo largo del año

El comportamiento a lo largo del año de la radiación ultravioleta sobre el territorio colombiano, depende en un buen porcentaje del movimiento aparente del Sol en su paso por el país, cuya posición latitudinal geográfica se encuentra entre más o menos 4 grados sur en el Amazonas y 12 grados norte en La Guajira. Esta posición define los resultados presentados en los mapas así:

- **Durante todo el año el país está expuesto a altos valores de radiación ultravioleta, los cuales están catalogados como de riesgo, por lo que se sugiere seguir las recomendaciones en las exposición saludable al Sol incluidas en el Anexo 1.**
- En el año se presentan dos periodos con mayor incidencia de radiación ultravioleta en el país, uno alrededor de marzo y el otro alrededor de octubre, en razón de que en estos meses el Sol alcanza las mayores alturas sobre el horizonte geográfico y por esto los rayos solares también alcanzan mayor perpendicularidad sobre el territorio colombiano. Los mapas reflejan esta situación, se observa que a partir de febrero va aumentando la radiación ultravioleta y en marzo alcanza el mayor valor, después disminuye progresivamente hasta julio y en agosto se vuelve a incrementar hasta octubre, para finalmente disminuir hasta enero, siguiendo el movimiento aparente del Sol, variable conocida como declinación solar y los puntos de referencia para el seguimiento de esta son los paralelos que delimitan la zona intertropical, entre el trópico de capricornio en el hemisferio sur y el trópico de cáncer en el hemisferio norte. Es así que el 21 y 22 de diciembre (en el Solsticio de invierno) el Sol se encuentra sobre el trópico de capricornio (ver sección 3.4.1), por eso la radiación ultravioleta en Colombia es baja ya que la distancia cenital de posición del Sol es mayor y por lo tanto disminuye la perpendicularidad de los rayos solares sobre el territorio colombiano; a continuación inicia su movimiento aparente hacia el norte y en el equinoccio de primavera (el 21 de marzo) el Sol se encuentra perpendicularmente sobre el eje del ecuador terrestre, aumentando la incidencia de la radiación ultravioleta sobre el país, la cual vuelve a disminuir hasta el 21 de junio (en el Solsticio de verano) cuando el Sol se encuentra sobre el trópico de Cáncer, posteriormente vuelve a incrementarse la perpendicularidad sobre el eje del ecuador alrededor del 21

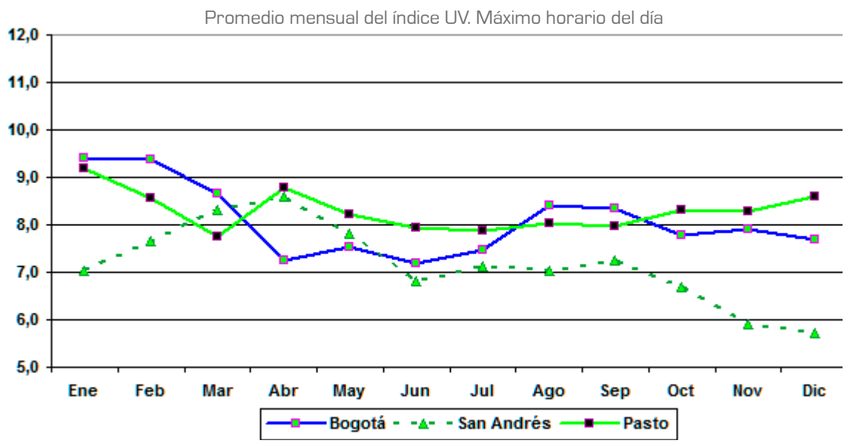
de septiembre y finalmente vuelve a disminuir hasta el 21 de diciembre y así sucesivamente.

c) Variabilidad del índice ultravioleta en algunas ciudades del país

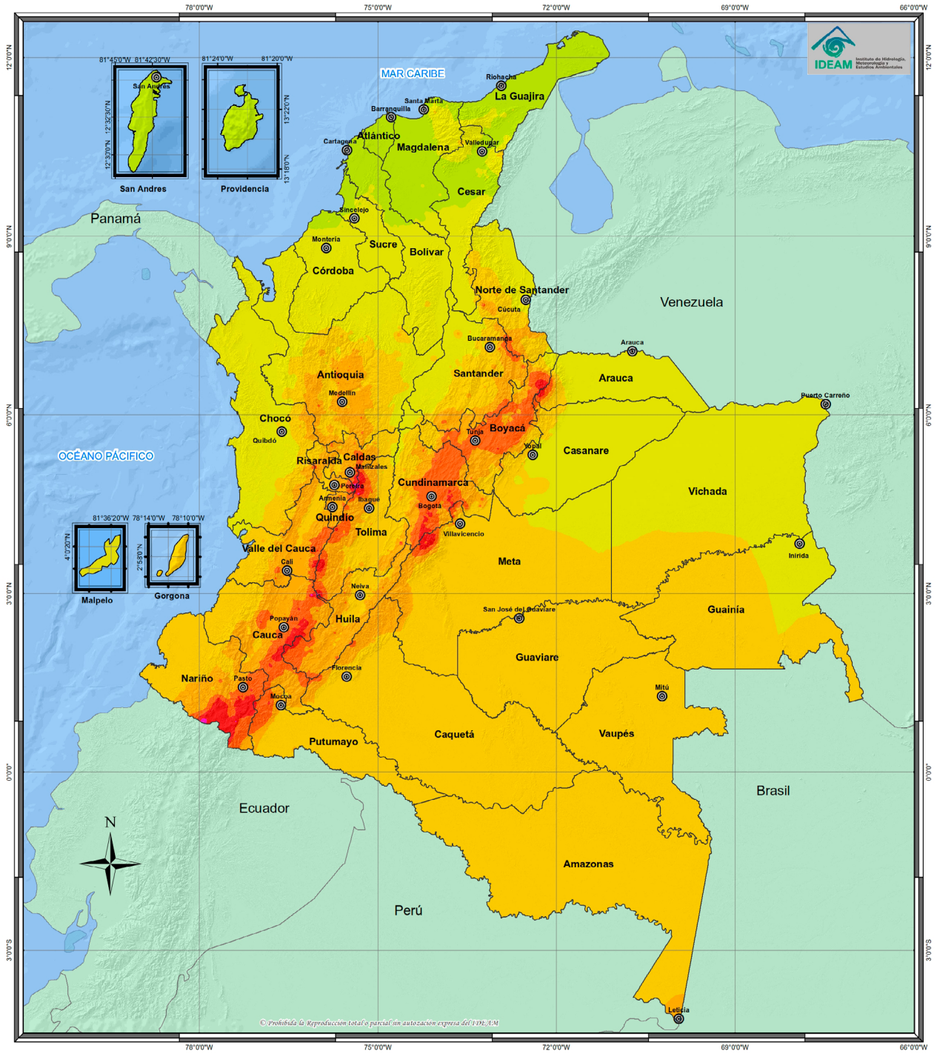
Teniendo en cuenta la información de los espectrorradiómetros Biospherical GUV-511 utilizados por el IDEAM, en la Figura 61 se presenta el comportamiento del promedio mensual del índice UV, obtenido a partir del máximo promedio horario durante el día, en las ciudades de Bogotá, Pasto y San Andrés. En el caso de Bogotá, se puede observar un comportamiento bimodal, en el que los valores más altos se presentan entre enero y marzo, con valores del IUV entre 9 y 10 y en agosto y septiembre, con valores entre 8 y 9. En Pasto los valores más altos están entre diciembre y febrero y en abril, con valores del IUV cercanos a 9, mientras que durante el resto del año los valores son cercanos a 8. Para el caso de la Isla de San Andrés, los valores más altos se dan entre febrero y mayo, con valores del IUV alrededor de 8 y los más bajos están en noviembre y diciembre con valores del IUV cercanos a 6. En estos comportamientos influyen factores como la cantidad de ozono total en la atmósfera del país, la inclinación del eje de rotación de la Tierra (posición del Sol y latitud), la altitud y el cubrimiento de las nubes, entre las principales.

Figura 61. Promedio mensual del índice UV, obtenido del máximo promedio horario en el día en las ciudades de Bogotá, San Andrés y Pasto.

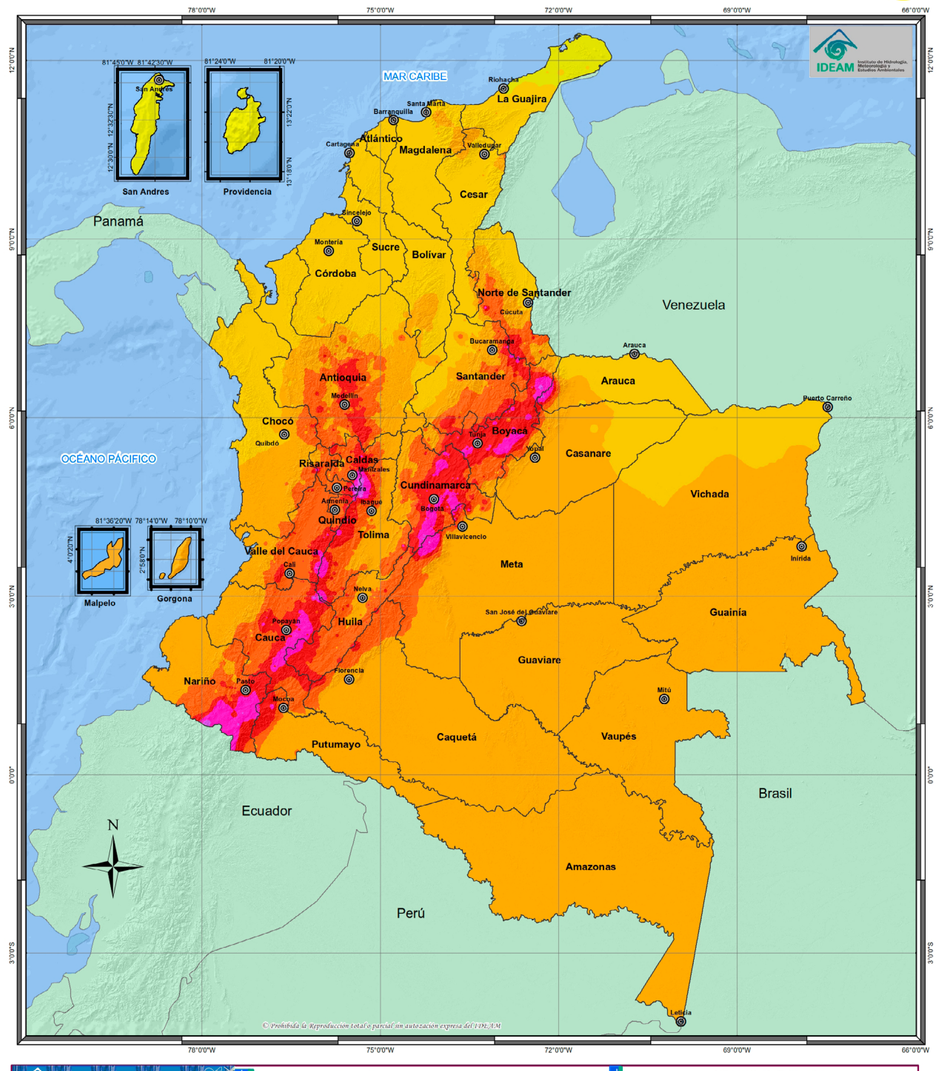
Fuente: IDEAM.



Mapa 28. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en enero.

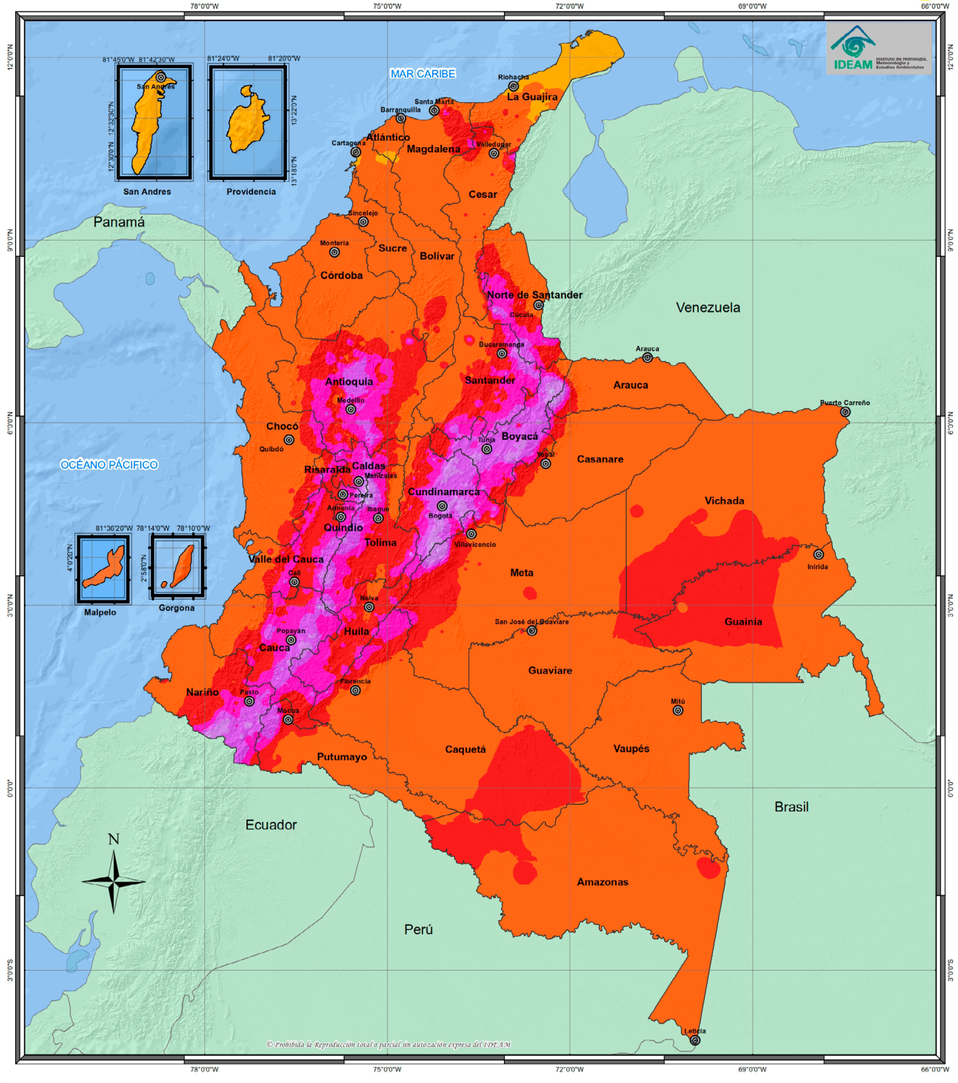


Mapa 29. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en febrero.



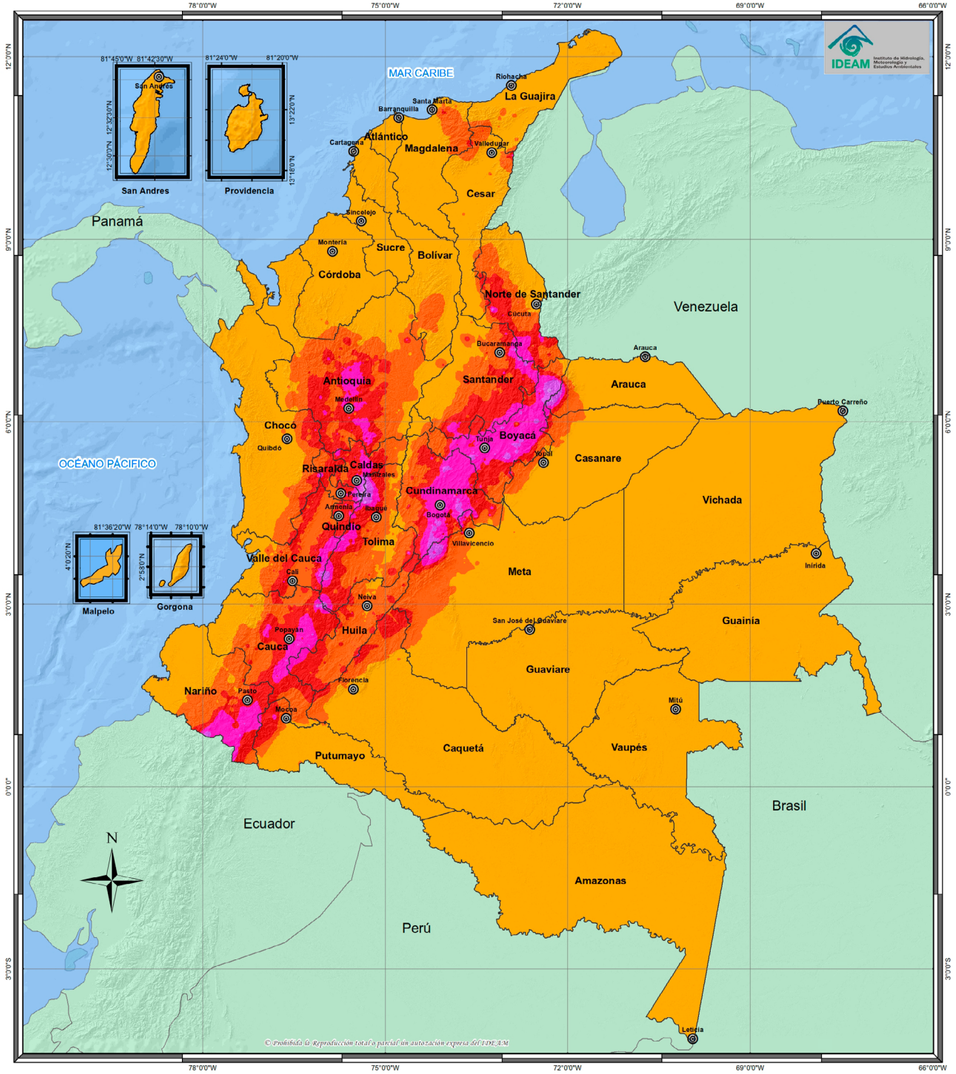


Mapa 30. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en marzo.





Mapa 31. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en abril.



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO
ABRIL

REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

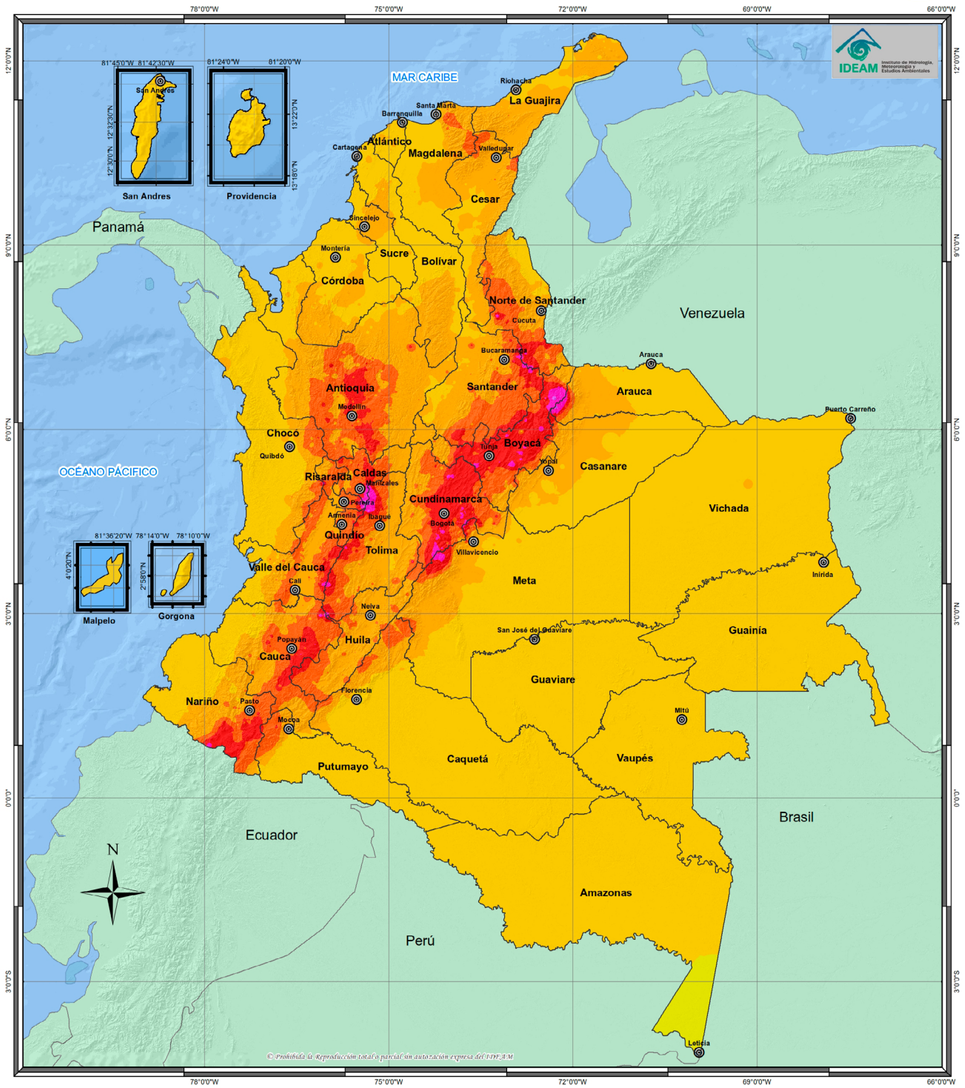
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM

Mapa 32. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en mayo.



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO
MAYO
REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

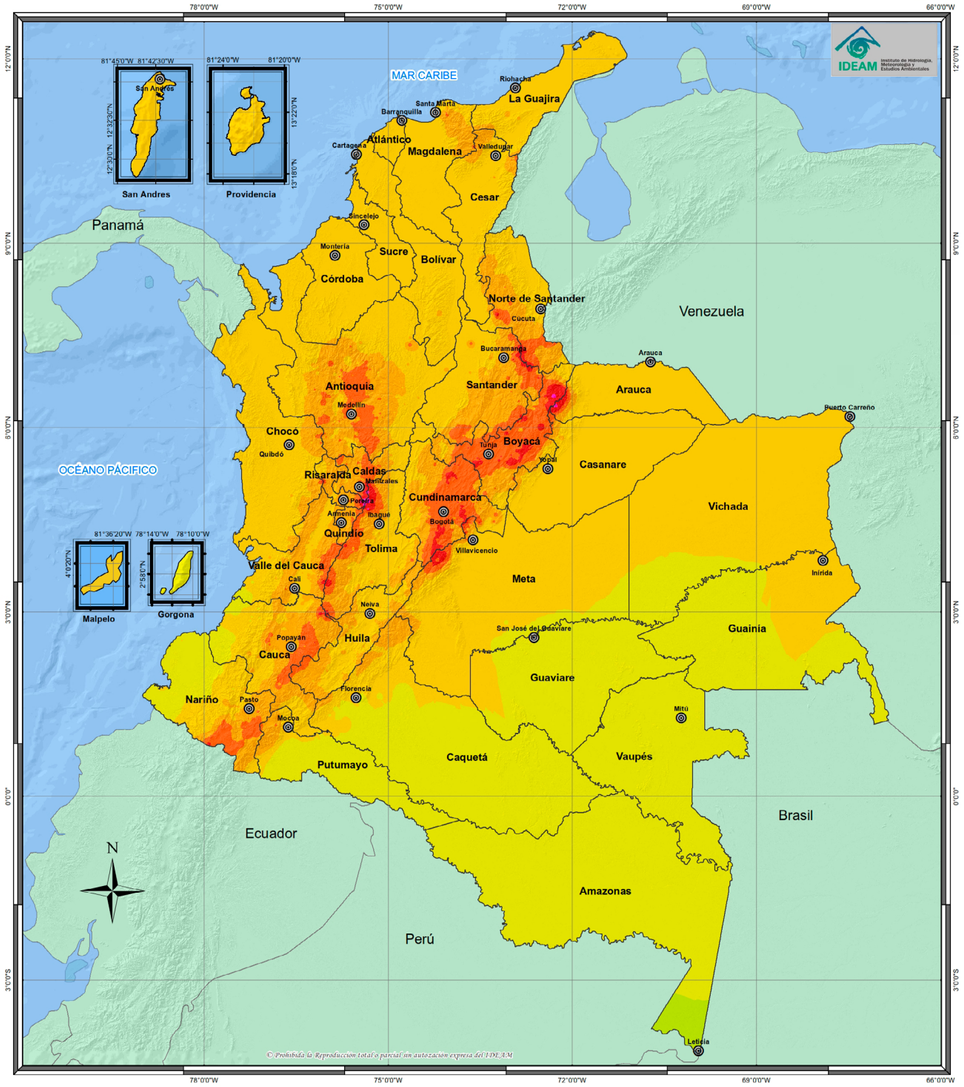
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

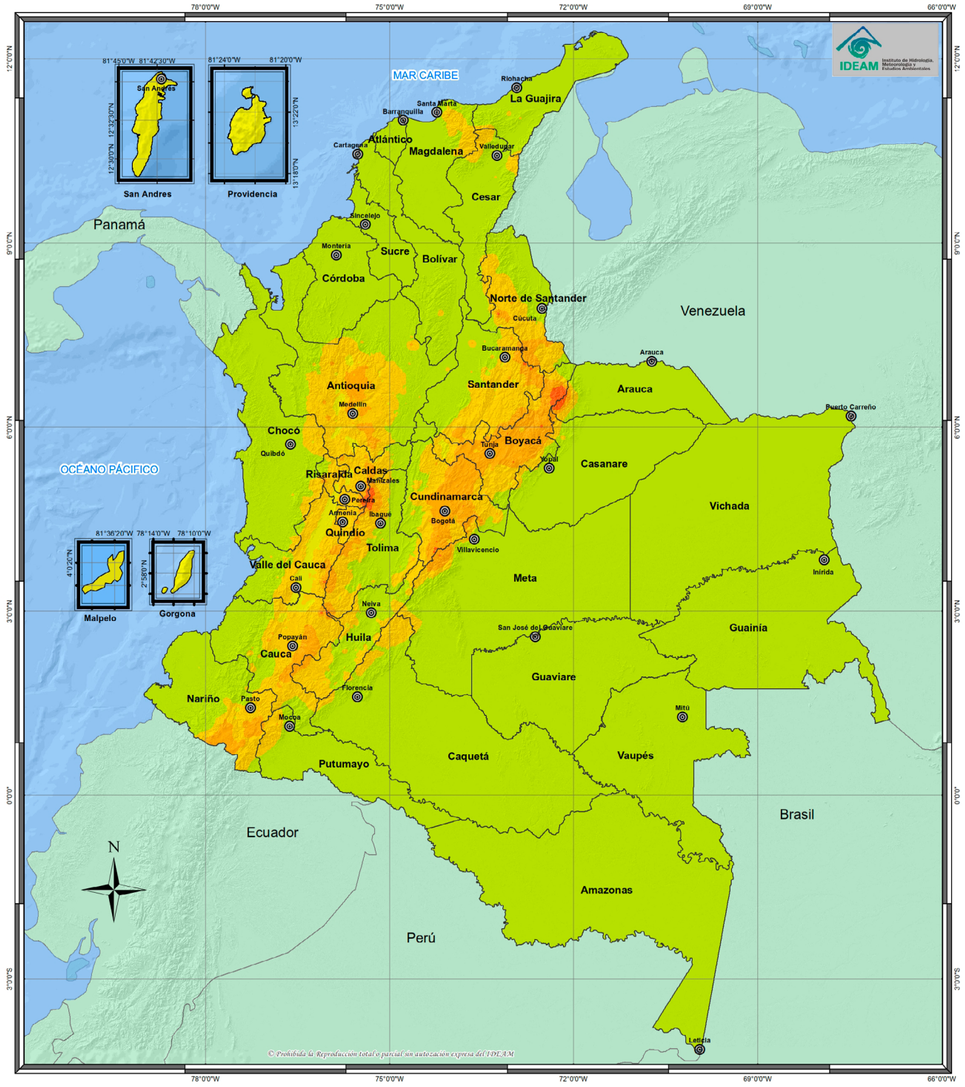
© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del IDEAM

Mapa 33. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en junio.



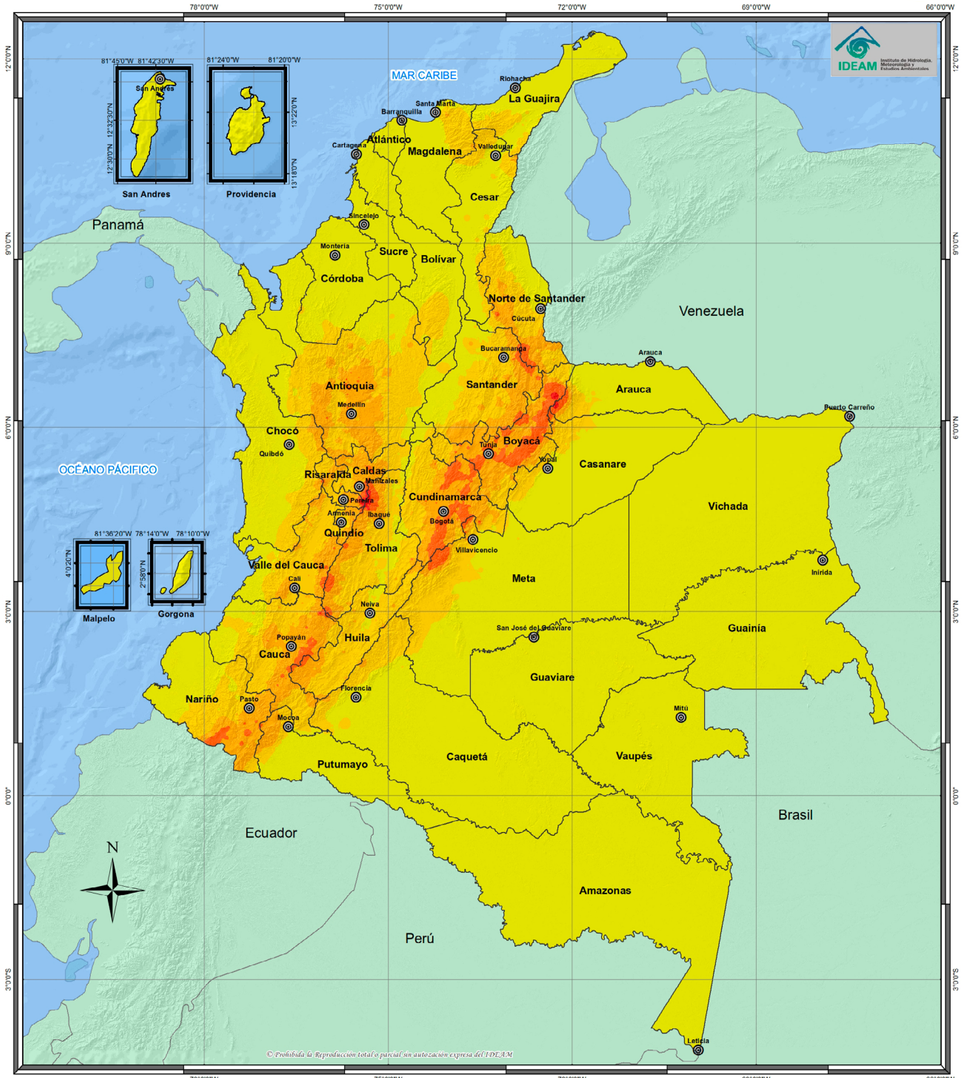


Mapa 34. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en julio.





Mapa 35. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en agosto



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO AGOSTO REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

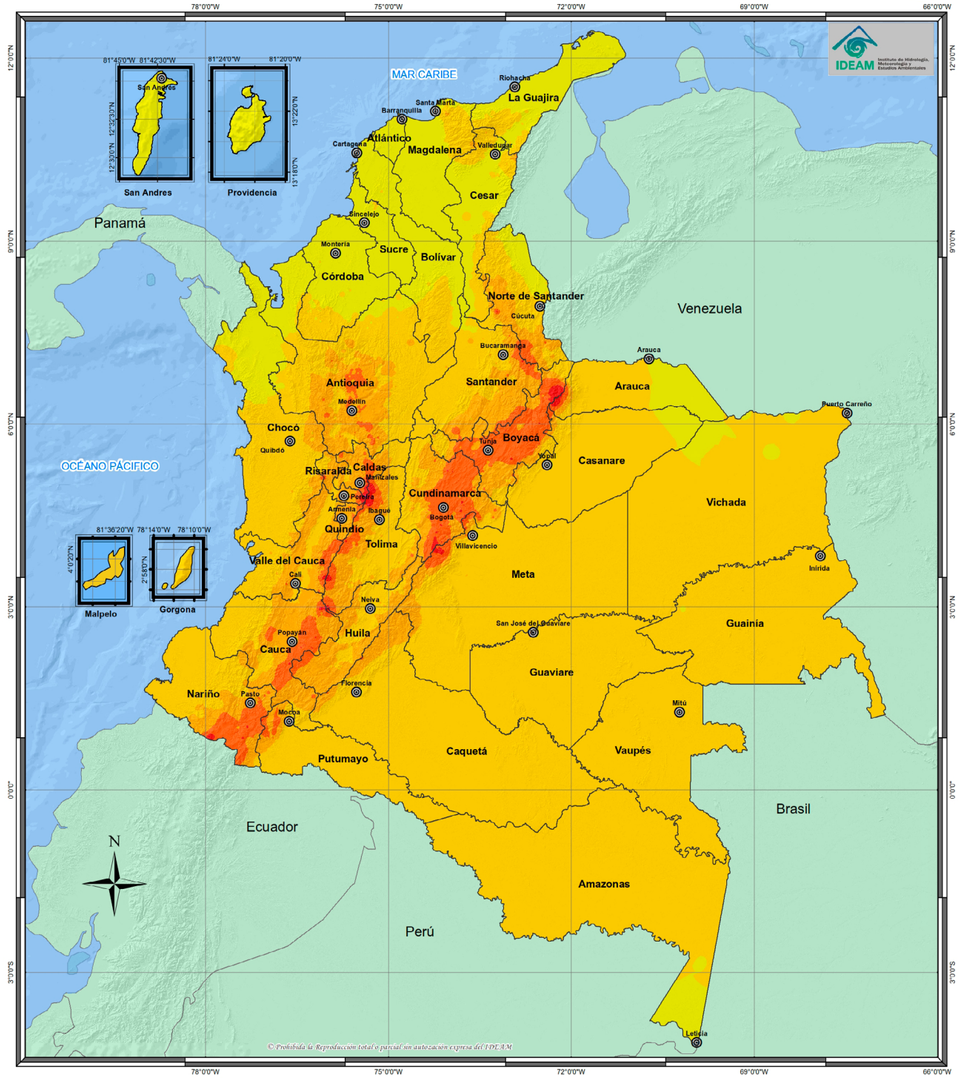
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 36. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en septiembre.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO SEPTIEMBRE REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

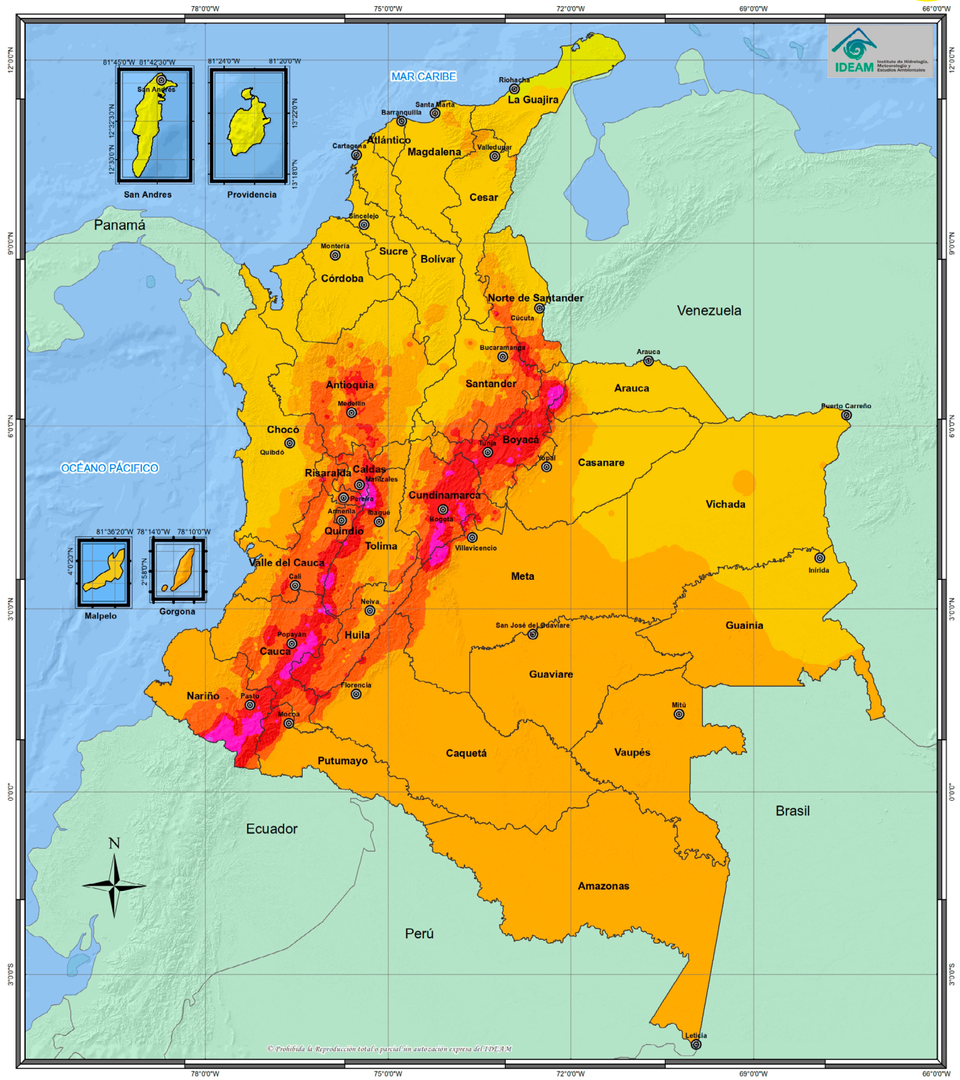
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 37. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en octubre.



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO OCTUBRE REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

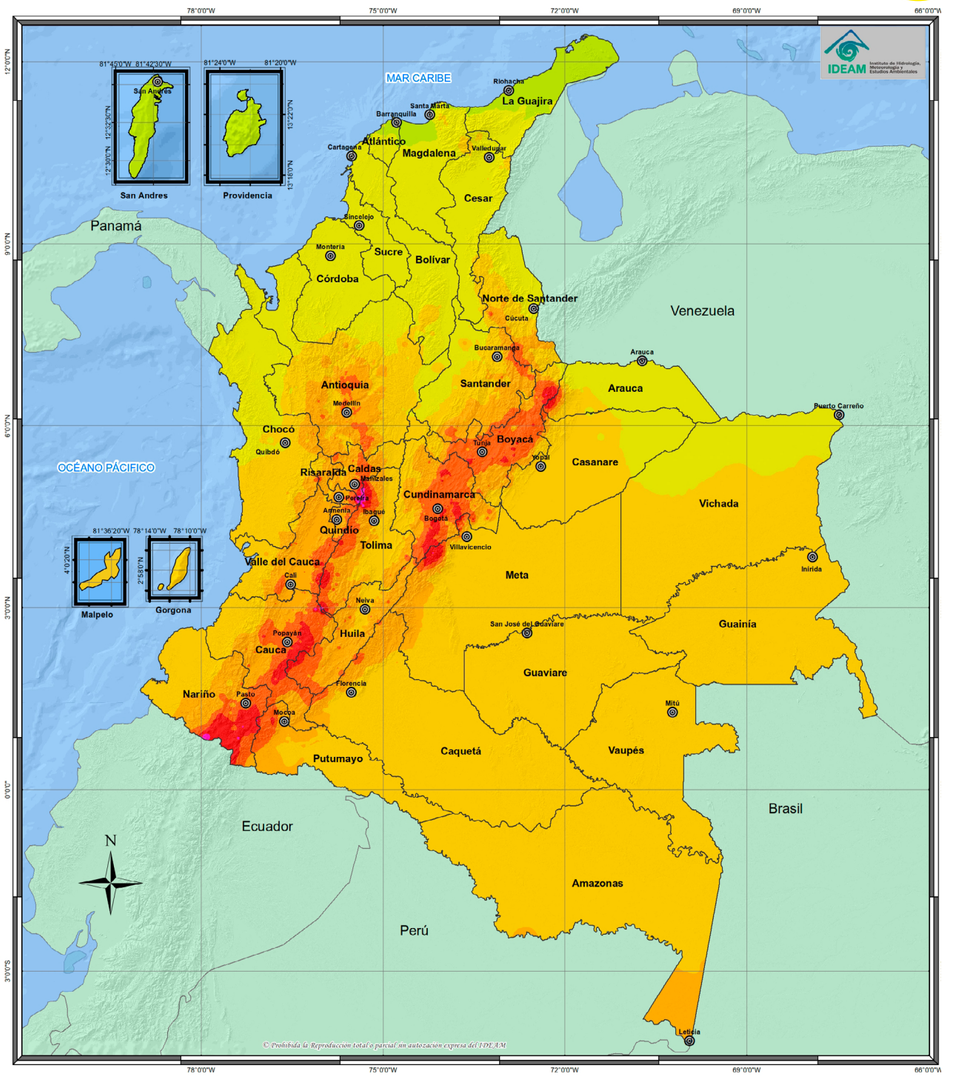
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 38. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en noviembre.



Leyenda y Convenciones

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO NOVIEMBRE REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones

- Ciudades Principales

Límites

- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATÚM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

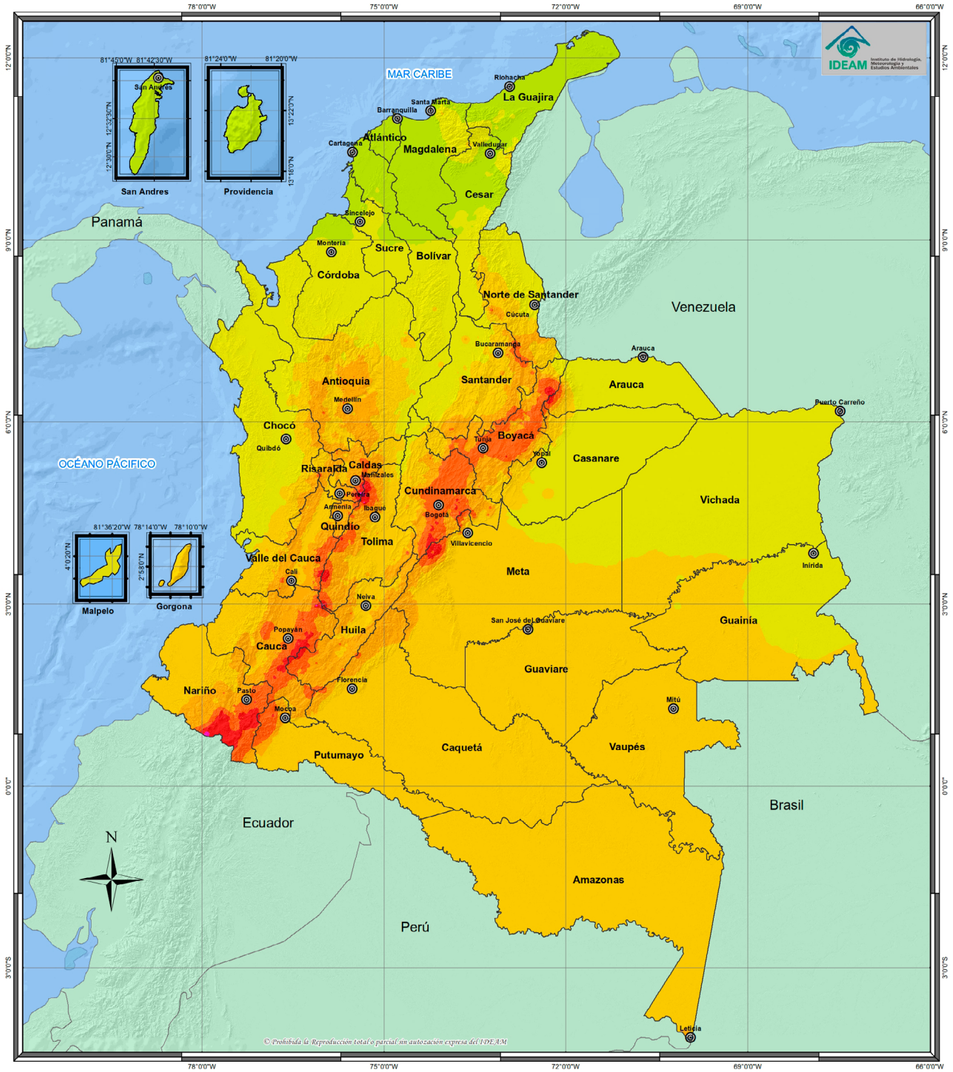
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 39. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en diciembre.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO DICIEMBRE REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda y Convenciones

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

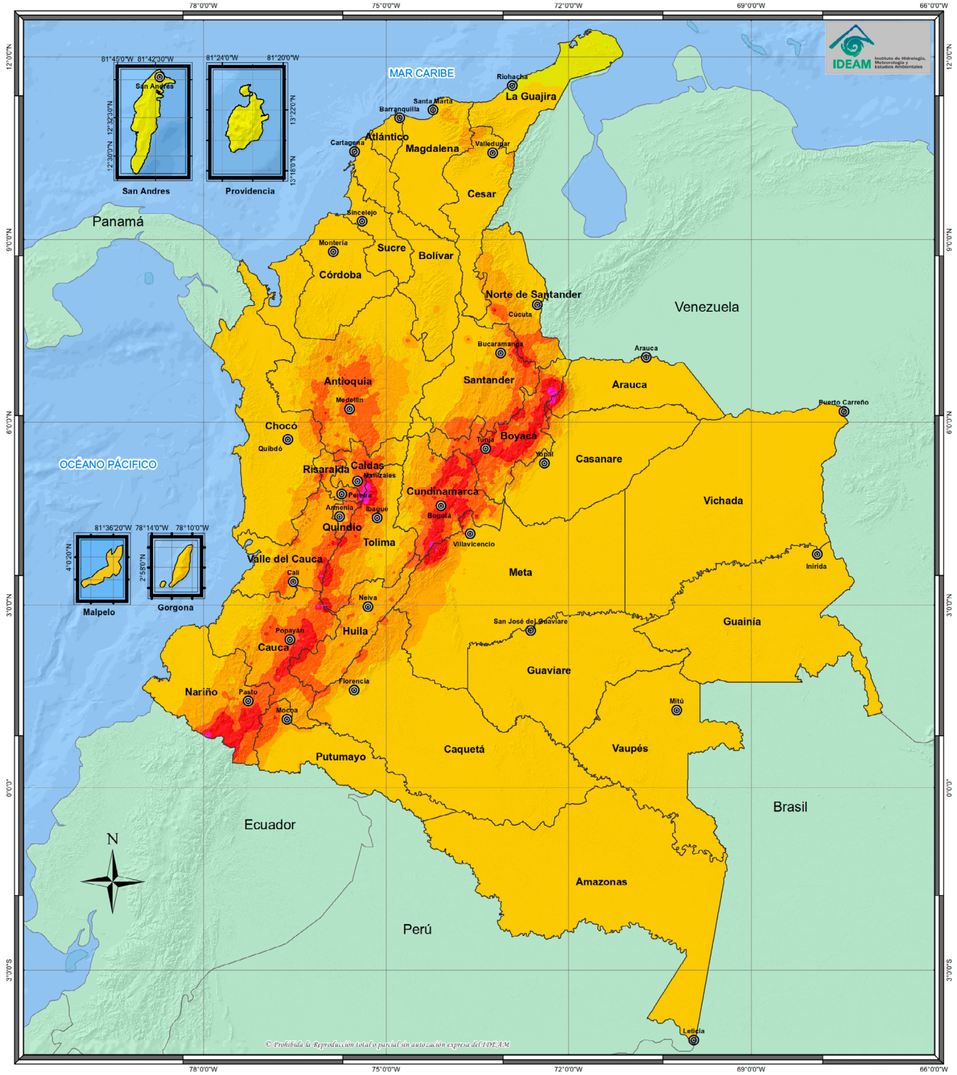
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 40. Distribución media anual del máximo valor diario del índice ultravioleta



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN DEL ÍNDICE ULTRAVIOLETA MÁXIMO DIARIO ANUAL REPÚBLICA DE COLOMBIA

2014

Leyenda y Convenciones

Leyenda
Índice ultravioleta (IUV)

- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 11
- 11 - 12
- 12 - 13
- 13 - 14
- 14 - 15

Convenciones
- Ciudades Principales

Límites
- Límite Departamental
- Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46,3215" Lat.Norte 77° 04' 39,0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:600.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González Gómez
Ingeniera Geógrafa

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

6

EL OZONO TOTAL EN COLOMBIA

Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá

6.1 PROGRAMA NACIONAL DE MEDICIÓN

El IDEAM realiza el seguimiento del ozono en el país por medio de las siguientes mediciones:

- El perfil vertical del ozono, utilizando ozonosondas que miden las concentraciones de ozono en función de la altura o la presión.
- El seguimiento satelital del ozono total, expresado en la cantidad total de ozono contenido en la columna vertical de la atmósfera sobre la superficie de la Tierra.

6.1.1 Medición del perfil vertical del ozono

El IDEAM comenzó a realizar mediciones de la columna vertical de ozono desde noviembre de 1998 en la estación meteorológica del aeropuerto de Eldorado en Bogotá, la cual se localiza en:

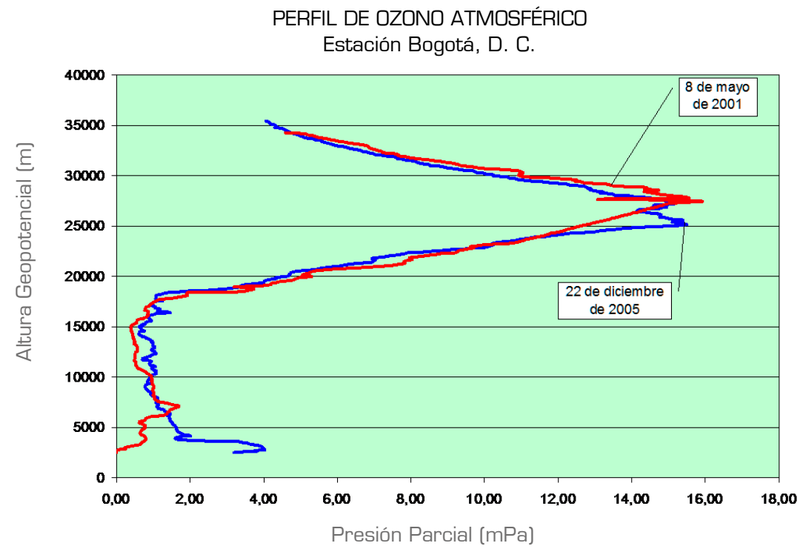
Estación	*Latitud*	*Longitud*	*Altura*
Bogotá	04° 43° N	74° 03° W	2546 m

Las observaciones de ozono en superficie y altura se efectúan mediante el ozonosonda; este es un analizador de ozono acoplado a una radiosonda para medir la concentración del ozono en función de la altura mediante el muestreo del aire mientras asciende el globo, el cual puede llegar hasta altitudes de 30 o 40 km (ver Figura 62). La señal del analizador de ozono es enviada a la radiosonda y transmitida telemétricamente por esta a la estación terrena, al igual que los valores en altura de otras variables meteorológicas como la temperatura, humedad, dirección y velocidad de los vientos y la presión, cuyos sensores están incorporados en la radiosonda.

El ozono es muestreado continuamente durante el ascenso del globo (ver Figura 63) y se obtienen perfiles de ozono a partir de la superficie de la Tierra. El sensor de ozono usado en el programa de mediciones en Colombia corresponde a la categoría de Celdas de Concentración Electroquímicas (ECC), producido por Vaisala (denominada

Figura 62. Ozonosondeos de Bogotá que han alcanzado mayor altura: el realizado el 22 de diciembre de 2005 con 35424 m (azul) y el del 8 de mayo de 2001 con 34247 m (rojo).

Fuente: IDEAM, 2010.



ozonosonda OES - Model 6ª ECC), este es un analizador que utiliza yoduro de potasio, que al reaccionar con el O_3 produce yodo libre. En efecto, cada molécula de ozono introducida dentro de la celda produce dos electrones. El aire tomado como muestra es bombeado a través de la solución en la celda de reacción y la señal de salida es proporcional al número de moléculas de ozono (definida por la cantidad de electrones producida) presentes en la muestra de aire. Con una conversión apropiada, la medida de ozono es determinada en unidades de presión parcial de ozono. Si la ozonosonda supera los 28 km de altura, se puede determinar el ozono total en Unidades Dobson, calculado como la suma del ozono residual más el ozono medido.

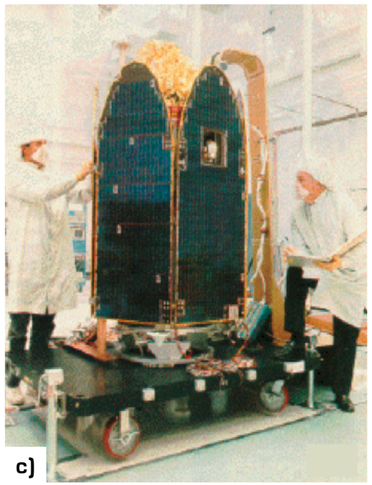
Fuente: IDEAM, 2010 en figuras a) y b) y la NASA en figuras c) y d)

Figura 63. Equipos empleados en la medición del perfil de ozono y del ozono total.


a)


b)

a. Sensor de ozono (frente) y equipo calibrador (al fondo)
b. Ozonosonda


c)


d)

c) Satélite Earth Probe portador del sensor TOMS.
d) Satélite AURA portador del sensor OMI

El ozono residual es una estimación del ozono que no fue alcanzado a medir por la ozonosonda ya que se encuentra en la capa de la atmósfera superior al nivel en donde el equipo dejó de enviar información; mientras tanto, el ozono medido es el correspondiente al ozono agregado en la columna de la atmósfera analizada.

Los ozonosondeos se realizan en Bogotá una vez al mes y sus valores, hasta el momento, se han presentado dentro de lo normal (alrededor de 250 UD).

El Anexo 9 presenta un resumen del análisis de variables en altura utilizando los ozonosondeos realizados en Bogotá.

6.1.2 Seguimiento del ozono total en Colombia

De igual manera, el IDEAM realiza el seguimiento del ozono total en todo el territorio nacional por medio de medidas satelitales, las cuales no muestran ningún adelgazamiento de la capa de ozono en esta zona tropical.

Las mediciones de ozono a partir de espectrómetros portados por los satélites, como los de la Figura 63, son usuales hoy en día, ya que permiten una visión global de la distribución de la columna de ozono. Estas mediciones fueron posibles desde finales de 1978, fecha en la cual entró en operación el satélite Nimbus-7. Este satélite estaba dotado de un instrumento para la medida del ozono: el espectrofotómetro para el mapeo del Ozono Total (Total Ozone Mapping Spectrometer - TOMS), el cual midió la distribución global del ozono total. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites como el Meteor-3, en 1991, el Earth Probe, en 1996 (con datos disponibles desde el 22 de julio de 1996 hasta el 14 de diciembre de 2005) y el Aura, que porta el Instrumento para el Monitoreo del Ozono (OMI - Ozone Monitoring Instrument), en operación. La misión Aura investiga la composición química y dinámica de la atmósfera de la Tierra, así como el ozono, la calidad del aire y el clima.

Los instrumentos TOMS y OMI miden la cantidad total de la columna de ozono, desde la superficie hasta el tope de la atmósfera, bajo cualquier condición geofísica y hora del día.

Las observaciones del TOMS se efectúan en el espectro electromagnético cercano a la región del ultravioleta, en donde la luz solar es parcialmente absorbida por el ozono. La precisión del TOMS es estimada en ± 5%, con una resolución espacial de 1°X1.25° latitud/longitud. También realizaba 35 medidas cada 8 segundos con cubrimiento de 50 a 200 kilómetros de ancho sobre la Tierra, a lo largo de una línea perpendicular al movimiento del satélite. Casi 200.000 medidas diarias cubren cada punto de la Tierra, excepto las áreas cercanas a los polos en donde el Sol permanece por debajo del horizonte durante 24 horas.

El instrumento OMI puede medir los parámetros que proporcionan los datos para derivar el ozono troposférico. El OMI ha continuado el registro del sensor TOMS para el ozono total y otros parámetros atmosféricos relacionados con la química del ozono y el clima. El instrumento emplea un sistema hiperespectral que mejorará la certeza y la precisión de las cantidades totales de ozono.

6.2 UNIDADES DE MEDIDA

Las medidas más usuales del ozono son **el ozono total**, este expresa la cantidad total de ozono contenido en la columna vertical de la atmósfera sobre la superficie de la Tierra y el **perfil vertical del ozono** que indica las concentraciones de este gas en función de la altura o la presión. La medida del ozono total se expresa en términos de Unidades Dobson (UD), correspondientes a una concentración atmosférica media, de aproximadamente, una parte por billón en volumen (1 ppbv). Los valores de ozono total, a nivel global, oscilan entre 200 a 500 UD, con un valor medio mundial de 300 UD. El perfil vertical del ozono se determina en diferentes niveles de altura y se mide como la presión parcial ejercida por el ozono. La unidad más usual es el milipascal.

La cantidad de ozono presente en la atmósfera es muy pequeña. Si todo el ozono que rodea la Tierra fuera comprimido al nivel del mar (1013,25 hPa o 1 atm) y a 0 °C (273 K), es decir, en condiciones normales de temperatura y presión, dicha capa de ozono puro tendría aproximadamente 3 mm de espesor y sería equivalente a 300 UD.

6.3 MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO

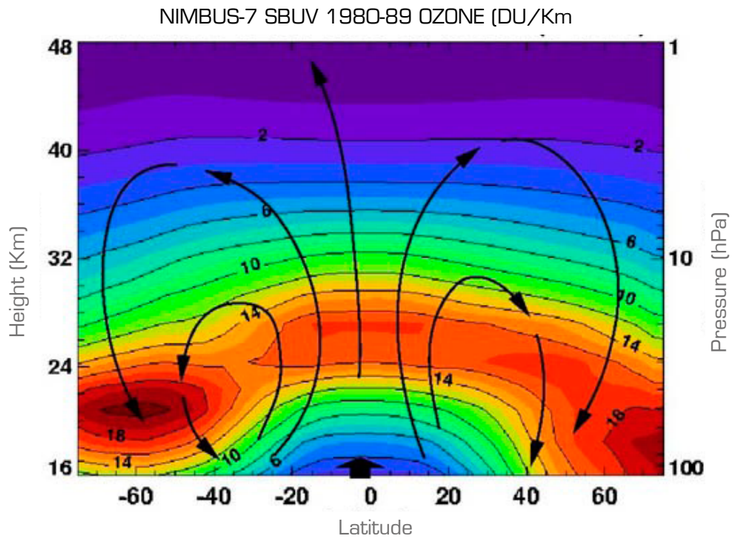
6.3.1 Distribución global del ozono

La cantidad de ozono total sobre la superficie de la Tierra varía espacial y temporalmente a lo largo del globo. En la ausencia de cualquier otro factor, se podría esperar que el total de los niveles de ozono fuera más alto sobre los trópicos que en las regiones polares, debido a que es mayor la intensidad de la radiación solar ultravioleta en las regiones ecuatoriales, lo cual contribuiría a la generación de mayor cantidad de ozono. Sin embargo, la distribución real del ozono no es un simple balance entre la producción y la pérdida. Los vientos estratosféricos transportan el ozono fuera de la región de producción, alterando de esta manera la distribución básica del ozono, **por esta razón, en los trópicos no se encuentran los mayores valores en la columna total de ozono**.

El ozono total tiene una gran variación con la latitud, es mayor en las latitudes medias y altas (cerca de los polos) que en la zona tropical, debido a que la circulación estratosférica, conocida como la circulación Brewer-Dobson, transporta el ozono producido en el trópico desde los niveles bajos de la estratosfera hasta los niveles altos, en donde las corrientes se bifurcan hacia los polos y el ozono es conducido hacia las altas latitudes, posteriormente, es transportado a los niveles bajos de la estratosfera, de esta manera es depositado en la baja estratosfera de las latitudes altas y medias. Aproximadamente de 4 a 5 meses, es el tiempo que demora una parcela de aire en ser transportada a través de la circulación Brewer-Dobson, a partir del nivel de la tropopausa, situado entre los 16 y 18 km de altitud. En la Figura 64 se observa el diagrama esquemático del modelo de flujo que constituye la circulación Brewer-Dobson (las flechas negras representan el campo medio estratosférico de circulación del aire).

Figura 64. Medida del número de densidad del ozono, en Unidades Dobson por kilómetro, a partir de medidas SBUV y diagrama esquemático de la circulación Brewer-Dobson.

Fuente: GSFC-NASA.

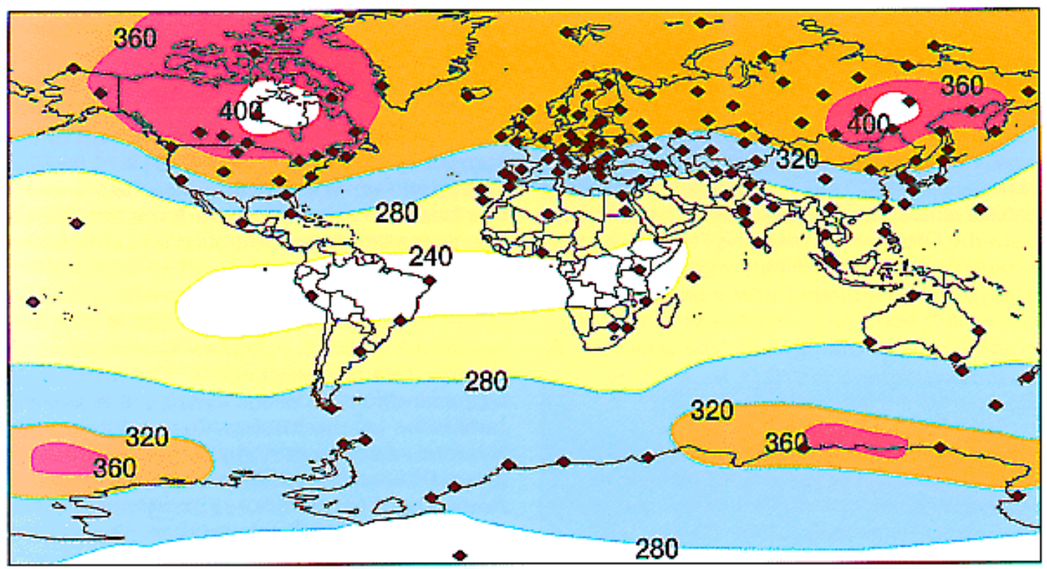


La variación altitudinal del ozono también es un resultado de la lenta circulación que eleva el ozono desde la troposfera hasta la estratosfera. El aire troposférico pobre en ozono es enriquecido en la estratosfera mediante el proceso fotolítico de las moléculas de oxígeno, el cual es favorecido por la radiación solar. Como este aire asciende lentamente en los trópicos, progresivamente, va ganando ozono.

Respecto a la variación espacial del ozono total a nivel global, es posible notar en la Figura 65 zonas en el hemisferio norte con alto contenido de ozono sobre Norteamérica y Asia, así como en el hemisferio sur sobre el sur del Océano Índico y el sureste del Océano Pacífico, con valores superiores a 350 Unidades Dobson (UD unidad de medida para determinar la cantidad de ozono en toda la columna atmosférica). También se destacan dos zonas con menor contenido de ozono total: una ubicada sobre la Antártida, y otra, **en la zona tropical sobre el norte y centro de Suramérica, la región oriental de la cuenca ecuatorial del Océano Pacífico Tropical, el Atlántico tropical y el África central registran valores por debajo de 240 UD.**

Fuente: ESRL-NOAA.

Figura 65. Distribución media del ozono total, en unidades Dobson (o miliatmósferas) contenido en una columna de aire de 1 cm^2 de sección que va desde la superficie de la Tierra hasta el tope de la atmósfera.





Colombia, por estar incluida en la zona con menor contenido de ozono total a nivel mundial, está expuesta a altos niveles de radiación ultravioleta en superficie durante todo el año.

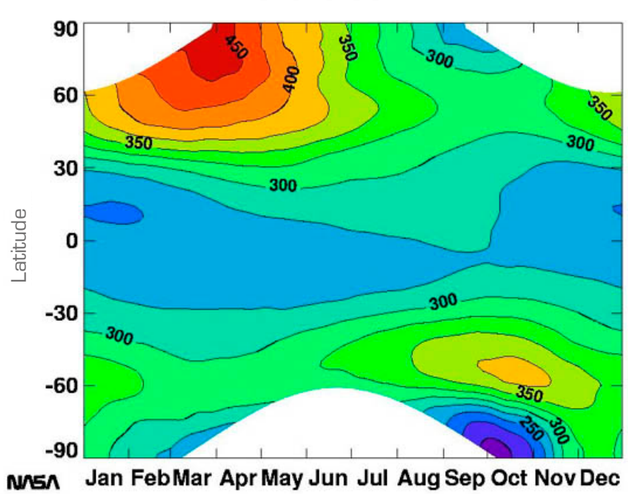
Debido a la estacionalidad de la circulación Brewer-Dobson, la cual es máxima en invierno y primavera, el ozono total presenta también una variación temporal. Además, como es característico en las ondas planetarias, estas son más fuertes y más variables en el hemisferio norte que en el sur, debido a aspectos relacionados con la distribución asimétrica de la superficie como son la topografía y la relación de áreas Tierra-océano (ver figuras 65 y 66). Como resultado, los valores más altos del ozono total a nivel global se registran sobre el Ártico entre febrero y abril (primavera del hemisferio norte) con cifras superiores a 400 UD, mientras que en la Antártida, durante la primavera del hemisferio sur, entre septiembre y octubre, se registran los valores más bajos a nivel global, inferiores a 220 UD, formándose el agujero en la capa de ozono.

En las latitudes medias del hemisferio norte, la columna de ozono es más alta en la primavera, entre abril y mayo, de manera paulatina decrece y en otoño, aproximadamente en octubre, registra los valores más bajos. En las latitudes medias del hemisferio sur, la columna de ozono tiene el mismo comportamiento estacional: durante el otoño (de marzo a mayo) con los valores más bajos y en primavera (septiembre a noviembre), los más altos.

En los trópicos, a lo largo del año, se presentan bajos valores en el ozono total debido a la circulación de vientos en la estratósfera mencionada anteriormente, a pesar de ser la zona de mayor producción, ya que, es donde hay mayor incidencia de radiación UV durante el año. En la Figura 66, se observa que en la franja tropical los valores son bajos en diciembre, enero y febrero y los más altos entre agosto y octubre.

Fuente: NASA.

Figura 66. Promedio global del ozono total obtenido a partir de datos TOMS. Periodo 1979-1992.



6.3.2 Distribución espacial y temporal del ozono total en Colombia

a) Análisis promedio anual

En Colombia el promedio anual de la columna total de ozono varía entre 253 y 265 UD (ver mapa 53), caracterizándose porque la columna se hace más pequeña a lo largo de las tres cordilleras; en esta zona se presentan los promedios más bajos, debido a que la columna atmosférica es más delgada, mientras que latitudinalmente los promedios más altos están en la región Caribe y los más bajos en el sur del país, específicamente en el suroccidente. **Las zonas con los promedios más bajos son el suroriente del Tolima, el centro y sur del Huila, oriente del Cauca y Nariño, occidente de Caquetá y Putumayo, centro de Boyacá y suroriente de Santander.**

Los promedios fueron obtenidos a partir de mediciones satelitales durante el periodo 1978-2016. Estas mediciones fueron posibles desde finales de 1978, fecha en la cual entró en operación el satélite Nimbus-7. Este satélite estaba dotado de un instrumento para la medida del ozono - TOMS, el cual midió la distribución global del ozono total. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites, como el Meteor-3, lanzado en 1991, el Earth Probe en 1996 y el AURA que porta el Instrumento para el Monitoreo del Ozono (OMI - Ozone Monitoring Instrument), el cual se encuentra en operación. Los instrumentos TOMS y OMI han podido medir la cantidad total de la columna de ozono, desde la superficie hasta el tope de la atmósfera, bajo cualquier condición geofísica y hora del día. El Anexo 7 presenta con mayor detalle el procedimiento para realizar los mapas de la columna total de ozono.

b) Análisis espacio temporal a lo largo del año

Los mapas 41 al 52 registran la distribución media de la columna de ozono a lo largo del año en el país, durante el periodo 1978-2016, obtenidos con información satelital. El Anexo 7 presenta la metodología empleada para realizar los mapas de los promedios mensuales y el anual multianual de la columna de ozono.

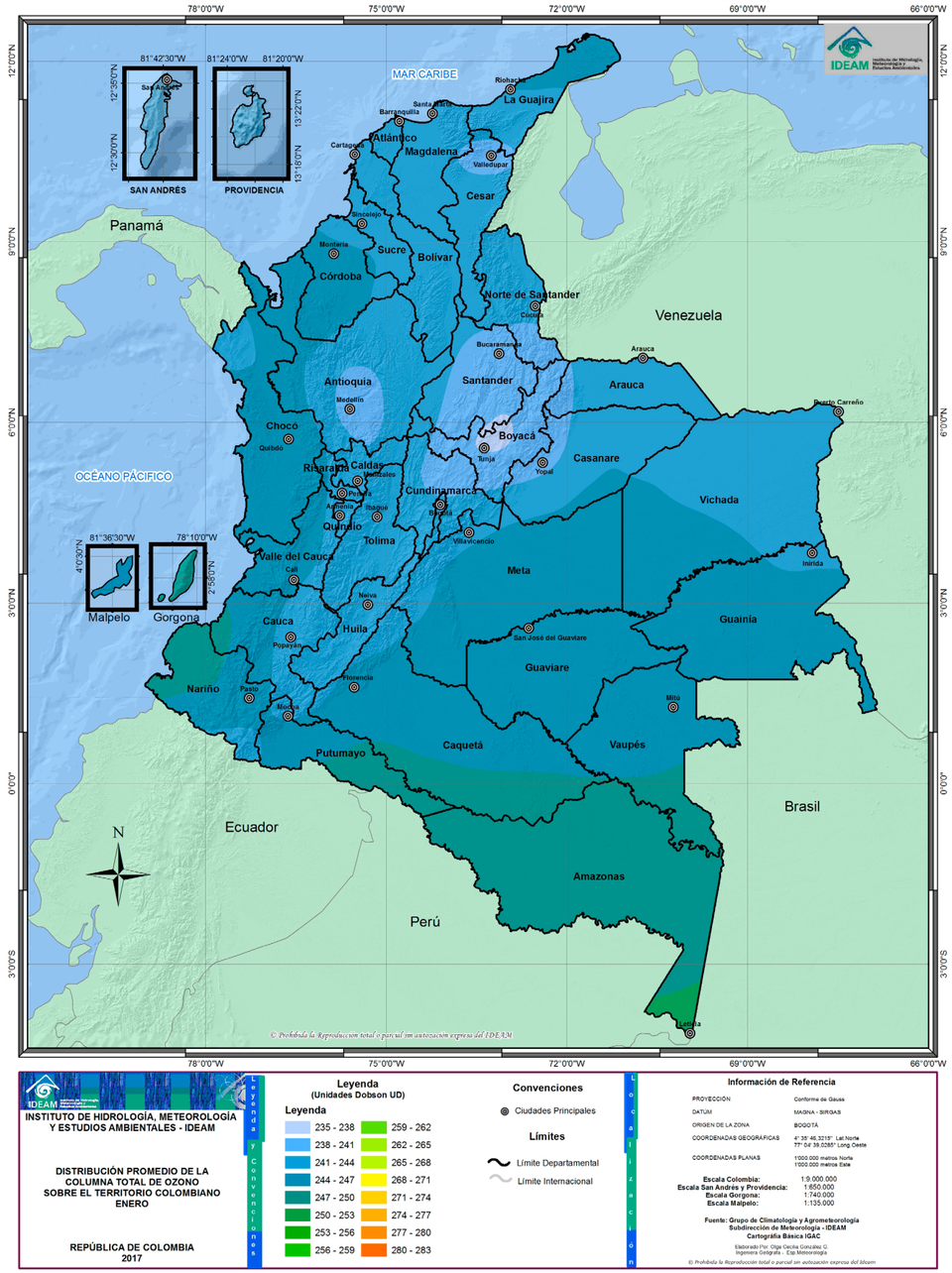
En concordancia con la distribución espacio-temporal a nivel global del ozono total, comentada en la sección anterior, en los mapas de la distribución de la columna de ozono a lo largo del año en el país, se observa que en enero la columna de ozono presenta los valores más bajos del año; el norte de la región Andina registra los menores niveles de ozono, con valores por debajo de 240 UD en sectores de Antioquia, Boyacá, santanderes, Cundinamarca y el piedemonte llanero; a partir de esta área los valores de ozono crecen latitudinalmente hacia el norte y sur, siendo más acentuado este aumento en el sur del país. En Leticia la columna de ozono está entre 250 UD y 253 UD, en tanto que en amplios sectores de la región Caribe los valores se encuentran entre 241 UD y 247 UD. **En los mapas se observa que el periodo comprendido entre diciembre y marzo es el que presenta los menores niveles de ozono total en el país; por lo tanto, son los meses en los cuales gran parte del territorio nacional recibe mayores intensidades de radiación ultravioleta.**



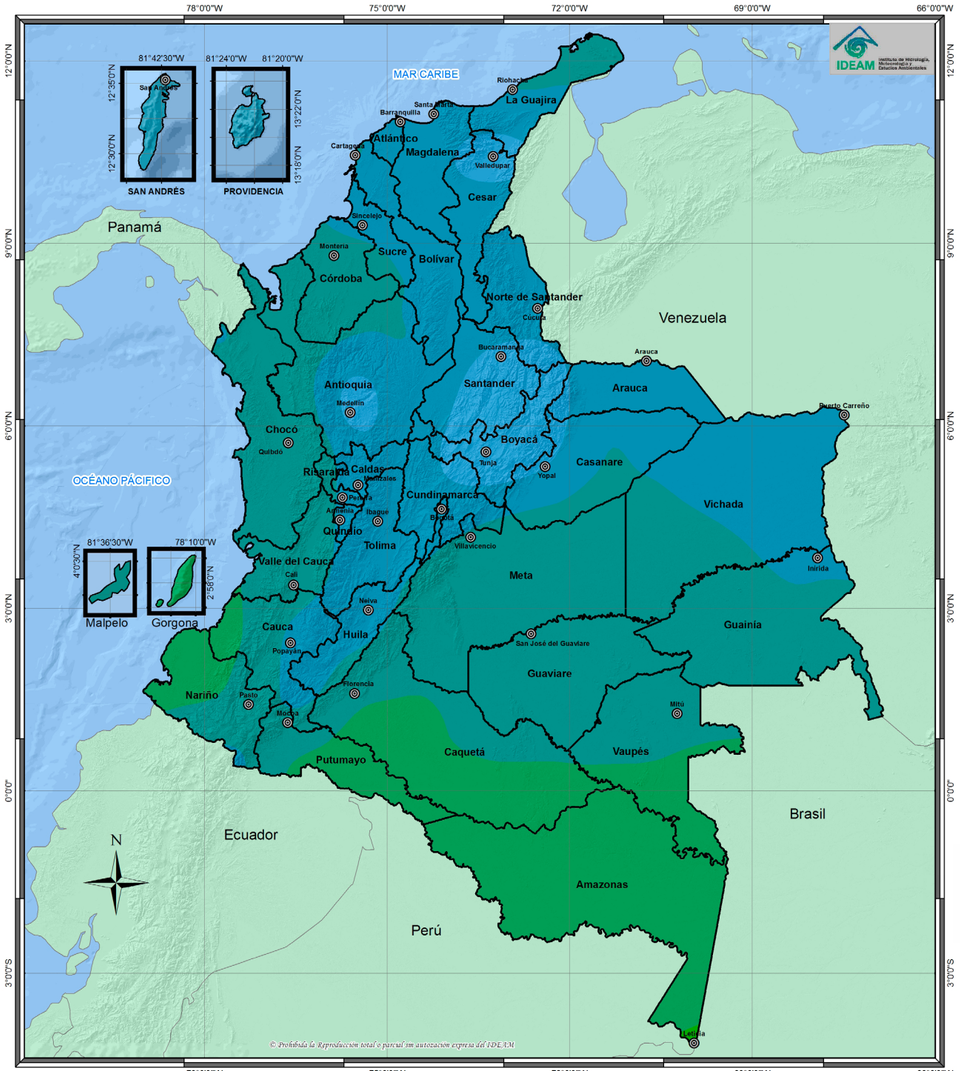
Entre febrero y agosto se presenta un aumento generalizado de la columna de ozono, además, se mantiene una distribución espacial similar, caracterizada porque en el norte del país el aumento es mayor que en el sur, con valores entre 277 a 283 UD en agosto, mientras que en el trapecio amazónico fluctúan entre 265 y 271 UD. Los valores más bajos, entre 262 y 265 UD, se registran en Nariño y Putumayo. En septiembre se observa un aumento de las concentraciones de ozono de 3 UD aproximadamente, más que en agosto sobre el sur del país, mientras que, en el norte el comportamiento es diferente, con disminuciones hasta de 6 U.D. En los meses siguientes la columna total de ozono presenta un descenso continuo en todo el territorio hasta enero.

En el anexo 8 se presenta la tabla con los promedios mensuales de la columna total de ozono en las principales ciudades del país, para el periodo 1978-2016, obtenidos con información satelital.

Mapa 41. Distribución promedio de la columna total de ozono en enero en Unidades Dobson.



Mapa 42. Distribución promedio de la columna total de ozono en febrero en Unidades Dobson.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO FEBRERO

REPÚBLICA DE COLOMBIA 2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda (Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones

Ciudades Principales

Límites

Límite Departamental

Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

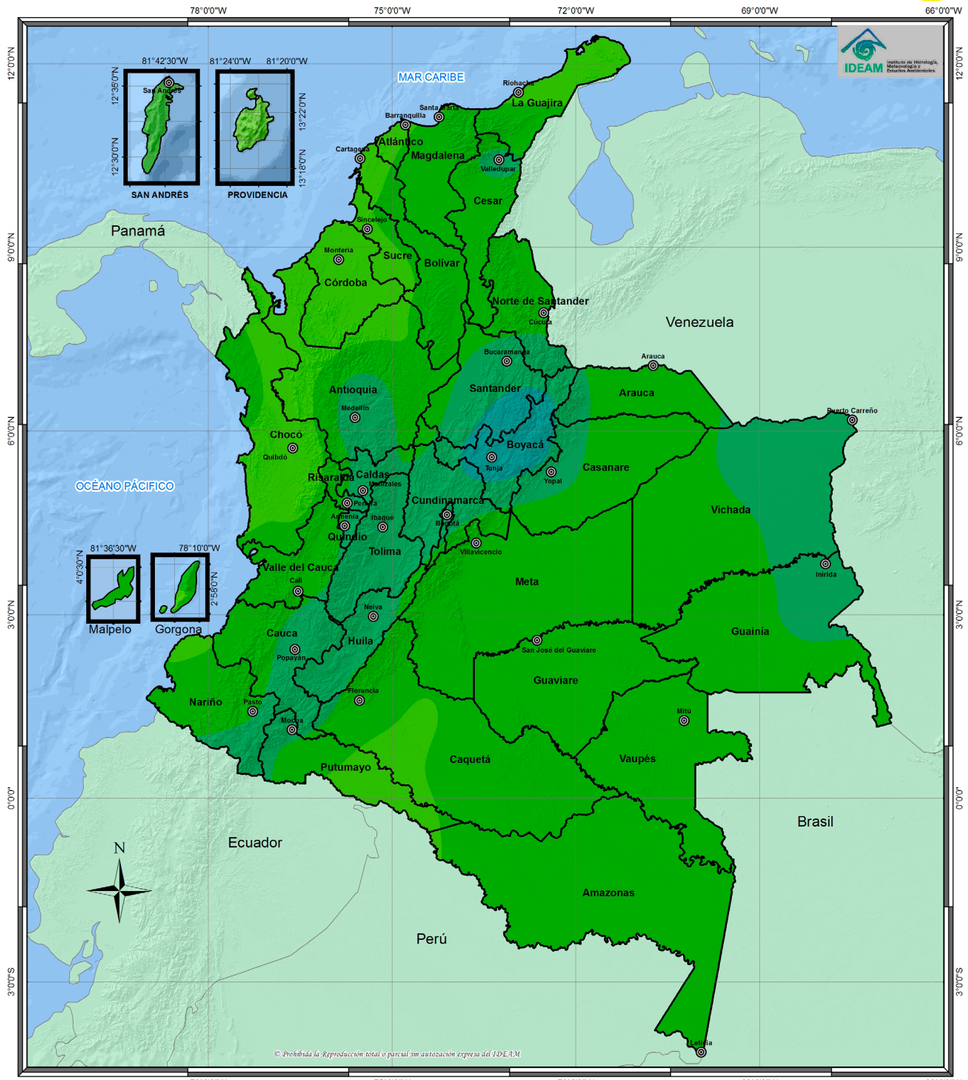
PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este
Escala Colombia:	1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia:	1:650.000
Escala Gorgona:	1:740.000
Escala Malpelo:	1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 43. Distribución promedio de la columna total de ozono en marzo en Unidades Dobson.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO MARZO

REPÚBLICA DE COLOMBIA 2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda (Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones

Ciudades Principales

Límites

Límite Departamental

Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

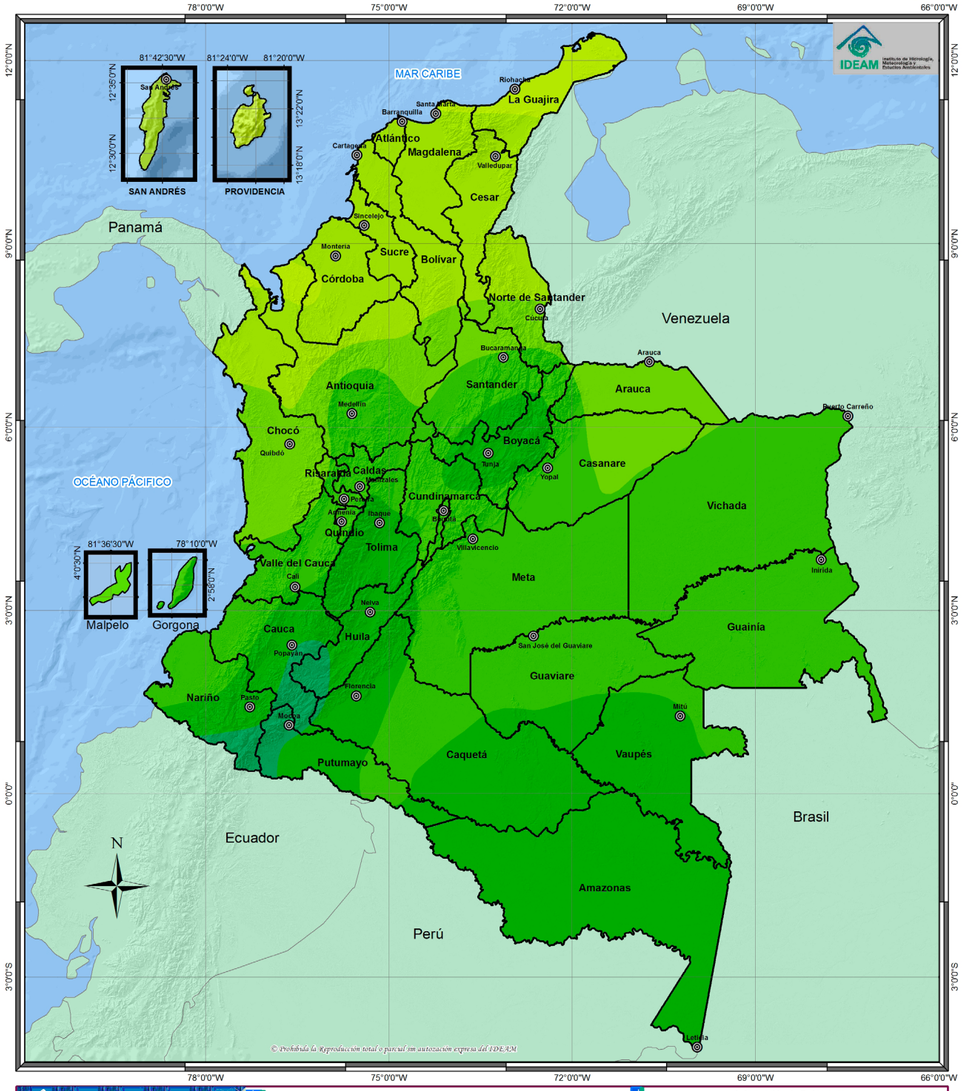
PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este
Escala Colombia:	1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia:	1:650.000
Escala Gorgona:	1:740.000
Escala Malpelo:	1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología - IDEAM Cartografía Básica IGAC

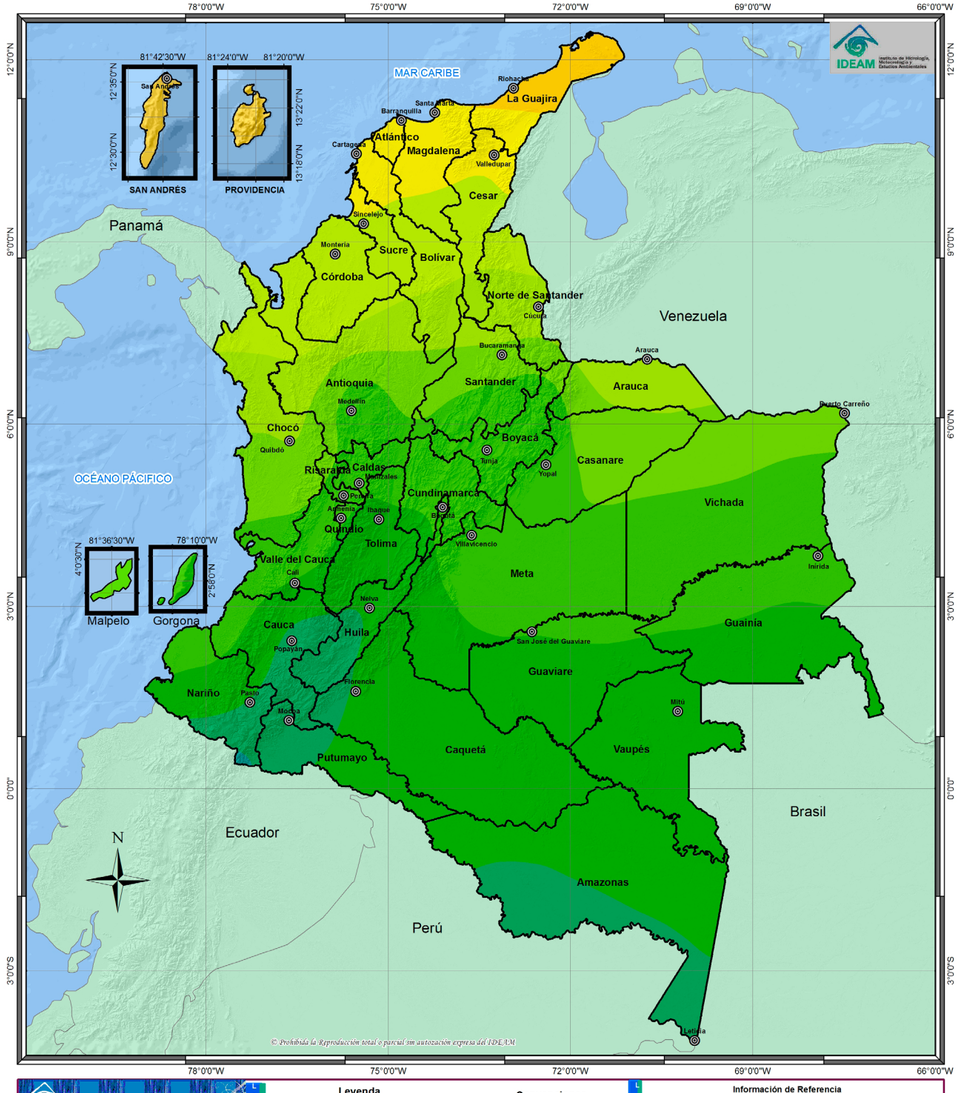
Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

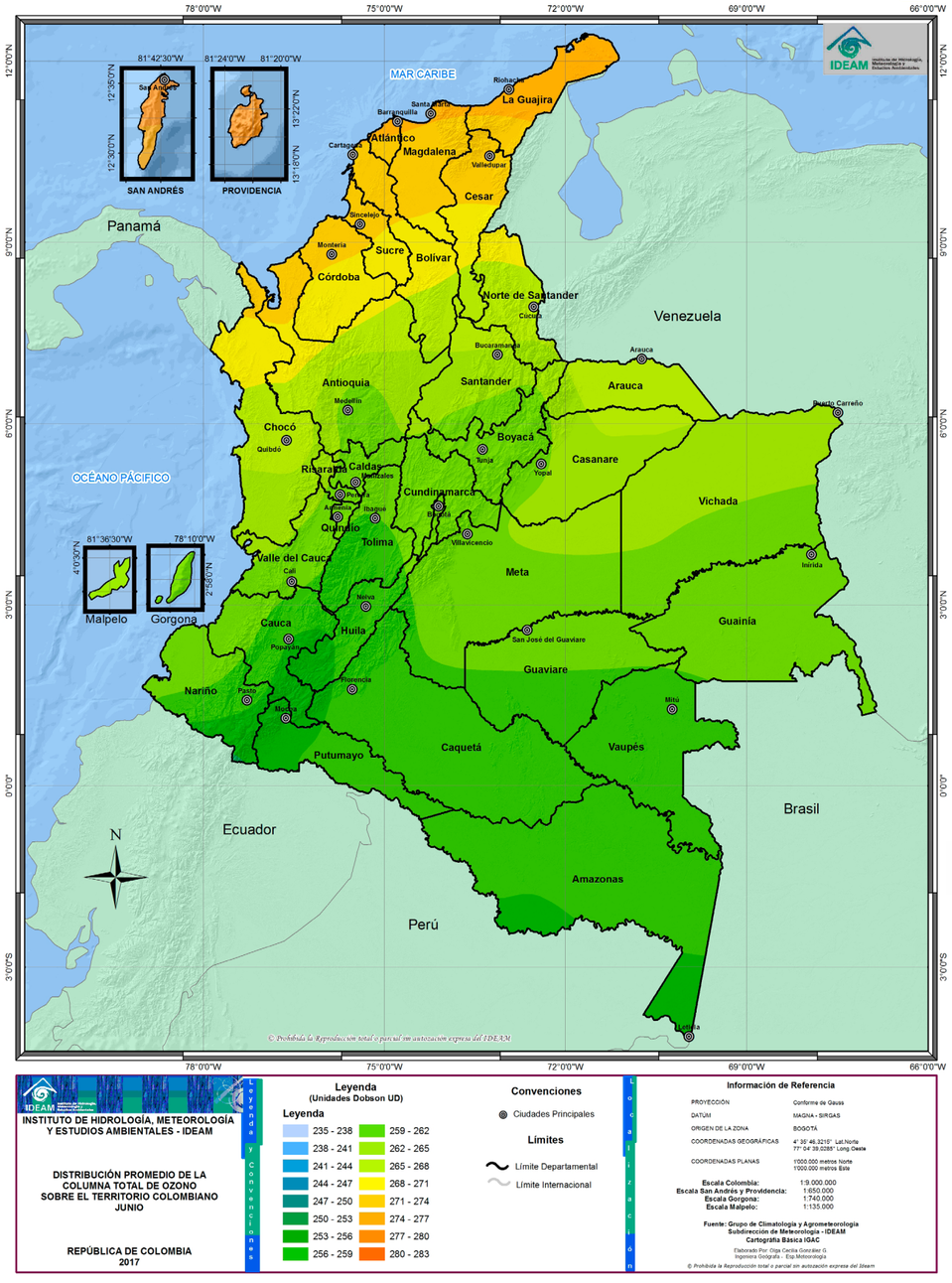
Mapa 44. Distribución promedio de la columna total de ozono en abril en Unidades Dobson.



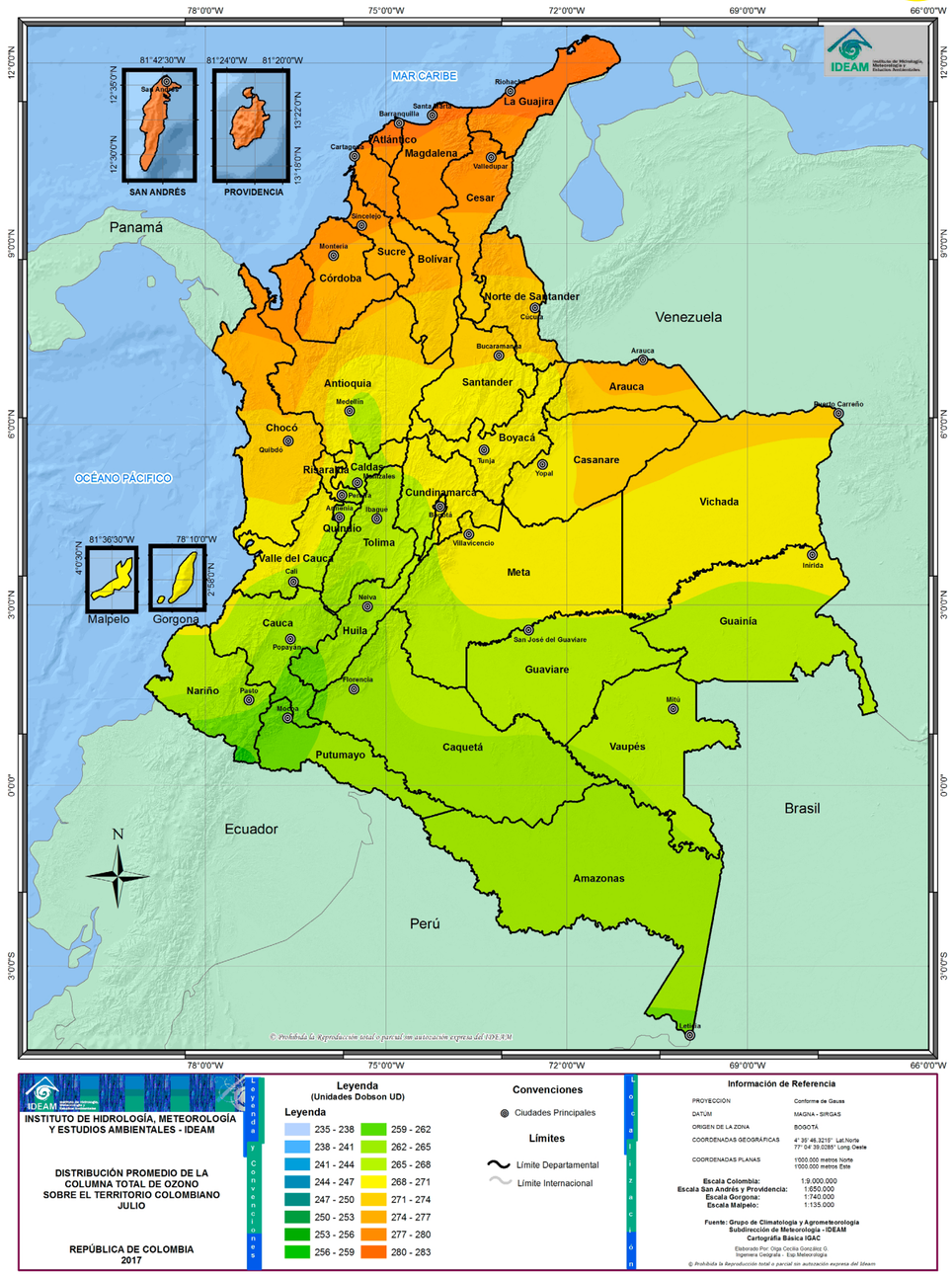
Mapa 45. Distribución promedio de la columna total de ozono en mayo en Unidades Dobson.



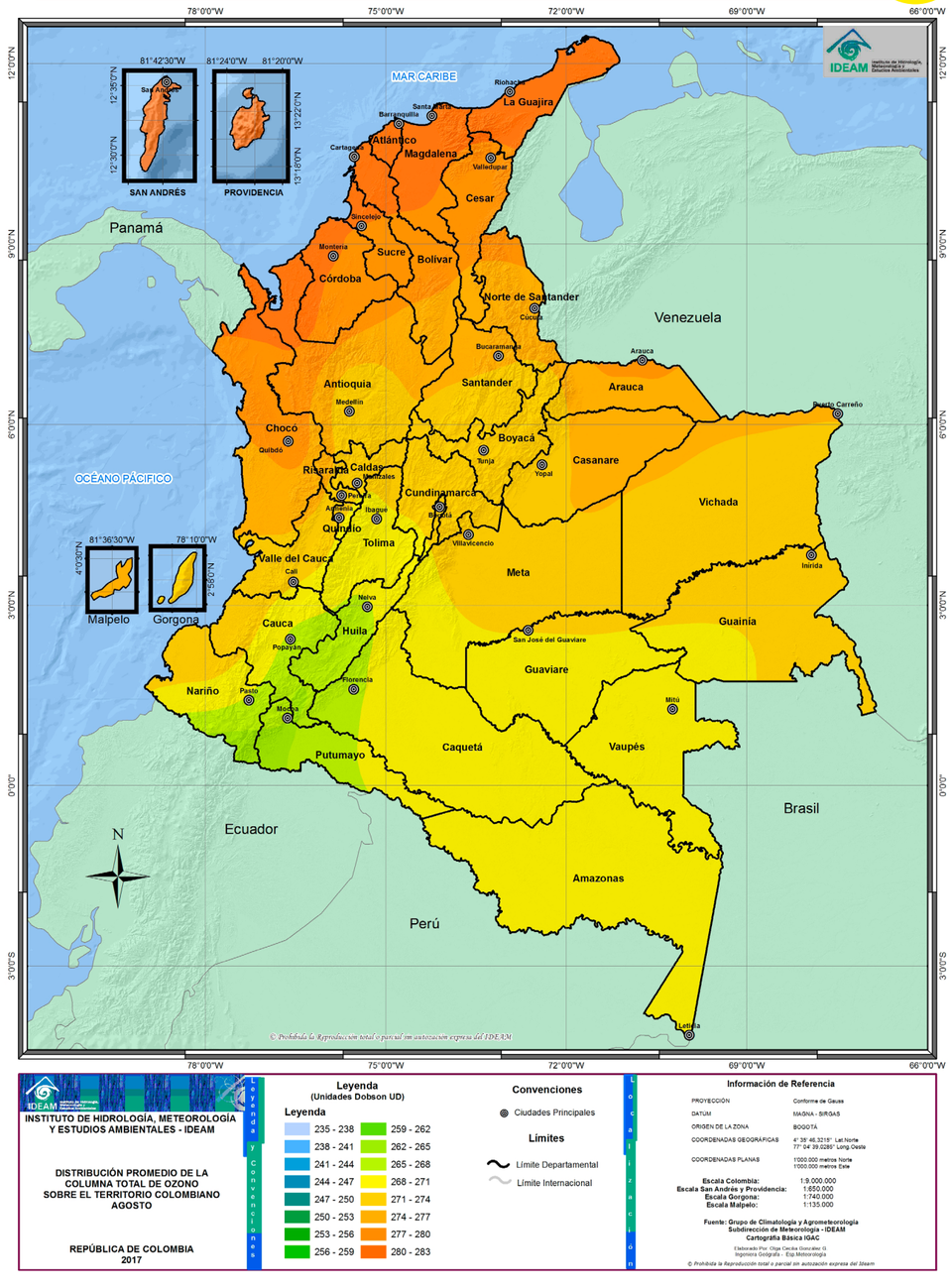
Mapa 46. Distribución promedio de la columna total de ozono en junio en Unidades Dobson.



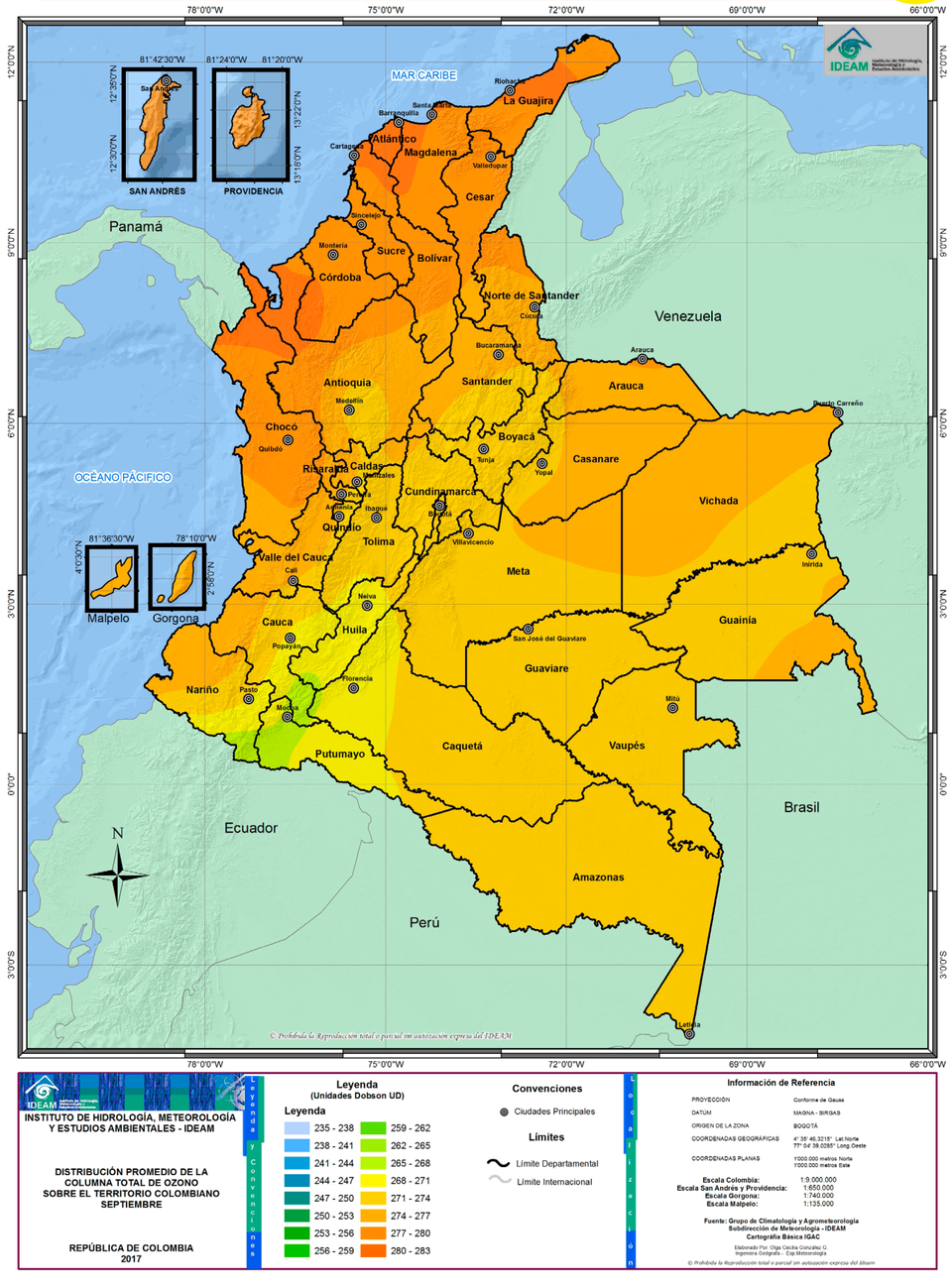
Mapa 47. Distribución promedio de la columna total de ozono en julio en Unidades Dobson.



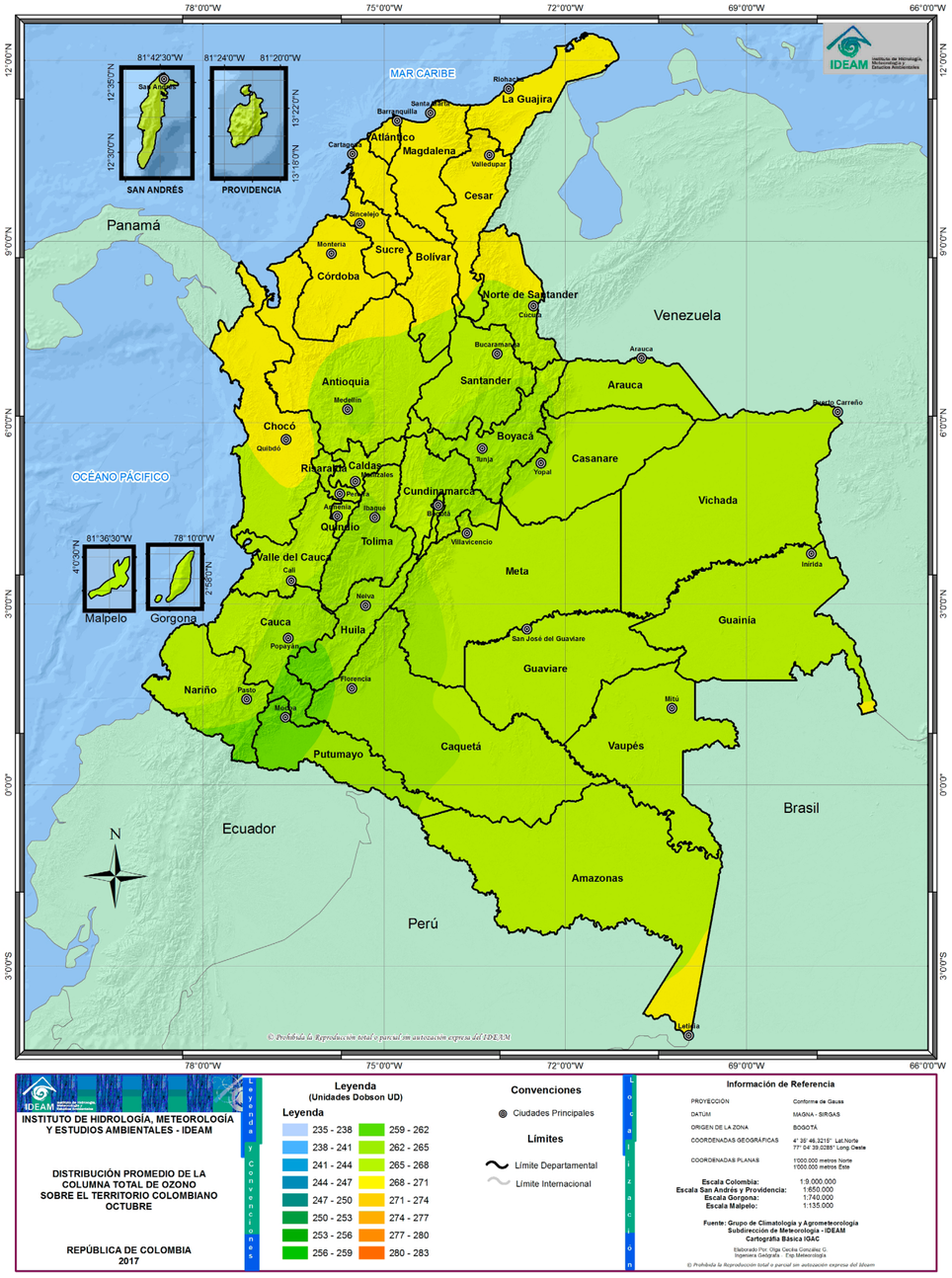
Mapa 48. Distribución promedio de la columna total de ozono para el mes de agosto en Unidades Dobson.



Mapa 49. Distribución promedio de la columna total de ozono para el mes de septiembre en Unidades Dobson.



Mapa 50. Distribución promedio de la columna total de ozono en octubre en Unidades Dobson.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO OCTUBRE

REPÚBLICA DE COLOMBIA 2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda (Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones

Ciudades Principales

Límites

Límite Departamental

Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

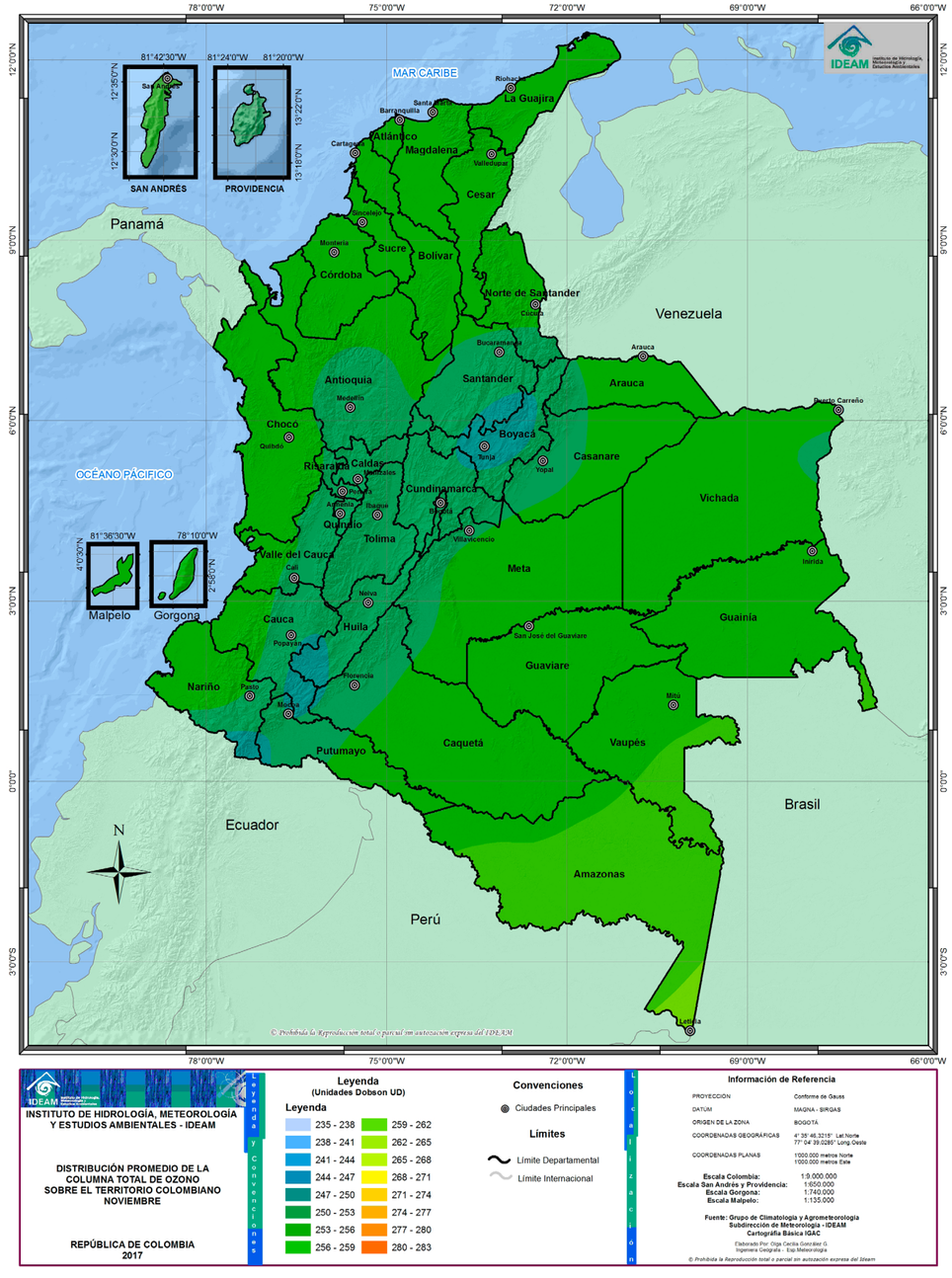
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:650.000
Escala Gorgona: 1:740.000
Escala Malpelo: 1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 51. Distribución promedio de la columna total de ozono en noviembre en Unidades Dobson.



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO NOVIEMBRE

REPÚBLICA DE COLOMBIA 2017

Leyenda y Convenciones

Leyenda (Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones

Ciudades Principales

Límites

Límite Departamental

Límite Internacional

Localización

Información de Referencia

PROYECCION	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este

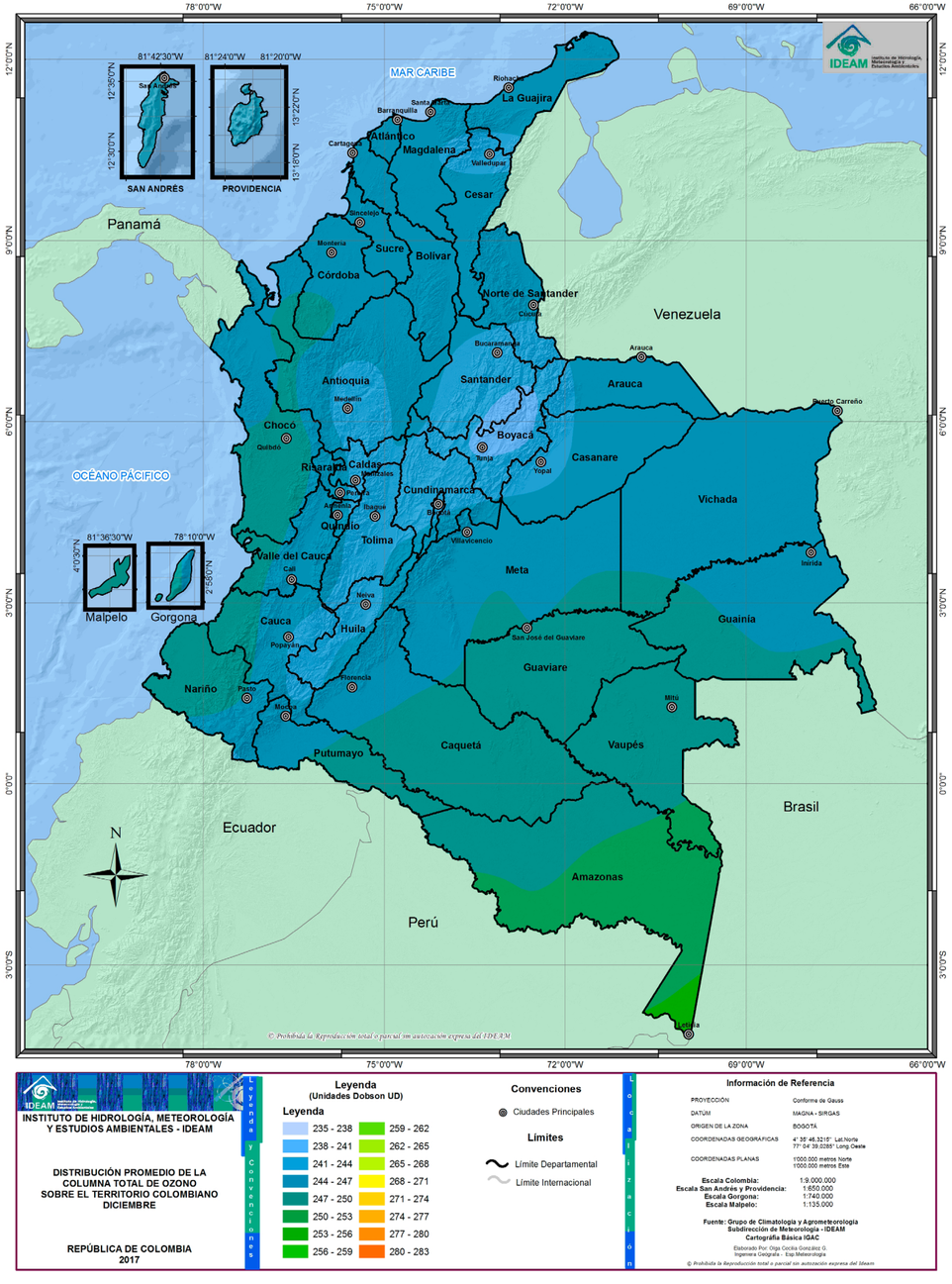
Escala Colombia: 1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia: 1:650.000
Escala Gorgona: 1:740.000
Escala Malpelo: 1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

Mapa 52. Distribución promedio de la columna total de ozono en diciembre en Unidades Dobson.



Leyenda y Convenciones

Leyenda
(Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones
Ciudades Principales

Límites
Límite Departamental
Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este
Escala Colombia:	1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia:	1:650.000
Escala Gorgona:	1:740.000
Escala Malpelo:	1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

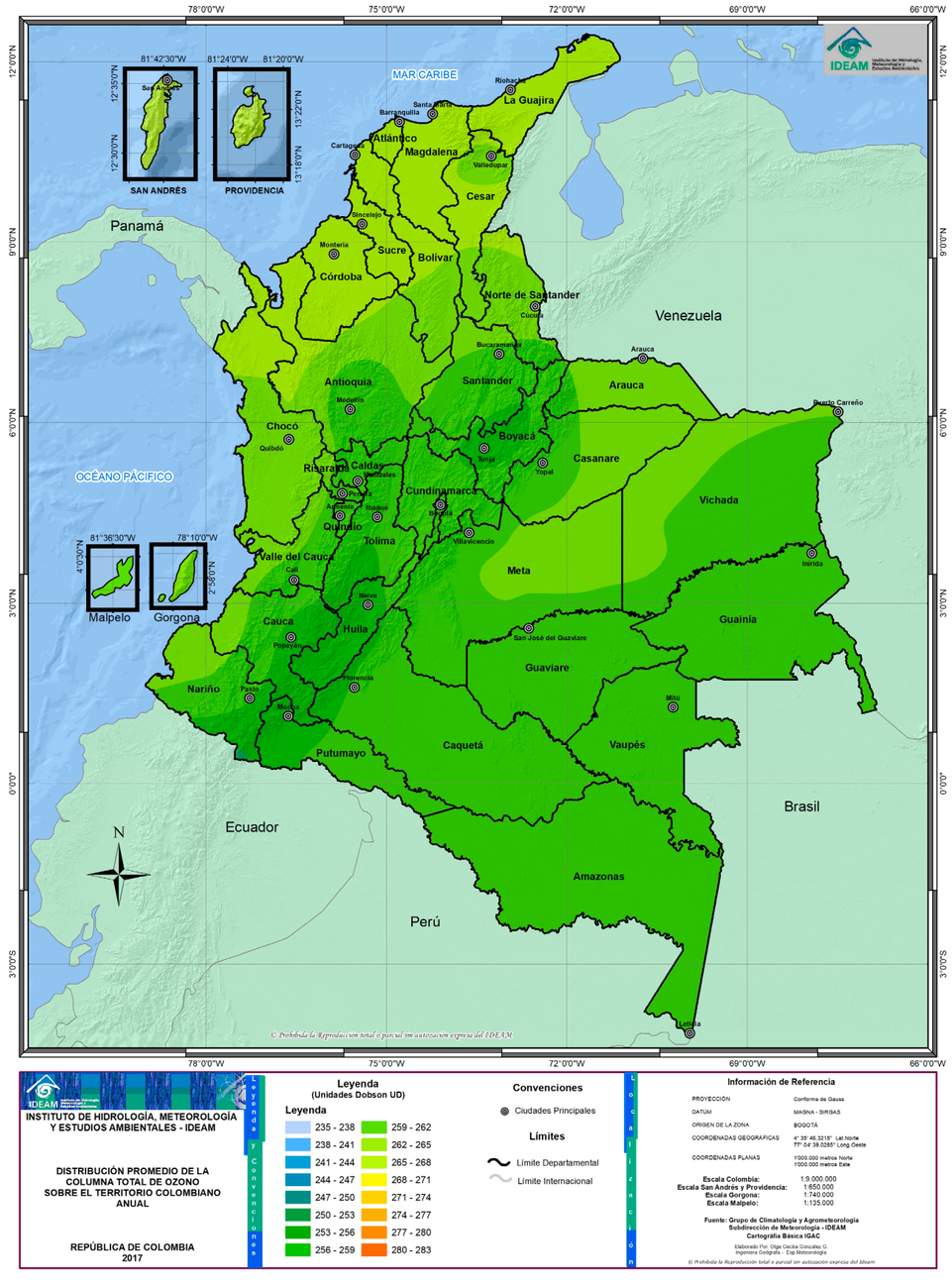
© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO DICIEMBRE

REPÚBLICA DE COLOMBIA
2017

Mapa 53. Distribución media anual multianual de la columna total de ozono en Unidades Dobson obtenida en el periodo 1978-2016.



Leyenda y Convenciones

Leyenda
(Unidades Dobson UD)

235 - 238	259 - 262
238 - 241	262 - 265
241 - 244	265 - 268
244 - 247	268 - 271
247 - 250	271 - 274
250 - 253	274 - 277
253 - 256	277 - 280
256 - 259	280 - 283

Convenciones
Ciudades Principales

Límites
Límite Departamental
Límite Internacional

Información de Referencia

PROYECCIÓN	Conforme de Gauss
DATUM	MAGNA - SIRGAS
ORIGEN DE LA ZONA	BOGOTÁ
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4° 35' 46.3215" Lat.Norte 77° 04' 39.0285" Long.Oeste
COORDENADAS PLANAS	1'000.000 metros Norte 1'000.000 metros Este
Escala Colombia:	1:9.000.000
Escala San Andrés y Providencia:	1:650.000
Escala Gorgona:	1:740.000
Escala Malpelo:	1:135.000

Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología
Subdirección de Meteorología - IDEAM
Cartografía Básica IGAC

Elaborado Por: Olga Cecilia González G.
Ingeniera Geógrafa - Esp.Meteorología

© Prohibida la Reproducción total o parcial sin autorización expresa del Ideam

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM

DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO SOBRE EL TERRITORIO COLOMBIANO ANUAL

REPÚBLICA DE COLOMBIA
2017

7

ASPECTOS **RELEVANTES** PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

Cartagena de Indias

En esta sección del atlas se busca dar una visión muy rápida, con base en la información disponible[1], en los siguientes aspectos:

a) El acercamiento del aporte de las energías renovables al suministro energético a nivel global.
b) Haciendo énfasis en la energía solar fotovoltaica para la generación de electricidad, se relacionan las tecnologías utilizadas y competitivas.
c) La evolución de la capacidad instalada a nivel global y los costos de implementación de la energía solar fotovoltaica.
d) La participación de la energía solar en el suministro energético en el país.
e) Finalmente, una aproximación al estado de la reglamentación, normas y las leyes aplicables a las energías renovables en el país.

7.1 ESTADO DE LAS TECNOLOGÍAS RENOVABLES A NIVEL GLOBAL

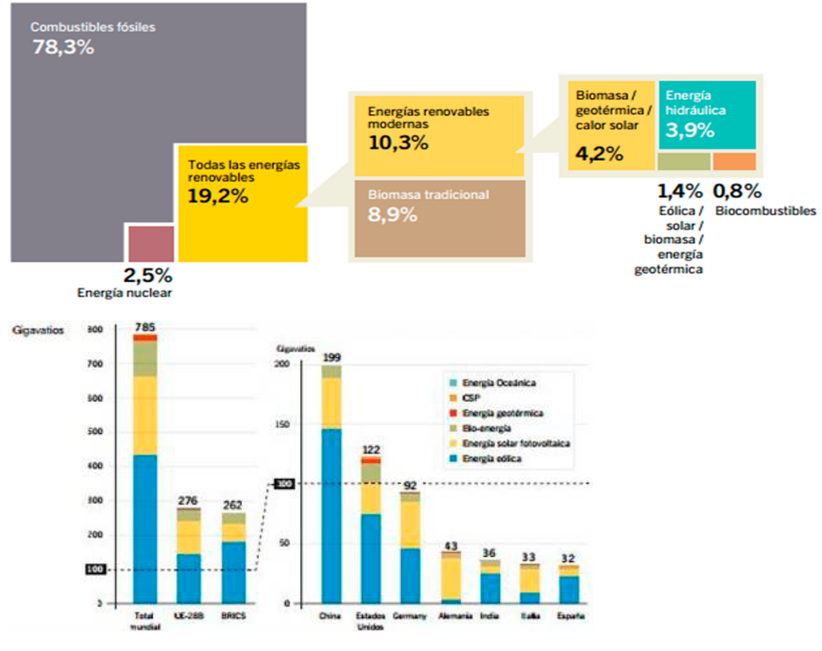
En la Figura 67(a) se muestran los porcentajes estimados de participación de las fuentes primarias de energía en el suministro energético Global en el año 2015[2]. Respecto a las fuentes renovables, la biomasa tradicional (leña rural utilizada para cocción y calentamiento) representa el 8,9% y las nuevas fuentes renovables (utilizadas en la generación eléctrica, calentamiento, refrigeración, transporte y servicios de energía rurales autónomos) contribuyen con el 10,3%, donde la energía solar, la eólica, la biomasa y la geotermia aportan un 5,6%, la hidroenergía, 3,9% y los biocombustibles, 0,8%.

Durante las últimas décadas se han presentado grandes avances en la competitividad de las diversas tecnologías renovables, que están incrementando considerablemente su participación en el suministro energético mundial. Según REN21 (red vinculada al Programa Medioambiental de las Naciones Unidas - PNUMA), entre 2009 y 2014, para el caso de: a) la generación de electricidad: la mayor tasa de crecimiento anual fue en energía solar fotovoltaica y térmica de concentradores solares de potencia (CSP en inglés), la cual fue del 50% y 46%, respectivamente, mientras que en la eólica, la geotermia e hidroenergía el aumento fue de 18%, 3,6% y 3,5%, respectivamente, b) calentamiento: solamente el calentamiento solar creció un 17%, c) transporte (fuerza motriz): creció 5,2 % y 11% en bioetanol y biodiesel, respectivamente..

La Figura 67(b) muestra la participación de la capacidad instalada de las diferentes energías renovables (sin incluir la hidroenergía), la cual, a nivel global se estima en 785 Gigavatios (GW) para el año 2015. La participación se discrimina, tanto a nivel mundial como en la comunidad Europea, los países BRICS, así como para los 7 países del mundo con mayor capacidad instalada. Se observa que en países como China, Estados Unidos, España e India, la mayor participación es de la energía eólica, mientras que en Alemania, Italia y Japón es la solar fotovoltaica.[3]

Figura 67. (a) Participación de las tecnologías renovables en el consumo final a nivel global (arriba) y (b) Participación de la capacidad instalada de las energías renovables en el mundo[3] (abajo).

Fuente: REN21.



1 Agencia Internacional de Energías Renovables IRENA, Red de Políticas de Energías Renovables para el siglo 21 (REN21, sigla en Inglés), Agora Energiewende estudio "Current and Future Cost of Photovoltaics" realizado por Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems (ISE), entre los principales.

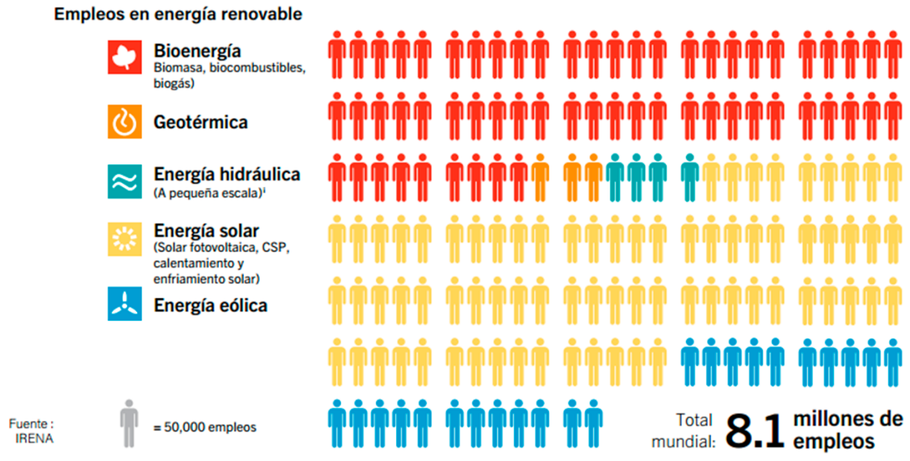
2 Tomado del Reporte Global del Estado de las Energías Renovables del 2015, REN21 http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf consultado en septirmbre de 2017.

3 http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf consultado en septiembre de 2017.

El mejor año para las energías renovables fue el 2015 gracias a la puesta en marcha de instalaciones capaces de generar 147 GW de electricidad, el mayor incremento en la historia, según el informe "Renewables 2016 Global Status Report", de la organización REN21. El informe también señaló que las inversiones en renovables alcanzaron niveles históricos en el 2015: 286.000 millones de dólares. Esta cifra no contabiliza las inversiones en grandes plantas de energía hidráulica (de más de 50 megavatios). El aumento se produjo, en gran parte, porque las energías renovables ahora son competitivas con los combustibles fósiles en muchos mercados. Además, la mayoría de países del mundo (146) tiene en marcha políticas para apoyar las energías renovables. A estos dos factores se añade el mejor acceso a financiación, preocupaciones sobre la seguridad energética y el medio ambiente y la creciente demanda de servicios modernos de energía en economías desarrolladas y emergentes. También, por primera vez, el año pasado, los países en desarrollo sobrepasaron a los desarrollados en inversiones en energías renovables.

Fuente: REN21.

Figura 68. Aproximación a la generación actual de empleos directos e indirectos de las energías renovables en el mundo.



La Figura 68 presenta una aproximación a la cantidad de empleos generados por tipo de fuente renovable en el mundo, estimada por REN21 a partir de información de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena). **El mayor número de empleos lo genera la energía solar con 3,7 millones**, seguido por la bioenergía con 3,0 millones, la energía eólica con 1,1 millones, la hidroenergía con 200 mil y la geotermia con 150 mil.

7.2 TECNOLOGÍAS SOLARES

Las tecnologías solares se pueden clasificar en:

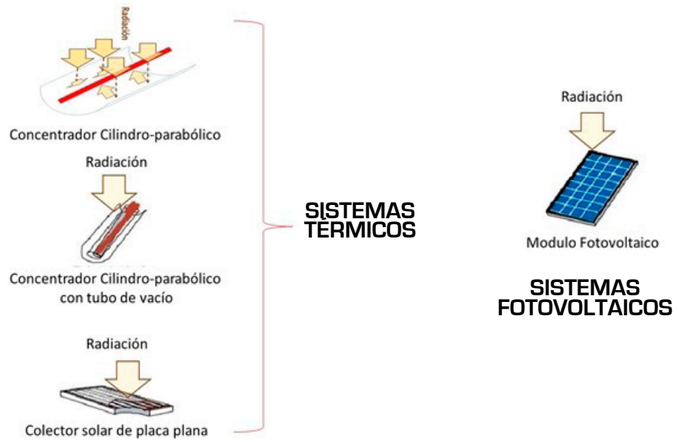
- **Solar pasiva:** permite la climatización e iluminación de espacios en todo tipo de construcción, utilizando ventanas, claraboyas, cubiertas transparentes, etc., convenientemente dispuestas.
- **Solar activa:** básicamente utiliza colectores solares planos para el calentamiento de agua, la calefacción de espacios y la refrigeración.
- **Solar térmica:** transforma la energía solar en eléctrica o calor de proceso con eficiencias de 31 y 80 %, respectivamente. Los sistemas pueden ser clasificados como concentradores cilíndricos, platos parabólicos, receptores centrales y estanques solares.
- **Solar fotovoltaica:** mediante dispositivos llamados celdas solares, transforma directamente mediante el efecto fotovoltaico la energía solar en electricidad, con eficiencias que alcanzan comercialmente el 30 %, en sistemas de mayor potencia[4]. Esta tecnología es muy utilizada en la generación de electricidad en telecomunicaciones, sistemas individuales, cargadores de baterías y electrificación en zonas no interconectadas, así como en fachadas de edificaciones donde están integradas las celdas.

La Figura 69 muestra las principales tecnologías de la energía solar para el aprovechamiento de calor y producción de electricidad. El aprovechamiento de la energía solar como energía térmica (sistemas térmicos, ST) permite calentar agua para hogares, edificios, o piscinas; de igual forma sirve para calentar el aire dentro de las casas, invernaderos y otros edificios, a partir de aplicaciones típicas de los ST de

4 http://arzonsolar.com/company/, consultado en enero de 2016.

baja temperatura, como es el caso del colector solar de placa plana. También permite calentar fluidos a altas temperaturas para operar turbinas que generan electricidad, a través del concentrador cilindro parabólico.

Figura 69. Principales tecnologías de la energía solar para el aprovechamiento como el calor y electricidad.



El concentrador cilíndrico parabólico concentra la radiación en el tubo centrado en el foco del cilindro, permitiendo temperaturas mayores a 100 °C, con el fin de calentar diversos fluidos como aceites o agua para producir vapor en la generación de electricidad o como fuente de calor de procesos industriales, típicos de los ST de media y alta temperatura, por ejemplo.

Para resumir, la energía solar se puede transformar para producir electricidad de dos maneras:

a) Sistemas Fotovoltaicos (PV), estos convierten la radiación solar en electricidad. Tiene aplicaciones desde las calculadoras solares con pequeñas celdas fotovoltaicas (mW), pasando por sistemas individuales para viviendas (W), hasta grandes centrales eléctricas (MW).
b) Sistemas térmicos de alta temperatura, estos generan electricidad mediante la concentración de la energía solar para calentar un fluido y producir vapor, recurso que se utiliza para alimentar la turbina de un generador.

Las principales ventajas y desventajas de las tecnologías solares son:

a) No contamina el aire y en escalas distribuidas (edificios) se tiene un impacto mínimo en el medio ambiente.
b) Baja densidad de energía, lo cual requiere grandes áreas para colectar la energía necesaria.
c) Alta intermitencia del recurso dependiendo del lugar, hora, época del año y condiciones climáticas.

7.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Existen materiales semiconductores en el comercio y se encuentran en variadas formas (por ejemplo celdas o células circulares o cuadradas típicamente del orden de 100 cm^2, agrupadas en varios grupos, formas y tamaños acordes a la escala de la necesidad), los cuales transforman la energía de los fotones de la radicación solar en electricidad (efecto fotovoltaico).

La tecnología fotovoltaica (FV) genera corriente eléctrica para uso directo o almacenamiento (baterías, producción de hidrógeno, etc.). Una celda fotovoltaica puede generar una potencia eléctrica de un vatio. Las celdas individuales se ensamblan para formar módulos, típicamente de 10, 20 y 40 celdas. Si se necesita generar más electricidad los módulos se agrupan para formar lo que se conoce como arreglo (de 10 o más módulos).

Esta tecnología se utiliza en zonas con radiación solar suficiente para casas individuales con potencias de algunos kilovatios pico[5] (kWp), ya sea en zonas urbanas o aisladas, en la medida en que sus costos sean competitivos con respecto a otras alternativas de abastecimiento. Adicionalmente, existen parques o granjas solares, con potencias de varias decenas o centenas de MWp, los cuales se encuentran conectados a la red, compitiendo y suministrando energía bajo un entorno de mercado.

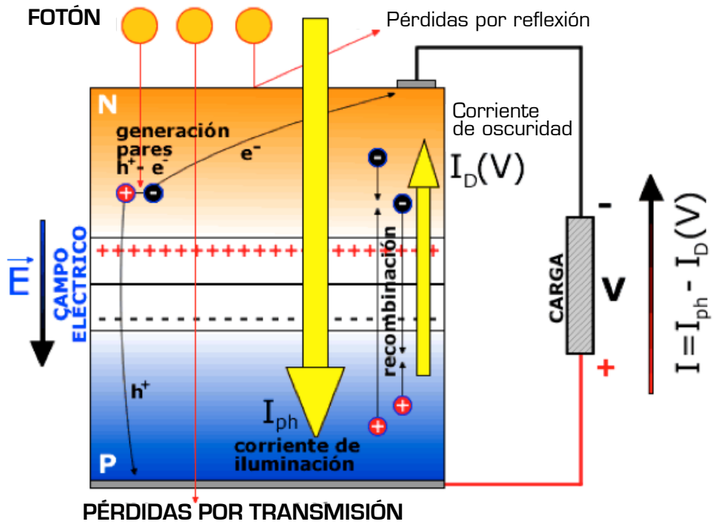
El efecto fotovoltaico consiste en un fenómeno que se presenta cuando se unen dos materiales semiconductores un donor (material tipo N) y otro aceptor (material

5 Vatio pico (Wp) hace referencia a la potencia que genera un sistema fotovoltaico cuando la radiación solar que incide es de 1kW/m2, lo cual es un estándar normalizado de referencia, a nivel de laboratorios, pruebas y comercio.

tipo P) de electrones, tal como se ilustra en la Figura 70. Los semiconductores más utilizados tienen una base de cristal de silicio dopado, adicionando átomos del grupo V (donor) o el grupo III (aceptor), que dan origen, mediante fotones de luz a un flujo de electrones desde el material N al P, generando una diferencia de potencial (o voltaje) entre los dos materiales.

Fuente: Universidad de Jaén UJA

Figura 70. Esquema del efecto fotovoltaico en una celda solar[6]

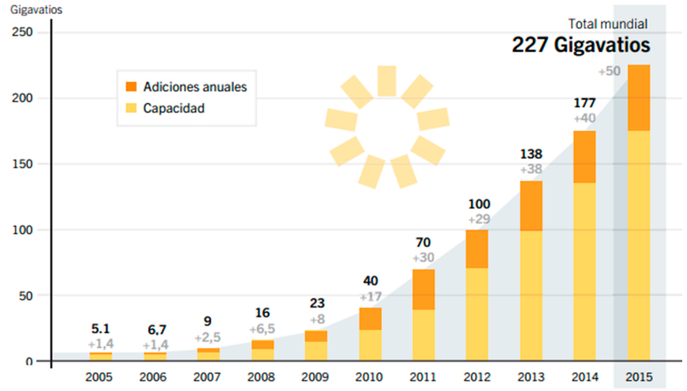


La Figura 71 muestra la evolución de la capacidad instalada global de los sistemas fotovoltaicos (SFV) en 11 años, alcanzando los 227 GW en el año 2015. Se observa que el crecimiento medio de la capacidad anual es muy cercano al 50%, debido, entre otros factores, a las crisis de precios altos del petróleo, económicas globales, el tamaño y el crecimiento chino y sus grandes necesidades de energía. Todo esto ha contribuido a generar mayores inversiones en investigación, mejorar las tecnológicas con menores costos de producción, haciendo cada vez más competitiva esta tecnología[7].

6 Tomado de: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm
7 Ibídem.

Figura 71. Capacidad global instalada de sistemas fotovoltaicos.

Fuente: REN21 "Reporte Mundial del Estado de la Energías Renovables



La Figura 72 muestra cómo han evolucionado las inversiones y la capacidad adicional instalada en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos. El gran crecimiento desde el año 2006 se debe a las mejoras tecnológicas en las eficiencias de conversión y reducción de los costos por vatio pico[8]. Estas mejoras han hecho cada vez más competitivos los SFV en: a) necesidad de encontrar alternativas de energía más baratas y limpias, b) en el periodo 2004 a 2014 el precio internacional del petróleo subió del orden de 40 US$ por barril, c) se atribuye un origen fósil a efectos no deseados, cada vez más críticos sobre el clima y d) se han creado políticas e incentivos en muchos países.

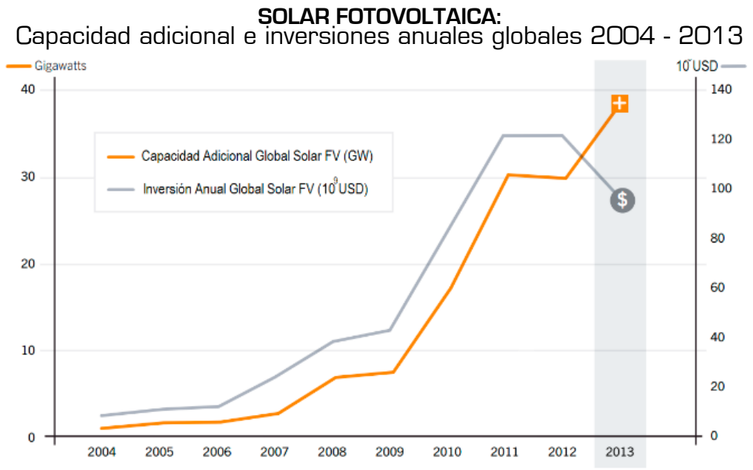
La Figura 72 también muestra que los SFV alcanzaron mayores niveles de competitividad en el mercado tecnológico energético global en el año 2013, ya que las implementaciones de nueva capacidad aumentaron un poco menos del 30 %, aun cuando las inversiones por la crisis de la economía global se redujeron en 22 %.

Finalmente, la tecnología solar, considerando sus mejoras en eficiencias y precios, así como en la generación de empleos (Figura 68), puede traer condiciones muy favorables para incrementar su aporte en el suministro de energía y en la economía.

8 Lo cual ha propiciado reducciones en el costo del vatio pico instalado del orden de un dólar (sin considerar almacenamiento).

Fuente: REN21

Figura 72. Capacidad global adicional de sistemas fotovoltaicos e inversiones anuales globales en el periodo 2004-2013



7.4 UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA

Según el censo y evaluación de los sistemas solares térmicos instalados en Colombia, realizado por el INEA, para el uso de energía solar en el calentamiento de agua en el año de 1993, existía un área de 49.000 m² aproximadamente, lo cual representaba un ahorro de energía de aproximadamente 705 MWh/mes. Uno de los proyectos más representativos era Ciudad Tunal, porque integró el uso de la energía solar en el calentamiento de agua.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos, el INEA realizó en 1996 el estudio *"Censo y evaluación de los sistemas fotovoltaicos instalados en Colombia"*, estimando una potencia instalada de 2.054 kWp, representados en cerca de 48.500 módulos fotovoltaicos, que representaban un ahorro energético en fuentes convencionales de energía cercanos a 2,85 MWh/año.

Actualmente en Colombia se estima que hay menos de 10 MWp (megavatios pico) instalados en sistemas solares fotovoltaicos, casi todos en pequeñas soluciones aisladas. Se destaca el sistema híbrido demostrativo solar fotovoltaico (6kWp) - diésel (6kWp) en el Hospital de Nazareth (La Guajira), este ha traído grandes beneficios a la región.

Hoy en día, la planta solar más grande del país se encuentra en la cubierta del Éxito Panorama de la ciudad de Barranquilla. Se utilizaron 6300 m² y se instalaron 2.070 paneles de silicio de la marca Yingli, principal fabricante de paneles solares en el mundo. Esta planta suministra el 24 % de la demanda diaria de energía del almacén, enfocada en las áreas de iluminación, refrigeración y aire acondicionado. El proyecto de 507 kWp representa un paso muy importante hacia la implementación de energías renovables en el país.

En el ámbito nacional, también se ha investigado en desarrollos y mejoramientos de colectores y aplicaciones como refrigeradores empleando colectores solares, en el desarrollo de celdas fotovoltaicas y componentes de los sistemas fotovoltaicos y su normalización. La Universidad Nacional lidera el tema de las celdas solares; igualmente otras universidades como la Pontificia Universidad Javeriana posee infraestructura investigativa en este tema.

Con el objetivo de alcanzar un adecuado abastecimiento de la demanda de energía eléctrica, la UPME realiza anualmente una revisión del plan de expansión de los recursos de generación y de las redes de transmisión. Los análisis de planeamiento realizados tienen un horizonte de largo plazo y se fundamentan en información de la infraestructura eléctrica actual, los proyectos en construcción y las proyecciones nacionales y regionales de demanda de energía y potencia. En este sentido, la UPME ha venido evaluando opciones de diversificación de la matriz de generación de electricidad, lo anterior apalancado por la ley 1715 de 2014 y las iniciativas de los agentes generadores, con el fin de desarrollar fuentes renovables no convencionales. Las simulaciones energéticas realizadas muestran que la energía renovable no convencional brinda confiabilidad dada su complementariedad con el recurso hidroenergético, desplazando además generación costosa.

7.5 NORMATIVIDAD ASOCIADA A LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA

En la siguiente tabla se presenta una aproximación a la historia institucional y normativa de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en Colombia, así como la referencia a las regulaciones implementadas y a las que recientemente se están implementando desde el año 2014, a partir de la reciente Ley 1715.

Tabla 19. Normatividad asociada a las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE)

Año	Organismo y/o reglamentación	Organismo y/o función/asunto
1984	Se crea la División de FNCE del MME	Evaluar y promover las FNCE, especialmente en las ZNI.
1989	Se crea la Comisión Nacional de Energía (CNE)	Funciones en FNCE.
1992	Decreto 2245/59 y artículos 42, 43 y 44 del Decreto 2119/92. Ley 143/94	Por los cuales se crea el Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA). Elaborar programas científicos y tecnológicos en las intensificación del uso de las fuentes alternas de energía, ahorro, conservación y uso eficiente de la energía.
http://www.suin-juriscol.gov.co/contenidos.dll?f=templates&fn=init.htm		
1997	Decreto 1683/97-UPME, Ley 143/94	Por el cual se crea la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Establecer la manera de satisfacer los requerimientos de energía teniendo en cuenta los recursos energéticos existentes, convencionales y no convencionales.
http://www1.upme.gov.co/historia-de-la-upme		
1999	IPSE	Se crea el IPSE para promover, fomentar, desarrollar e implementar soluciones energéticas mediante esquemas empresariales eficientes, viables financieramente y sostenibles en el largo plazo, procurando la satisfacción de las necesidades energéticas de las Zonas No Interconectadas, ZNI, apoyando técnicamente a las entidades definidas por el Ministerio de Minas y Energía.
http://www.ipse.gov.co		
2001	Ley 697	Declara el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés general y promueve la utilización de energías alternativas. Asigna en cabeza del MME la responsabilidad de la promoción y adopción de programas.
http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Juridico/Ley%20697.PDF		
2001	Decreto 2532	Requisitos para solicitar la exclusión de impuesto sobre las ventas, sistema de control ambiental. Artículo 158-2 del estatuto tributario.
http://www.suin-juriscol.gov.co/contenidos.dll?f=templates&fn=init.htm		
2002	Ley 788	Reforma tributaria. Artículo 18. Otras rentas exentas. Sol, viento y biomasa.
http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/DECRETO%202469%20DEL%2002%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202014.pdf		
2003	Decreto 3683	Reglamenta Ley 697. Crea la Comisión Intersectorial (CIURE), presidida por el MME e integrada por los ministerios de Comercio, Industria y Turismo, el Ministerio de Ambiente, la CREG y Colciencias. La UPME ejerce la Secretaría Técnica de la Comisión. Busca reglamentar el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad del mercado energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía.
http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Juridico/Decreto3683.pdf		
2003	Decreto 3172	Reglamenta el artículo 158-2 del estatuto tributario.
http://www.suin-juriscol.gov.co/contenidos.dll?f=templates&fn=init.htm		
2004	Resolución 136	Por la cual se establecen los procedimientos para solicitar ante las autoridades ambientales competentes la acreditación o certificación de las inversiones de control y mejoramiento del medio ambiente.
http://www.alcaldiabogota.gov.co/		
2006	Resolución 071, CREG	Por la cual se adopta la metodología en las remuneración del Cargo por Confiabilidad en el Mercado Mayorista de Energía. Ver Notas de Vigencia en el siguiente link.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/243937481e5177820525785a007a6f75?OpenDocument		
2007	Resolución 978	Por la cual se establece la forma y requisitos para presentar ante el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial las solicitudes de acreditación para obtener la certificación de que tratan los artículos 424-5 numeral 4 y 428 literales f) e i) del Estatuto Tributario, con miras a obtener la exclusión de impuesto sobre las ventas correspondiente.
http://www.alcaldiabogota.gov.co/		
2008	Decreto 2688	El DNP y el IPSE se vinculan a la CIURE como miembros permanentes.
http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Juridico/DECRETO_2688_2008.pdf		
2010	Resolución 180919	Plan de Acción 2010 – 2015 del PROURE.
http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Juridico/RES_180609_MME_2006.pdf		
2010	Ley 1450/2011 PND 2010-2014	Plan nacional de desarrollo.
https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Normatividad/ley145016062011.pdf		

Año	Organismo y/o reglamentación	Organismo y/o función/asunto
2011	Resolución 148, CREG	Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/13f45b6e8b-66f8290525796b0049af73?OpenDocument		
2012	Resolución 778	Por la cual se modifica la Resolución 978 de 2007.
http://www.alcaldiabogota.gov.co/		
2012	Resolución 779	Por la cual se modifica la Resolución 136 de 2004.
http://www.alcaldiabogota.gov.co/		
2012	Resolución 186	Por la cual se adoptan Metas Ambientales, de que trata el literal j) del artículo 6° del Decreto 2532 de 2001 y el literal e) del artículo 4° del Decreto 3172 de 2003.
http://www.alcaldiabogota.gov.co/		
2012	Resolución 563	Por la cual se establecen el procedimiento y los requisitos para evaluar y conceptuar sobre las solicitudes que se presenten ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con miras a obtener la exclusión del impuestos sobre las ventas IVA y/o deducción en la renta de elementos, equipos y maquinaria destinados a proyectos, programas o actividades de reducción en el consumo de energía y eficiencia energética, según lo dispuesto en el artículo 4° de la Resolución número 186 de 2012 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/secciones-de-interes/resoluciones/resolucion-0563-de-2012		
2013	Resolución 153, CREG	Por la cual se establece el reglamento sobre los Contratos de Suministro de Combustible de Origen Agrícola para el Cargo por Confiabilidad.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c2ddfbf3e94d50af05257c2a007679c1?OpenDocument		
2014	Ley 1715	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional y se realizan importantes estímulos para el fomento de las energías renovables y el uso eficiente de la energía, cuya reglamentación impacta fuertemente el desarrollo de la utilización de estos recursos.
http://www.suin-juriscol.gov.co/contenidos.dll?f=templates&fn=init.htm		
2014	PND 2014 - 2018	Fondos para energización rural y en ZNI, articulo 190. Se destaca que para FAZNI a partir del 1° de enero del 2016 se recaudan 1,5 COP por cada kWh que se transe en la Bolsa de Energía (hasta el año anterior era 1 COP, es decir, se aumentó al aporte en un 50%).
http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf		

Año	Organismo y/o reglamentación	Organismo y/o función/asunto
2014	Decreto 2492	Por el cual se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda.
http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/DECRETO%202492%20DEL%2003%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202014.pdf		
2014	Decreto 2469	Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración.
http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/DECRETO%202469%20DEL%2002%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202014.pdf		
2014	Resolución 132, CREG	Por la cual se define la metodología para determinar la energía firme de plantas Geotérmicas.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/545b836253349e1e05257d7900539c5d/$FILE/Creg132-2014.pdf		
2014	Resolución 175, CREG	Por la que se reglamenta la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN).
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/1e1055ca1511e68105257db7006f1c4a/$FILE/Creg175-2014.pdf		
2015	Decreto 2143	Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos en las aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.
http://wp.presidencia.gov.co/sitios/normativa/decretos/2015/Decretos2015/DECRETO%202143%20DEL%2004%20DE%20NOVIEMBRE%20DE%202015.pdf		
2015	Resolución 061, CREG	Por la cual se modifica la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas, definida en la Resolución CREG 148 de 2011 y se dictan otras disposiciones.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/a4170681d70b32f905257e4a006d8d5a?OpenDocument		
2015	Resolución 116, CREG	Por la cual se amplía el plazo para implementar el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica, adoptado mediante Resolución CREG 011 de 2015.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/cfc45d6b7b4d5ffc05257ead005fe4e3/$FILE/Creg116-2015.pdf		
2015	Decreto 1623	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política en las expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas.
http://wp.presidencia.gov.co/sitios/normativa/decretos/2015/Decretos2015/DECRETO%201623%20DEL%2011%20DE%20AGOSTO%20DE%202015.pdf		

Año	Organismo y/o reglamentación	Organismo y/o función/asunto
2015	Resolución 281 , UPME	Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.
http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/secciones-de-interes/resoluciones/resolucion-0281-de-2015		
2015	Resolución 011, CREG	Por la cual se regula el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica.
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/84e-16439657b002b05257e52005011b5/$FILE/Creg011-2015.pdf		
2015	Resolución 024, CREG	Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones.
http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/Creg024-2015.pdf		
2015	Resolución 212, CREG	Por la cual se realizan algunos ajustes a la Resolución CREG 011 de 2015, programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica
http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c5fd067947591a9b05257f34004ab202?OpenDocument		
2016	Resolución 045, UPME	Por la cual se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los proyectos de fuentes no convencionales de energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 1715 de 2014 y se toman otras determinaciones.
http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/secciones-de-interes/resoluciones/res-045-febrero-2016		
2016	Resolución 143, UPME	Por la cual se modifica el artículo 5º y se adicionan artículos y anexos a la Resolución UPME 0520 de Octubre 09 de 2007, por medio de la cual se establece el Registro de Proyectos de Generación y se toman otras disposiciones.
http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Generacion/143_2016.pdf		

Adicionalmente, actualmente se encuentran en trámite los siguientes proyectos de normatividad:

Tabla 20. Normatividad asociada a las FNCE, en proceso de elaboración y gestión.

Año	Proyecto/ reglamentación	Organismo y/o función/asunto
2015	Decreto, MME	Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), se publicó para comentarios el 20/05/2015.
https://www.minminas.gov.co/documents/10180/674559/ProyctoDecreto+Fenoge+(publicado).docx/de10af6f-2070-4833-a772-5ad23f885957		
2016	Decreto, MME	Por el cual se establecen lineamientos de política pública para incentivar la autogeneración a pequeña escala, la gestión de la demanda de energía eléctrica y la medición inteligente: se publicó para comentarios el 16/04/2016
https://www.minminas.gov.co/documents/10180/674559/Proyecto+de+decreto+autogeneracion+a+peque%C3%B1a+escala+y+Medici%C3%B3n+Inteligente+(15.04.2016).pdf/d018e8a6-dfd3-45ba-af4c-d038cb86fd30		
2016	Resolución, MADS	Por la cual se adopta el procedimiento y requisitos en las presentación de las solicitudes para obtener la certificación de beneficio ambiental en lass nuevas inversiones en proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía y Gestión Eficiente de la Energía y se toman otras determinaciones. Se publicó el 19/01/2016.
https://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_particpacion_al_ciudadano/consultas_publicas_2016/FORMATO_ESPECIFICACIONES_DEL_ELEMENTO__EQUIPO_O_MAQUINARIA_rvs.zip		

Adicionalmente, los siguientes son los incentivos tributarios implementados, que están siendo complementados por la reglamentación en curso de la Ley 1715:

1. **Estatuto Tributario**: los artículos 424-7 (antes artículo 424-5 numeral 4, ajustado por la Ley 1607 de 2012) y el 158-2, establecen dos instrumentos para incentivar las inversiones en sistemas de control y monitoreo ambiental y mejoramiento del medio ambiente: i) Exclusión de impuesto sobre las ventas y ii) Deducción por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente; respectivamente.

2. Reglamentación:

a) Los Decretos 2532 de 2001 y 3172 de 2003 de los ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Hacienda y Crédito Público, establecen que solo los equipos, elementos y maquinaria destinados a proyectos, programas o actividades de reducción en el consumo de energía y/o eficiencia energética, serán objeto de la exclusión de IVA o de la deducción, cuando correspondan a la implementación de metas ambientales concertadas con el Ministerio del Medio Ambiente, para el desarrollo de las estrategias, planes y programas nacionales de producción más limpia, ahorro y eficiencia energética establecidos por el Ministerio de Minas y Energía.

La Resolución 186 de 2012, expedida por los ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Minas y Energía, establece lo siguiente:

i. Se adoptan los sectores, las metas ambientales, los subprogramas sectoriales y las líneas de acción en las cuales deben enmarcarse las solicitudes que se presenten al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para optar por la exclusión o deducción (en el caso de las FNCE):

- Caracterizar el potencial de energía solar y de energía geotérmica con el fin de promover el desarrollo de soluciones energéticas.
- Implementar un programa de medición y registro de vientos en los sitios identificados con un potencial alto con el fin de estimar la energía aprovechable.
- Caracterizar los potenciales de energía de los mares con mayor detalle en las zonas previamente identificadas.
- Caracterizar los potenciales de pequeñas caídas de agua que puedan producir menos de 10 MW en el inventario de potenciales de FNCE
- Desarrollar proyectos demostrativos considerando variables técnicas, económicas, de mercado, ambientales y sociales.

ii. Se establece que el Ministerio de Minas y Energía, a través de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), evaluará y conceptuará sobre las solicitudes que se presenten al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para acceder a los incentivos tributarios, con el fin de determinar si las mismas se enmarcan dentro de las metas y líneas de acción previstas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

iii. La Resolución UPME 563 de 2012 establece el procedimiento, los requisitos y las definiciones para evaluar y conceptuar sobre las solicitudes de proyectos de EE o FNCE (mencionados en el ítem "i" anterior) que se presenten ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con miras a obtener tales beneficios tributarios. En el caso donde la UPME establezca un concepto favorable al evaluar el proyecto, el solicitante deberá dirigirse a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), para proceder con los trámites allí exigidos y optar por el beneficio tributario.

Se sugiere visitar los siguientes links de las normas referenciadas, además es posible encontrar el inventario de documentos normativos más recientes sobre energías renovables nacionales, así como la información de lo que al respecto se está realizando en el país:

- **www.si3ea.gov.co**
- **www.suin-juriscol.gov.co**
- **www1.upme.gov.co/historia-de-la-upme**
- **www.creg.gov.co**
- **www.dnp.gov.co**
- **www1.upme.gov.co/sgic**
- **http://www1.upme.gov.co/sgic/.**

8

RESULTADOS
Y RECOMENDACIONES

Río Amazonas

8.1 PRINCIPALES RESULTADOS

En esta edición del atlas se presenta como principal resultado la evaluación de la disponibilidad de la radiación global y del brillo solar en el territorio nacional, así como el comportamiento de la radiación ultravioleta, el ozono y sus relaciones. A continuación, se relacionan otros resultados obtenidos, igualmente importantes:

8.1.1 Radiación global y brillo solar

- Se logró identificar las entidades nacionales que realizan el seguimiento a la radiación solar, así como validar y evaluar la información generada por estas para definir la calidad de su información.
- Se terminó de validar y evaluar todas las gráficas generadas por los actinógrafos del IDEAM, así como las de Cenicafé, ya que estas entidades contaban con este tipo de sensor. Terminado lo anterior, la actividad principal asociada a los piranómetros del IDEAM (instalados en las EMAS) y de las otras entidades será su calibración para garantizar datos confiables.
- Se realizaron 105 jornadas de calibración en terreno de piranómetros que pertenecen al IDEAM, de los cuales 96 quedaron bien calibrados y se incluyeron en la realización de los mapas, esta actividad garantiza la confiabilidad de sus datos.
- Se mejora la disponibilidad de la información de los sensores de radiación de las estaciones EMAS del IDEAM, que se puede suministrar a los usuarios en cuanto a calidad, cobertura y desagregación temporal, ya que fueron validadas hasta diciembre del 2016.
- Con los sensores de radiación instalados recientemente (después del 2005), se logró validar los resultados de la modelación utilizada en la anterior edición del atlas, la cual ha sido mejorada en la presente versión y genera confianza en sus resultados, ya que son usados como información complementaria para elaborar los mapas de radiación global.
- Los mapas de la irradiación global horizontal y de brillo solar fueron realizados con una mayor cantidad de estaciones y con series más largas de datos. En la anterior versión del atlas, los mapas de irradiación global horizontal se realizaron utilizando información de 71 sensores de radiación y los resultados de la modelación de 383 sensores de brillo solar, mientras que en esta versión se tuvieron en cuenta 240 de radiación y cerca de 340 de brillo solar. En los mapas de brillo solar se pasó de 383 sensores a 501 en esta nueva versión del atlas.
- Se mejora la comprensión de la información que se presenta en los mapas, por medio de análisis regionales del comportamiento promedio anual e interanual; tablas con los promedios mensuales y anuales de la irradiación global acumulada diaria, brillo solar y número de días sin brillo solar en las principales ciudades del país (Anexos 3, 5 y 6, respectivamente); tablas con los promedios mensuales y anuales de la irradiación global acumulada diaria en todas las estaciones del IDEAM (convencionales y automáticas en los Anexos 11 y 12), así como las tablas que contienen los promedios horarios de la irradiación global en cada mes en algunas ciudades capitales del país (Anexo 4).
- Se facilita la identificación de las regiones estratégicas en donde es más adecuada la utilización de la energía solar en la solución de necesidades energéticas. Las zonas del país con las mayores intensidades de radiación global son la región Caribe, amplios sectores de la Orinoquia y los valles interandinos, mientras que los menores valores se presentan en amplios sectores de la región Pacífica, en el occidente de la Amazonía y en algunos sectores aislados de las tres cordilleras.
- Como resultado del análisis de los promedios anuales en la mayoría de las estaciones que se tuvieron en cuenta para el presente atlas, se logró establecer que, dependiendo de la intensidad del fenómeno de El Niño o La Niña, la radiación global aumenta o disminuye entre un 5 y un 10 por ciento, respectivamente, con respecto al promedio anual de la estación.
- El capítulo 7 describe información muy importante relacionada con la normatividad regulatoria y técnica para el aprovechamiento de la radiación solar en diferentes aplicaciones en Colombia.

8.1.2 Ozono

- La zona con menor contenido de ozono total en el ámbito mundial es la zona tropical sobre el norte y centro de Suramérica, la región oriental de la cuenca ecuatorial del Océano Pacífico Tropical, el Atlántico tropical y África central, en estas se registran promedios por debajo de 240 UD (Unidades Dobson). **Estas**



zonas, en donde está incluida Colombia, están expuestas a altos niveles de radiación ultravioleta en superficie durante todo el año, ya que como se sabe el ozono es el escudo protector contra este tipo de radiación.

- El ozono total en la atmósfera varía a lo largo del año sobre el país y los meses de diciembre, enero y febrero se caracterizan por presentar los valores más bajos; a partir de marzo se registra el aumento gradual del ozono total sobre el territorio nacional hasta agosto y septiembre; estos meses muestran los máximos valores durante el año. A partir de octubre empieza nuevamente la disminución del ozono total hasta el mínimo entre diciembre y febrero.
- Al analizar el mapa del promedio anual de ozono total en el país, se determinó que las zonas con los valores más bajos son el suroriente del Tolima, el centro y sur del Huila, oriente del Cauca y Nariño, occidente de Caquetá y Putumayo, centro de Boyacá y suroriente de Santander.
- Los valores más bajos de la columna de ozono se registran a finales y principios del año, en esta época gran parte del territorio nacional recibe mayor radiación ultravioleta en superficie.
- Se mejora la comprensión de la información del ozono total presentada en los mapas nacionales, a través de análisis del comportamiento promedio anual e interanual y de la tabla con los promedios mensuales y anuales en las principales ciudades del país (Anexo 8).

8.1.3 Radiación Ultravioleta

- Durante todo el año el país está expuesto a altos valores de radiación ultravioleta, estos están catalogados como de riesgo, por ello se sugiere seguir las recomendaciones para la exposición saludable al Sol incluidas en el Anexo 1.
- En el año se presentan dos periodos con mayor incidencia de radiación ultravioleta en el país, uno alrededor de marzo y el otro alrededor de octubre, porque en estos meses el Sol alcanza las mayores alturas sobre el horizonte geográfico, por esto los rayos solares también alcanzan mayor perpendicularidad sobre el territorio colombiano.
- Se calibraron 3 espectrorradiómetros del IDEAM para medir radiación ultravioleta, lo cual permitirá continuar con las mediciones que se realizaron en Bogotá y Pasto, así como mejorar las calibraciones del modelo de transferencia radiactiva, utilizado para pronosticar el IUV, y el modelo para generar los mapas de radiación UV del atlas.
- Realización de una recopilación completa acerca de las recomendaciones asociadas a la exposición saludable al Sol en el Anexo 1.

Las zonas del país con mayores intensidades de radiación global son la región Caribe, amplios sectores de la Orinoquia y los valles interandinos.

8.2 RECOMENDACIONES

Con el objeto de seguir mejorando la información básica de las variables incluidas en el atlas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

8.2.1 Radiación global y brillo solar

- Realizar periódicamente (cada cinco años) las calibraciones de los patrones nacionales, los cuales son dos pirheliómetros de cavidad absoluta de primer orden de precisión, uno del IDEAM y otro de la Fundación Universitaria Los Libertadores, con los patrones del Centro Mundial de Radiación Solar en Davos (Suiza).
- Continuar con las jornadas de calibración en terreno de los sensores de radiación global del IDEAM. Según el Manual de Instrumentos y Medidas de Radiación WMO/TD - No. 149 (Ginebra, 1986), la OMM recomienda que estas se hagan cada año idealmente, pero en casos extremos máximo cada cinco años. Estas se realizarán con piranómetros utilizados como patrones secundarios, que a su vez han sido calibrados con el patrón nacional en condiciones especiales.
- Las entidades que no han realizado la calibración de sus sensores, deben efectuarla lo más pronto posible para que los datos tengan alta confiabilidad incorporando la referencia mundial de radiación (WRR). Las entidades que sí están calibrando sus sensores deben continuar esta actividad en forma periódica (se recomienda una vez cada tres años).
- Realizar el rediseño de la red de sensores de radiación del IDEAM, a partir de los resultados obtenidos en el presente atlas, ya que hay regiones como la Andina, con una alta densidad de estos y otras regiones (Caribe, Pacífica, Orinoquia y Amazonía) con una cantidad insuficiente de sensores. También existen varias ciudades con más de dos sensores, estos pueden ser reubicados en puntos estratégicos.
- Instalar lo más pronto posible sensores de radiación global en las siguientes ciudades: Mitú, Puerto Carreño, Quibdó, Arauca, Inírida, Neiva y Tunja.
- Cualquier entidad que tenga sensores de radiación global puede solicitar apoyo al IDEAM para validar su información, o aplicando los criterios que se han definido para esta actividad presentados en la sección 4.4.2.
- Mejorar la disponibilidad de los datos de radiación global, mediante la aplicación de técnicas complementarias como la evaluación de información satelital.
- Seguir realizando los talleres de calibración de sensores de radiación global, con el fin de concientizar y capacitar a los técnicos de las entidades que realizan su seguimiento.
- Instalar estaciones radiométrícas piloto que incluyan sensores para medir radiación solar directa, difusa y global. Estos componentes son fundamentales en el diseño de sistemas solares fotovoltaicos y otras tecnologías para el aprovechamiento de la radiación solar, ya que cada uno actúa de forma diferente en el rendimiento de cada sistema. También sirven para calibrar los modelos de estimación de la radiación solar a partir del brillo solar. Además, estas medidas son básicas para el seguimiento de la contaminación atmosférica global y el monitoreo del crecimiento de las plantas.

8.2.2 Radiación ultravioleta

- Con el objeto de continuar el seguimiento de la radiación UV en el país y la mejora de su información, se deben reinstalar sensores en San Andrés, Leticia y Riohacha.
- Seguir con las campañas de concientización sobre la exposición saludable al Sol, a través de boletines informativos y de alertas en las épocas con mayor incidencia de la radiación UV en el país. Estas campañas se deben apoyar con la instalación de solmáforos en sitios como centros educativos, playas, parques, sitios turísticos, entre otros.
- Generar la normatividad nacional, para personas que trabajan o realizan actividades al aire libre ya que pueden estar expuestos a altos niveles de radiación UV.

8.2.3 Ozono

- Restablecer los ozonosondeos realizados por el IDEAM, que hacen parte del seguimiento del ozono total en Colombia, ya que sirven para continuar evaluando su comportamiento y otros parámetros en la atmosfera en el país y en el trópico.

ANEXOS

Raquirá, Boyacá

ANEXO 1.
RECOMENDACIONES BÁSICAS DE PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (EXPOSICIÓN SALUDABLE AL SOL)

La exposición saludable a la radiación solar nos proporciona efectos fisiológicos positivos: estimula la síntesis de vitamina D, esta previene el raquitismo y la osteoporosis; favorece la circulación sanguínea; actúa en el tratamiento de algunas dermatosis y en algunos casos estimula la síntesis de los neurotransmisores cerebrales responsables del estado anímico. Sin embargo, la sobreexposición a la radiación solar puede generar implicaciones en la salud (por ejemplo cáncer de piel).

Es de resaltar que la región con menor contenido de ozono total a nivel global es la zona tropical que comprende amplios sectores del norte y centro de Suramérica, el Atlántico tropical y el centro de África, en estos se registran promedios por debajo de 240 UD. Debido a lo anterior, estas zonas, donde está incluida Colombia, están expuestas a los más altos niveles de radiación ultravioleta (UV) en superficie a nivel mundial durante todo el año. Por lo anterior se recomienda:

- La exposición al Sol sin protección es nociva, ya que produce manchas en la piel, envejecimiento, problemas oculares y aumenta el riesgo de desarrollar cáncer en la piel. ¡Protéjase!.
- Evite la exposición directa al Sol entre las 9 de la mañana y las 4 de la tarde. Cerca del 80 % de la radiación UV se recibe en este periodo.
- Incremente el tiempo de estadía bajo la sombra. Esta es una de las principales defensas contra la radiación solar.
- Evite las sobredosis de radiación UV. La quemadura solar es una señal de que su piel ha recibido, literalmente, una sobredosis de radiación UV.
- Use ropa protectora cuando se expone al Sol, es decir, camisa de manga larga y sombreros de ala ancha para proteger los ojos, la cara y el cuello. Use también sombrilla.
- No toda la ropa ofrece la protección adecuada contra la radiación UV. La industria textil ya produce telas con los códigos de Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta cuyo uso ha sido recomendado por la Fundación Mundial para el Cáncer de Piel. Los materiales como el algodón ofrecen una protección no mayor a 10, mientras que los filtros solares son de factor 15 o más.
- Protéjase los ojos con lentes oscuros que tengan protector UV y un diseño envolvente o con paneles laterales.
- No compre gafas en la calle. En lo posible adquiera aquellas que se ajusten a las especificaciones dadas por los especialistas. Acuda a sitios seguros y confiables.
- Proteja las orejas, labios, entorno de ojos, cuello, nuca, pies y manos, estas áreas corporales deben estar cubiertas y protegidas. Además cuidar cejas, párpados y labios, ya que son propensos a mancharse; estas manchas son de difícil manejo, la mayoría irreversibles, incluso con un tratamiento especializado.
- Los labios también son susceptibles al daño por exposición solar. El Sol puede ocasionarles resequedad, grietas y hasta heridas que sangran. Protéjalos con productos que contengan filtro solar.

- Si va a nadar utilice gafas especiales que tengan filtro UVB y UVA.
- Use protectores solares de amplio espectro en las piel con un factor de protección solar FPS desde 30, cuantas veces lo necesite, pero no caiga en el error de considerarlos tan seguros que le permitan incrementar la exposición al Sol. Tenga en cuenta que, si bien los protectores solares no previenen el cáncer, sí cuidan la piel de lesiones que con el tiempo pueden ser cancerígenas.
- El factor de protección solar (FPS, que señala el tiempo que puede estar una persona expuesta sin quemarse y varía dependiendo del tipo de piel) recomendado para las pieles más claras oscila entre 30 y 50, que filtra entre el 96% y el 98% de la radiación UVB; busque además que lo protejan de la radiación UVA. Esta última se representa mediante el uso de cruces en la etiqueta (3 es la máxima protección) o aparece expresada en las palabras alta y muy alta. Por último, de acuerdo con sus necesidades y actividades, confirme si son resistentes al agua y al sudor, si lo requiere.
- Aunque existen bloqueadores cuyos FPS llegan hasta 100, tenga en cuenta que esta no es una protección absoluta ya que deben reaplicarse cuantas veces sea necesario.
- Use protectores solares 30 minutos antes de la exposición solar y reaplique cada 2 a 4 horas. Por ejemplo, cada 2 horas en actividad física o en la playa, aunque diga que es a prueba de agua.
- Se debe evitar hacer ejercicio o exponerse al Sol durante el mediodía, porque así se utilicen las medidas descritas, habrá un grado de exposición inevitable.
- Aunque el cielo esté nublado puede quemarse. Las quemaduras y el cáncer de piel se deben al componente UV de los rayos del Sol y la radiación UV puede atravesar las nubes. Por lo anterior, se debe aplicar el protector solar sin importar si el día está nublado o no, o el tipo de actividad (deporte, trabajo, turismo).
- Evite las cámaras solares. Los rayos ultravioleta de estás cabinas fueron declarados cancerígenos por el Centro Internacional de Investigación sobre el cáncer, agencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Los bronceadores no protegen; por el contrario, tienen un FPS muy bajo y sensibilizan más la piel a la acción de los rayos UV. Si su intención es oscurecer la piel, expóngase al Sol durante varios días, por cortos periodos de tiempo, sin excederse y siempre utilizando protector solar.



Tarde soleada
Villa de Leyva,
Boyacá

- El consumo de determinados medicamentos, así como el uso de perfumes y desodorantes, puede sensibilizar la piel y ocasionar quemaduras graves al exponerse al Sol. Consulte a su médico.
- El daño causado por la sobreexposición solar es de carácter acumulativo y sus efectos pueden verse en cualquier momento de la edad adulta. Aunque las personas de piel clara sean más sensibles a la radiación UV (sobre todo si tienen muchos lunares, así como quienes tienen antecedentes familiares de cáncer en la piel), todas las personas deben protegerse de los rayos solares, incluso las personas de raza negra cuya piel tiene una defensa natural superior pero no suficiente para evitar los problemas futuros debido a la radiación.
- La exposición prolongada al Sol durante la infancia aumenta el riesgo de sufrir cáncer de piel, posteriormente, además puede ocasionar daños oculares graves. La piel de los infantes es muy delicada y suele quemarse rápidamente. Estas quemaduras, de manera repetida, son un factor de riesgo para el cáncer de piel ya que los problemas aparecen entre veinte y cuarenta años más tarde. Los niños requieren cuidados extra y aunque la protección es responsabilidad de los adultos, cuanto más temprano aprenden a cuidarse, más fácil incorporarán conductas saludables. Protéjase y dé ejemplo.
- Los niños menores de un año nunca deben exponerse directamente al Sol. Se deben proteger con gorros y ropa ligera de algodón.
- La mayor parte de la exposición a la radiación UV a lo largo de toda su vida, habrá ocurrido antes de los 18 años. Proteja a sus hijos; tendrán una piel más sana y de aspecto más joven toda la vida. Si no se ha realizado una adecuada protección, después de los 20 años comienza a notarse el envejecimiento, ya que paulatinamente hay disminución en la producción de colágeno y elastina, recambio celular y eliminación de células muertas. En ese momento van apareciendo signos como arrugas finas, piel delgada y otros cambios que hacen que la piel se torne flácida.
- Después de tomar el Sol dúchese y aplíquese una crema humectante.
- Si después de tomar el Sol su piel luce roja considérese insolado aun cuando no sienta dolor. Esa tonalidad (eritema) obedece a una respuesta inflamatoria a la irritación causada por los rayos UV, lo que quiere decir que ya tiene afectado el tejido expuesto y que requiere aliviar. Sin embargo, su efecto se hace acumulativo a nivel de las estructuras internas de las capas de la piel. En este caso, suspenda por varios días la exposición al Sol y aplíquese sustancias hidratantes como geles de aloe vera, consuma mucha agua, la piel debe hidratarse también desde adentro. Evite el uso de ropa u otros productos que generen molestia, ya que la piel se encuentra lastimada y requiere tiempo para recuperarse.
- Si su piel además de roja, arde y duele, no se automedique. Consulte con su médico, ya que puede tratarse de una quemadura de mayor gravedad.
- Recuerde que, aunque no sienta el calor del Sol, sus rayos pueden dañar la piel y los ojos. Los daños los produce la radiación UV, ya que ni se ve ni se siente, así que no se deje engañar por las temperaturas suaves.
- Se aconseja consumir alimentos con un alto contenido de antioxidantes, como las frutas y vegetales frescos, especialmente verdes y oscuros como la espinaca y los amarillos. Asimismo, se recomienda un generoso consumo de agua.
- También es importante incrementar la ingesta de carotenos (que se encuentran en alimentos de coloración anaranjada o rojiza) y de aceites esenciales omega 3 (en pescados y frutos secos).
- A las autoridades locales se les recomienda incrementar la siembra de árboles en las ciudades y municipios, para aumentar la sombra con el fin de proteger a las personas expuestas al Sol. También se recomienda que los estudiantes (de jardines, escuelas, colegios y universidades) no realicen actividades físicas y culturales al aire libre, ojalá estas se hagan en sitios cubiertos como coliseos, polideportivos, entre otros. Si es inevitable realizar actividades al aire libre, se debe prohibir que estas se realicen entre las 10 de la mañana y las 4 de la tarde y que los estudiantes pongan en práctica las recomendaciones mencionadas.
- El pronóstico del índice UV (IUV) para 42 ciudades del país (en el supuesto de cielo despejado), se puede consultar en la página web del IDEAM. http://modelos.ideam.gov.co/atmosfera/indice-uv/

ANEXO 2.
CONOCIMIENTOS BÁSICOS SOBRE LA RADIACIÓN UV Y SU RELACIÓN CON EL OZONO

- El Sol emite una gran cantidad de energía a la Tierra, de la cual entre el 6 a 7 % corresponde a la radiación ultravioleta (UV).
- La radiación ultravioleta (UV) es clasificada en tres categorías de acuerdo con la longitud de onda (UV-C, UV-B y UV-A).
- La radiación UV-C es la de menor longitud de onda y biológicamente es la más dañina, pero es absorbida totalmente en la atmósfera.
- El 90 % de la radiación UV-B es absorbida en la atmósfera, mientras que la radiación UV-A es débilmente absorbida, pero es la menos dañina.
- La radiación UV que alcanza la superficie de la Tierra está compuesta en gran parte por la radiación UV-A (95 %) y en menor grado por la UV-B (5 %).
- La radiación UV que alcanza la troposfera es el motor de todos los procesos fotoquímicos en las capas bajas de la atmósfera de la Tierra.
- La radiación UV procedente del Sol (particularmente la UV-B), es peligrosa en las salud humana, los animales y las plantas, incluyendo el plancton marino.
- En dosis apropiadas, la radiación UV-A y UV-B beneficia ciertas funciones de los organismos vivos, pero en dosis excesivas y acumulativas sus consecuencias pueden ser perjudiciales.
- La radiación ultravioleta, procedente del Sol, puede incrementar los casos de cáncer en la piel, cataratas y afectar el sistema inmunológico en los humanos.
- La radiación ultravioleta puede causar el envejecimiento prematuro de la piel y su oscurecimiento.
- El ozono es de vital importancia porque protege la vida del planeta, constituyéndose en el principal filtro de la radiación ultravioleta proveniente del Sol.
- La cantidad de radiación UV-B en la superficie de un lugar, está inversamente relacionada con el ozono total: a menor cantidad de ozono mayor radiación UV-B ingresa a la superficie y viceversa.
- El ozono se encuentra desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 70 kilómetros, pero la máxima concentración se presenta entre los 18 y 40 kilómetros, región conocida como la capa de ozono.
- En el tope de la atmósfera de los trópicos, los mayores niveles de radiación están generalmente a comienzo del año, durante el perihelio (que es cuando la Tierra está más cerca al Sol) y los más bajos a mitad del año durante el afelio (cuando la Tierra está más alejada del Sol).
- Los vientos estratosféricos pueden transportar el ozono fuera de la región de producción, alterando de esta manera la distribución básica del ozono; por esta razón, en los trópicos no se encuentran los mayores valores de ozono en la columna atmosférica.
- La zona con menor contenido de ozono total en el ámbito mundial es la tropical sobre el norte y centro de Suramérica, la región oriental de la cuenca ecuatorial del Océano Pacífico Tropical, el Atlántico tropical y África central, en donde se registran promedios por debajo de 240 UD. Debido a lo anterior,

estas zonas, donde está incluida Colombia, están expuestas a altos niveles de radiación ultravioleta en superficie durante todo el año.

- Durante el periodo de diciembre a marzo se registran los valores más bajos de la columna de ozono en el país, por lo tanto, es la época del año en la cual Colombia recibe mayor radiación ultravioleta en su superficie.
- La radiación UV varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial (como es el caso de Colombia) los rayos solares inciden más directamente que en las latitudes medias y altas y la radiación UV resulta ser más intensa en esa área.
- La altitud determina la cantidad de radiación UV que se recibe, debido a que en las zonas de alta montaña el aire es más limpio y es más delgada la capa atmosférica que los rayos solares recorren; por ello llega más radiación UV. De manera que a mayor altitud mayor radiación UV.
- En la atmósfera la intensidad de la radiación UV aumenta aproximadamente un 10 % con cada 1.000 metros de incremento de altitud. Debido a lo anterior las personas que viven a más de dos mil metros sobre el nivel del mar tienen mayores posibilidades de desarrollar cáncer de piel, en comparación con quienes viven en zonas bajas o en las costas.
- El agua, la nieve y la arena reflejan los rayos solares y pueden incrementar la dosis de radiación UV recibida y se pueden producir quemaduras en la piel, incluso estando bajo la sombra. La nieve es la superficie que más refleja radiación UV, alcanzando hasta un 80 %, mientras que el concreto refleja hasta un 12 %, la arena seca de playa el 15 % y el agua de mar el 25 %.
- Colombia, por su ubicación geográfica sobre el trópico y por sus grandes altitudes sobre la cordillera de los Andes, presenta un riesgo alto debido a la exposición a la radiación ultravioleta.
- Las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación UV que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más que una delgada.
- La contaminación trabaja en forma similar que las nubes, por ejemplo en zonas urbanas reduce la cantidad de radiación UV que llega a la superficie de la Tierra.
- El índice de Radiación Ultravioleta (IUV) es usado como un indicador asociado a la intensidad de la radiación solar ultravioleta (UV-B) incidente sobre la superficie de la Tierra con los posibles daños en la piel humana.
- El índice UV alcanza los niveles más altos alrededor del mediodía y cuanto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares.
- Desde diciembre a marzo, meses en los cuales predomina el tiempo seco en gran parte del país, es típico que se presenten en promedio valores de 9 y 10 para el IUV (catalogados como de riesgo), en el lapso de 10 de la mañana a las 4 de la tarde, pero además, cuando se presentan cielos despejados, se pueden llegar a presentar valores de 11, 12 y más en el IUV, este valor es catalogado como de muy alto riesgo de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Se recomienda evitar la exposición al Sol por periodos superiores a 15 minutos durante el periodo comprendido entre diciembre y marzo, especialmente, en las horas del mediodía, así como protegerse de los rayos solares usando protectores.

ANEXO 3.

PROMEDIOS MENSUALES DE LA IRRADIACIÓN GLOBAL ACUMULADA DIARIA RECIBIDA EN SUPERFICIE EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL PAÍS (Wh/m² POR DÍA)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m)	Valor promedio (Wh/m2)												Promedio anual	Periodo de Información (Años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	-4,19	-69,94	84	4248,1	3980,1	3853,4	4068,3	3843,2	3783,9	4014,6	4739,4	5038,0	4713,3	4802,1	4457,7	4295,2	ago-14 a dic-16 (3)
Metromedellin	Medellín	Antioquia	6,33	-75,55	1440	4423,3	4598,0	4356,7	4346,0	4345,7	4850,1	4976,5	4848,7	4890,8	4262,0	4188,7	4285,0	4530,9	jul-05 a dic-16 (9)
Aeropuerto Santiago Pérez	Arauca	Arauca	7,07	-70,74	128	5156,3	4484,1	4617,1	4371,2	4292,6	4204,0	4299,1	4416,1	4895,9	4702,5	4786,5	5212,4	4619,8	ene-86 a ene-92 (4)
Las Flores (ENAVAL)	Barranquilla	Atlántico	11,04	-74,82	8	6213,4	6027,1	6297,6	5660,4	5566,3	5679,1	5888,9	5676,3	5194,6	4720,0	4767,6	5524,8	5601,4	nov-09 a dic-16 (5)
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	Bolívar	10,45	-75,52	2	5987,7	6412,9	6378,8	6012,8	4951,4	4988,7	5644,2	5213,1	5291,3	5014,5	4988,2	5746,8	5552,5	feb-90 a dic-00 (7)
UPTC	Tunja	Boyacá	5,54	-73,36	2690	5061,0	4979,7	4855,5	4479,6	4198,1	4143,0	4167,1	4245,5	4412,5	4537,3	4341,2	4548,1	4497,4	dic-92 a dic-02 (7)
EMAS	Manizales	Caldas	5,09	-75,51	2211	4115,9	4050,6	3783,4	3673,3	3507,9	3584,5	4045,7	4003,8	4114,2	3705,6	3522,3	3756,8	3822,0	may-05 a dic-16 (12)
Macagual - Florencia	Florencia	Caquetá	1,50	-75,66	280	4082,3	3952,6	3349,6	3485,4	3004,8	3193,8	3137,7	3577,7	3770,0	4001,1	3997,9	4019,1	3631,0	jul-05 a dic-16 (6)
Aeropuerto Yopal (El Alcaraván)	Yopal	Casanare	5,32	-72,39	325	5769,2	5396,2	4889,9	4512,0	4433,6	4357,4	4283,5	4528,4	5192,6	5130,1	5183,4	5521,8	4933,2	nov-09 a dic-16 (6)
Fedearroz	Valledupar	Cesar	10,46	-73,25	184	5494,1	5791,0	5531,7	5629,6	5402,5	5648,3	5716,7	5482,4	5202,8	4982,6	4973,7	5227,5	5423,6	sep-05 a dic-16 (11)
Montería (pertenece a Fedearroz)	Montería	Córdoba	8,81	-75,85	17	4345,6	4389,8	4371,3	4173,9	3873,2	4337,5	4770,2	4429,5	4292,2	3923,6	4018,9	4039,2	4247,1	oct-11 a abr-14 (4)
Aeropuerto El Dorado	Bogotá	Cundinamarca	4,71	-74,15	2547	4681,9	4312,7	4322,2	3716,7	3506,0	3658,9	3917,3	4168,2	3947,8	3961,0	4017,7	4241,4	4037,7	mar-81 a dic-04 (23)
Inírida	Inírida	Guainía	4,02	-67,67	90	4500,1	4327,1	3939,4	4140,2	3634,7	3628,7	3542,4	3891,2	4257,1	4117,2	4079,2	4202,1	4021,6	feb-97 a sep-02 (4)
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	4836,0	4700,4	4590,5	4628,9	4552,2	4550,1	4509,7	4656,6	4785,1	4782,3	4607,8	4618,0	4651,5	mar-90 a ago-03 (14)
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	5202,8	5556,0	5761,0	5898,3	5618,0	5975,8	6237,6	6045,2	5832,8	5247,8	4977,5	4916,6	5605,8	sep-91 a abr-03 (10)
Universidad Tecnológica de Magdalena	Santa Marta	Magdalena	11,22	-74,19	7	5746,9	6080,3	6082,1	6079,9	5874,5	5736,6	5689,1	5368,1	5492,3	4885,7	4803,0	5438,5	5606,4	sep-07 a dic-16 (8)
ICA Villavicencio	Villavicencio	Meta	4,14	-73,63	444	5207,4	4741,5	4375,9	4406,6	4422,1	4242,6	4358,1	4585,2	5264,7	5103,4	4817,3	4925,0	4704,1	mar-07 a dic-16 (10)
La Botana	Pasto	Nariño	1,16	-77,28	2820	3876,0	3552,8	3479,0	3688,7	3679,0	3712,3	3895,7	4001,2	4131,4	3844,9	3843,9	3581,7	3773,9	may-05 a dic-16 (11)
Universidad. Francisco de Paula Santander	Cúcuta	N. de Santander	7,90	-72,49	311	5023,1	5141,9	4711,7	4972,9	5453,6	5323,9	5431,6	5720,8	6156,4	5574,6	5230,6	4878,5	5301,6	ene-06 a dic-16 (10)
El Pepino	Mocoa	Putumayo	1,08	-76,67	760	3622,2	3476,3	3157,7	3535,5	3321,2	2862,8	3124,2	3181,6	3744,4	3974,3	3941,0	3876,3	3484,8	ago-05 a dic-16 (8)
Armenia	Armenia	Quindío	4,53	-75,69	1485	4144,2	4133,6	4057,0	3909,2	3724,8	3889,2	4358,1	4399,0	4522,1	4003,4	4048,4	3782,7	4081,0	feb-06 a dic-16 (10)
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,82	-75,74	1342	4279,4	4406,3	4283,9	4099,7	3805,1	3940,5	4243,6	4362,0	4273,2	4338,6	4183,3	4315,4	4210,9	oct-90 a nov-96 (7)
Aeropuerto Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés y Providencia	12,54	-81,73	1	5242,0	5953,9	6481,5	6038,1	5649,6	4930,9	5580,0	5274,8	5103,3	4726,5	4295,7	4480,7	5313,1	jul-14 a dic-16 (2)
Unisucre (Puerta Roja)	Sincelejo	Sucre	9,32	-75,39	160	4843,9	4986,3	4794,7	4343,1	3899,6	4510,0	4530,5	4517,6	4324,5	3996,1	3750,6	4265,7	4396,9	may-05 a dic-16 (5)
Batallón Rooke	Ibagué	Tolima	4,42	-75,25	1323	4507,5	4546,5	4579,5	4532,9	4556,0	4985,6	5160,3	4981,7	5088,1	4678,5	4230,7	4303,7	4679,2	dic-06 a dic-16 (8)
Univalle	Cali	Valle del Cauca	3,38	-76,53	996	4568,8	4564,6	4526,2	4436,4	4313,3	4488,6	4762,9	4829,9	4794,9	4474,3	4224,7	4267,7	4521,0	nov-06 a dic-16 (9)

ANEXO 4.

PROMEDIOS HORARIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GLOBAL MEDIA RECIBIDA EN SUPERFICIE PARA ALGUNAS CIUDADES DEL PAÍS (Wh/m²)

Tabla 1. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Armenia (Armenia) en Wh/m².

ESTACIÓN ARMENIA (ARMENIA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
1-2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2-3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
4-5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5-6	0,2	0,2	0,2	0,7	1,1	0,7	0,5	0,5	1,0	1,4	1,2	0,5
6-7	21,3	18,3	27,5	40,0	44,6	47,8	40,6	40,4	53,9	53,6	47,0	32,0
7-8	136,0	118,7	130,4	154,5	156,2	171,4	165,8	173,5	203,5	183,8	173,5	153,1
8-9	291,0	270,3	282,9	297,3	299,2	311,4	318,2	324,5	360,8	338,7	341,7	304,5
9-10	421,0	421,0	431,8	419,7	415,2	419,0	463,7	477,2	496,6	471,5	487,6	429,9
10-11	506,3	522,8	534,4	510,9	487,3	497,9	572,6	581,0	596,6	539,9	554,2	499,7
11-12	548,7	562,8	573,0	538,0	508,6	505,0	569,9	609,0	631,6	565,1	573,3	539,7
12-13	569,2	588,7	560,4	555,9	527,2	547,0	595,8	585,4	626,1	556,3	575,8	524,8
13-14	562,5	563,9	526,1	504,2	467,9	484,1	549,2	549,2	560,4	491,0	499,0	492,8
14-15	482,8	454,7	440,2	399,0	375,6	392,1	450,0	452,4	445,7	390,3	389,5	391,0
15-16	356,3	339,7	313,4	290,6	260,1	291,2	350,1	338,4	327,4	266,5	264,9	289,2
16-17	190,3	206,6	177,7	152,6	141,9	168,8	207,3	206,4	177,6	124,0	121,0	149,8
17-18	57,7	63,9	57,6	45,2	39,2	51,3	72,0	59,9	40,5	21,0	19,0	29,4
18-19	0,9	2,1	1,4	0,8	0,6	1,3	2,3	1,2	0,3	0,2	0,8	0,3
19-20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
20-21	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
21-22	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
22-23	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
23-0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Acumulada diaria	4144,2	4133,6	4057,0	3909,2	3724,8	3889,2	4358,1	4399,0	4522,1	4003,4	4048,4	3836,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 2. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Las Flores (Barranquilla) en Wh/m².

ESTACION LAS FLORES (BARRANQUILLA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
2-3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
3-4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
4-5	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0
5-6	0,1	0,2	0,1	1,0	3,7	4,1	2,1	1,4	1,8	1,3	0,5	0,1
6-7	21,2	18,2	37,2	65,6	88,8	83,4	80,8	77,6	78,6	74,2	63,9	39,8
7-8	166,0	127,2	173,6	226,5	257,6	242,1	208,5	230,9	253,3	255,8	248,8	220,1
8-9	403,6	326,4	392,7	447,7	459,2	452,1	412,5	442,7	475,2	453,6	463,1	437,5
9-10	645,1	573,7	660,8	694,7	662,0	645,9	628,7	654,2	655,6	622,3	617,7	629,9
10-11	822,7	770,6	807,9	814,3	680,6	718,1	774,3	750,2	702,3	644,7	658,0	769,3
11-12	879,3	823,1	826,1	781,7	718,6	733,9	839,2	760,3	672,4	619,8	617,2	781,6
12-13	878,1	876,7	827,2	745,7	689,0	736,5	780,4	742,0	627,9	564,5	600,1	768,5
13-14	846,3	844,6	821,5	645,7	675,1	708,1	731,7	652,9	609,1	550,5	603,2	723,2
14-15	715,5	741,5	794,7	553,5	599,2	612,5	636,8	603,2	550,7	454,7	466,5	588,9
15-16	518,1	545,1	566,0	384,5	421,8	418,7	443,8	432,0	343,8	313,5	294,4	379,1
16-17	267,1	301,9	307,0	225,4	242,6	236,7	262,1	246,0	180,7	145,8	122,8	167,8
17-18	50,1	77,2	82,5	73,7	67,0	82,3	98,0	79,7	42,9	19,3	11,2	19,1
18-19	0,2	0,7	0,3	0,5	1,3	4,6	6,1	3,2	0,2	0,1	0,2	0,0
19-20	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0
20-21	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
21-22	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
22-23	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
23-0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0
Acumulada diaria	6213,4	6027,1	6297,6	5660,4	5566,3	5679,1	5905,1	5676,3	5194,6	4720,0	4767,6	5524,8

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 3. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Universidad Nacional (Bogotá) en Wh/m2.

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
1-2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2
2-3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2
3-4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2
4-5	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2
5-6	0,1	0,1	0,2	1,2	2,7	1,7	1,1	1,0	2,3	2,8	2,4	0,6
6-7	33,9	30,4	41,3	54,3	69,7	67,7	55,2	54,4	64,9	71,5	72,4	55,9
7-8	199,5	171,2	152,6	179,4	197,3	201,6	201,3	184,4	181,1	209,8	218,2	216,3
8-9	381,4	352,2	282,1	304,7	314,7	309,9	322,6	303,4	280,4	362,5	381,9	384,1
9-10	554,4	509,5	393,1	370,1	413,7	414,1	421,4	418,5	391,6	479,0	488,4	504,3
10-11	662,7	588,9	528,5	443,7	459,8	483,2	491,7	490,2	466,9	524,4	547,5	554,2
11-12	659,8	613,2	566,6	482,7	499,3	522,9	519,7	525,5	537,1	505,5	505,6	545,2
12-13	634,8	547,0	495,3	465,5	512,5	511,2	550,2	532,7	551,0	499,5	430,9	482,8
13-14	576,8	524,5	461,7	447,2	468,8	503,4	517,7	508,7	503,4	437,6	385,5	447,6
14-15	450,7	426,7	400,3	365,3	386,9	430,0	429,5	438,6	435,0	377,1	301,2	384,2
15-16	344,6	298,0	283,8	265,6	285,8	311,1	314,0	328,1	323,3	261,5	195,6	273,1
16-17	195,2	166,4	160,8	162,5	165,9	182,7	189,9	187,3	179,8	138,8	97,5	143,6
17-18	56,4	62,1	53,8	42,7	42,3	50,0	61,9	54,3	42,2	21,2	13,6	26,7
18-19	0,3	0,7	0,4	0,1	0,1	0,3	0,9	0,5	0,2	0,1	0,2	0,2
19-20	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
20-21	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
21-22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
22-23	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
23-0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1
Acumulada diaria	4750,5	4291,0	3820,4	3584,9	3819,4	3989,8	4077,0	4027,6	3959,1	3891,4	3640,9	4018,9

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 4. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Universidad del Valle (Cali) en Wh/m².

ESTACION UNIVERSIDAD DEL VALLE (CALI)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
1-2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
2-3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
3-4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
4-5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5-6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,7	0,7	0,5	0,4	0,8	1,6	1,2	0,6
6-7	19,0	17,3	23,9	32,5	40,4	37,3	31,9	32,0	43,4	51,0	42,0	28,9
7-8	108,9	101,5	114,9	136,6	141,1	149,7	145,1	151,5	166,7	174,9	150,1	129,7
8-9	262,8	250,9	268,7	302,6	288,0	311,5	312,2	318,1	363,0	347,3	324,4	287,3
9-10	470,0	443,0	459,3	478,3	466,7	489,0	494,1	508,2	558,9	534,7	494,8	474,2
10-11	630,9	628,7	625,5	619,3	607,3	615,1	636,4	658,8	701,2	655,3	607,0	614,9
11-12	707,3	687,3	706,9	682,9	655,6	658,8	693,9	706,4	748,2	688,0	647,2	662,2
12-13	690,2	697,1	690,8	672,7	643,9	640,5	697,2	698,3	708,3	667,5	620,8	658,2
13-14	608,4	634,4	602,1	584,8	571,0	570,0	626,8	642,7	568,0	555,6	542,4	548,0
14-15	479,0	498,4	463,0	437,9	431,0	451,1	477,9	495,2	434,9	403,7	395,3	409,7
15-16	349,5	342,3	332,5	293,9	276,7	326,5	352,0	338,4	298,7	257,3	259,1	283,5
16-17	190,5	201,2	181,7	151,1	149,5	181,2	219,3	212,8	162,8	116,1	120,2	141,7
17-18	50,5	59,5	54,3	42,8	40,7	55,9	73,2	65,5	39,7	20,9	20,2	28,5
18-19	1,2	2,5	2,0	0,6	0,5	1,4	2,4	1,6	0,3	0,2	0,1	0,2
19-20	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
20-21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
21-22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
22-23	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
23-0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Acumulada diaria	4568,8	4564,6	4526,2	4436,4	4313,3	4488,6	4762,9	4829,9	4794,9	4474,3	4224,7	4267,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 5. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta) en Wh/m².

ESTACION UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER (CÚCUTA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
2-3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
3-4	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
4-5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4
5-6	0,1	0,1	0,3	2,4	5,7	5,2	3,0	2,6	3,6	4,1	2,8	0,7
6-7	31,7	29,8	38,9	66,6	88,7	88,2	78,6	74,2	91,4	91,8	85,1	50,6
7-8	164,5	152,9	147,4	220,2	262,8	267,4	258,8	281,7	320,1	286,3	269,8	195,9
8-9	367,7	346,1	321,8	410,2	469,6	451,8	439,0	490,5	551,4	522,0	499,7	404,9
9-10	578,3	562,2	495,6	631,6	648,9	626,8	632,2	685,5	747,6	719,3	689,2	595,8
10-11	716,5	712,0	617,4	625,2	700,0	635,6	652,1	693,0	787,3	734,4	766,2	684,1
11-12	747,4	710,4	631,2	635,8	711,0	682,1	663,8	679,7	786,8	772,1	779,2	734,6
12-13	746,6	734,2	674,3	651,3	707,3	661,3	687,8	733,5	796,6	769,1	721,3	704,4
13-14	693,7	727,1	660,8	627,0	688,7	651,8	678,4	710,2	775,8	730,6	643,6	667,6
14-15	535,2	605,7	546,9	551,1	583,0	591,1	615,8	649,1	668,9	549,7	476,7	508,6
15-16	296,2	364,9	372,5	356,7	379,2	410,7	444,6	450,5	428,6	276,2	209,5	227,5
16-17	122,5	161,9	173,4	162,7	174,8	202,5	220,4	222,1	174,2	109,4	81,3	93,7
17-18	22,6	34,3	31,1	32,0	33,6	49,2	56,6	48,0	24,1	9,5	5,8	9,8
18-19	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
19-20	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Acumulada diaria	5023,1	5141,9	4711,7	4972,9	5453,6	5323,9	5431,6	5720,8	6156,4	5574,6	5230,6	4878,5

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 6. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Macagual (Florencia) en Wh/m².

ESTACION MACAGUAL (FLORENCIA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,6	1,6	1,7	0,5
6-7	26,8	20,3	21,8	32,2	34,9	30,8	30,0	33,8	46,2	60,5	63,9	86,4
7-8	123,4	103,3	88,7	117,2	110,5	96,5	102,4	122,5	147,6	174,9	184,0	147,3
8-9	261,1	247,7	180,8	230,3	204,9	203,4	206,4	240,3	292,5	308,1	328,2	286,7
9-10	395,9	372,8	278,0	308,4	292,5	293,2	311,1	343,1	389,9	449,1	458,7	422,9
10-11	517,1	519,8	444,3	443,6	376,7	407,2	387,3	432,0	497,6	556,9	571,2	545,8
11-12	588,7	585,6	521,0	515,8	413,4	432,6	409,4	475,9	517,9	605,2	598,3	605,6
12-13	612,6	595,3	545,2	522,5	416,4	452,7	417,5	531,0	536,7	588,2	584,2	601,6
13-14	573,8	561,5	456,1	480,0	415,7	419,4	407,8	468,8	456,4	502,3	504,7	525,9
14-15	460,7	409,7	363,9	377,8	333,9	369,5	360,3	408,6	404,8	347,4	359,9	386,9
15-16	308,1	298,6	244,7	270,4	239,7	273,2	283,5	297,1	276,0	251,3	214,6	258,7
16-17	163,5	184,9	157,6	148,3	132,3	171,8	170,3	169,7	164,5	131,0	108,1	124,6
17-18	50,2	51,8	47,0	38,8	33,4	43,1	51,2	54,1	38,9	24,5	20,3	26,0
18-19	0,3	1,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	0,4	0,2	0,1	0,2
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4082,3	3952,6	3349,6	3485,4	3004,8	3193,8	3137,7	3577,7	3770,0	4001,1	3997,9	4019,1

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 7. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Batallón Rooke (Ibagué) en Wh/m².

ESTACION BATALLON ROOKE (IBAGUE)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,1	0,0	0,0	0,3	1,0	0,5	0,2	0,2	0,7	2,2	1,1	0,1
6-7	21,6	21,5	32,8	46,4	59,1	64,6	57,5	52,0	60,3	62,5	52,5	30,6
7-8	121,3	124,9	148,0	158,7	191,3	216,8	212,3	194,2	208,8	211,9	192,2	157,0
8-9	272,6	265,0	294,6	314,5	346,2	380,0	377,8	360,8	381,3	365,8	340,5	302,7
9-10	394,5	392,2	438,7	434,2	465,5	515,6	530,7	511,2	503,3	484,9	432,9	414,1
10-11	522,6	522,5	543,8	556,7	551,6	567,7	624,4	604,7	621,9	583,9	547,7	527,3
11-12	642,9	629,2	632,7	605,1	617,3	672,8	665,1	630,9	682,9	648,4	597,9	617,1
12-13	662,9	672,0	631,4	628,9	632,7	721,3	728,4	709,0	724,9	666,4	611,0	640,7
13-14	654,3	655,9	629,2	635,2	606,8	661,1	674,5	676,7	696,5	629,0	572,4	609,3
14-15	560,3	558,8	549,1	537,0	512,5	540,6	559,1	555,3	565,4	508,9	454,6	500,0
15-16	393,0	411,9	399,0	377,8	348,0	378,7	416,5	395,3	393,0	343,9	293,7	323,3
16-17	209,1	230,6	220,9	193,3	181,1	212,1	240,1	228,7	208,5	150,8	118,5	153,6
17-18	51,9	61,1	58,5	44,8	42,6	53,3	72,3	62,1	40,5	19,6	15,5	27,8
18-19	0,4	1,0	0,8	0,2	0,2	0,5	1,4	0,6	0,2	0,2	0,1	0,2
19-20	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4507,5	4546,5	4579,5	4532,9	4556,0	4985,6	5160,3	4981,7	5088,1	4678,5	4230,7	4303,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 8. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Sutron Inírida (Inírida) en Wh/m².

ESTACION INIRIDA (INIRIDA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	4,1	2,6	5,8	9,8	11,1	18,3	22,3	12,4	7,9	10,6	17,4	18,5
6-7	73,6	67,1	77,7	84,6	80,8	95,8	90,0	80,6	74,1	87,6	101,4	111,5
7-8	215,9	208,7	205,3	211,1	200,9	195,3	202,4	196,2	195,6	223,7	220,5	281,7
8-9	369,8	349,6	331,6	348,9	331,6	316,4	310,8	341,0	336,6	365,9	376,4	445,4
9-10	555,6	528,5	509,9	459,9	430,5	442,9	412,9	450,1	459,9	485,1	560,6	586,6
10-11	642,1	612,2	582,6	539,5	476,5	489,9	473,5	509,0	539,3	569,0	634,5	593,6
11-12	642,3	610,2	652,9	607,4	554,6	550,6	548,5	558,6	603,0	620,9	627,0	588,5
12-13	629,2	602,2	545,4	643,1	503,3	514,5	486,1	538,8	609,8	579,3	595,4	570,2
13-14	552,3	539,5	433,8	507,4	424,1	428,9	416,7	522,5	539,1	495,8	416,3	484,7
14-15	440,3	470,1	292,3	383,8	321,6	287,0	332,7	380,9	453,4	360,0	303,9	351,5
15-16	259,8	226,5	194,8	252,1	202,1	183,9	213,0	255,3	294,8	227,5	167,2	130,5
16-17	108,1	97,8	100,8	88,3	82,9	81,3	88,6	109,8	136,6	93,1	61,1	45,5
17-18	12,2	17,6	14,1	10,1	8,7	6,0	4,6	12,3	13,7	5,9	2,5	1,0
18-19	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4505,4	4332,7	3947,3	4146,0	3628,8	3610,9	3602,2	3967,6	4264,0	4124,5	4084,5	4209,3

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 9. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Aeropuerto Vásquez Cobo (Leticia) en Wh/m².

ESTACION APTO. VASQUEZ COBO (LETICIA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
5-6	2,9	1,4	1,4	4,2	3,6	1,7	1,2	2,6	6,5	13,9	16,8	9,4
6-7	57,7	45,3	40,5	51,9	60,5	42,9	40,5	50,2	81,8	94,5	98,4	75,4
7-8	153,5	131,5	127,5	171,2	195,5	183,3	186,5	238,4	238,5	249,7	216,1	178,6
8-9	286,9	260,4	251,2	331,0	326,2	342,3	328,2	421,7	407,3	444,3	452,6	366,4
9-10	476,2	452,5	371,3	442,8	462,4	445,2	465,8	592,5	582,6	568,7	629,9	526,6
10-11	547,5	518,5	501,0	523,4	499,3	488,6	536,7	679,3	701,9	630,1	679,2	580,5
11-12	606,2	632,0	515,3	570,1	547,0	484,3	564,3	681,0	734,3	676,5	662,0	612,7
12-13	614,6	561,9	570,2	590,9	534,5	498,8	575,9	632,6	721,5	654,8	659,9	642,2
13-14	553,1	452,9	574,3	538,5	501,9	475,9	484,0	571,3	624,4	583,0	565,8	566,8
14-15	461,1	403,9	436,2	428,6	367,5	422,2	406,1	432,0	489,7	421,0	445,9	447,3
15-16	294,8	303,1	285,4	278,3	235,4	265,4	276,8	293,9	304,7	266,6	263,7	300,3
16-17	160,4	175,9	148,9	124,2	100,2	120,7	133,5	127,5	131,7	102,7	103,6	133,2
17-18	33,2	40,6	30,1	13,2	8,9	12,6	15,3	16,5	13,1	7,3	8,1	18,2
18-19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4248,1	3980,1	3853,4	4068,3	3843,2	3783,9	4014,6	4739,4	5038,0	4713,3	4802,1	4457,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 10. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Metromedellín (Medellín) en Wh/m².

ESTACION METROMEDELLIN (MEDELLÍN)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,4	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1-2	0,3	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2-3	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
3-4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
4-5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5-6	0,2	6,1	0,4	0,3	0,7	0,6	0,3	0,2	0,5	0,7	0,6	0,2
6-7	21,0	20,5	27,4	38,2	46,5	48,5	40,8	37,3	47,2	46,8	42,9	27,5
7-8	127,0	130,1	129,5	165,9	175,9	181,9	168,2	160,6	186,3	184,1	182,5	159,1
8-9	283,5	302,2	290,2	326,9	343,7	363,5	347,7	344,1	366,9	361,7	357,7	334,6
9-10	427,7	465,6	440,3	505,0	498,8	519,5	514,6	519,1	551,1	516,5	517,4	481,3
10-11	565,7	596,1	565,3	617,0	603,3	605,3	642,4	656,2	675,8	621,3	619,4	590,1
11-12	601,2	633,2	643,3	643,7	624,0	658,7	681,1	667,1	709,6	639,4	632,2	626,7
12-13	646,4	646,7	693,6	629,8	604,3	678,9	696,9	677,3	710,0	631,8	632,4	646,7
13-14	612,9	655,5	600,1	562,6	540,1	638,2	658,0	623,4	622,2	531,6	508,0	570,9
14-15	519,4	535,0	491,4	444,0	441,7	526,0	547,6	510,9	494,3	376,3	370,5	432,8
15-16	370,9	367,9	325,5	255,9	286,5	367,8	394,2	372,7	324,3	232,7	227,7	272,4
16-17	208,3	212,2	130,7	125,6	143,5	205,1	218,1	217,9	170,1	105,8	96,2	124,8
17-18	43,0	59,2	38,5	30,3	36,0	54,5	64,1	59,9	35,6	12,9	11,5	19,1
18-19	1,5	2,7	1,9	1,0	0,7	1,6	2,5	1,9	1,0	0,5	0,5	0,8
19-20	0,9	1,1	0,6	0,4	0,3	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6
20-21	0,8	0,9	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5
21-22	0,7	0,8	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4
22-23	0,5	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
23-0	0,4	0,6	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3
Acumulada diaria	4428,9	4633,0	4378,1	4346,0	4345,7	4850,1	4976,5	4848,7	4894,8	4262,1	4199,5	4287,0

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 11. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Montería (Montería - pertenece a Fedearroz) en Wh/m².

ESTACION MONTERIA DE FEDEARROZ (MONTERIA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,2	0,2	1,2	0,3	0,9	1,8	0,8	0,2	0,1	0,4	0,2	0,7
6-7	27,9	27,6	42,3	45,3	38,7	48,5	36,8	33,7	29,4	46,2	36,7	40,1
7-8	135,5	142,0	161,3	166,6	118,8	132,5	135,4	126,7	109,5	150,0	135,4	160,5
8-9	295,5	306,6	323,5	312,0	241,5	287,5	305,1	279,5	232,5	306,8	273,7	326,5
9-10	460,2	473,6	478,9	461,4	338,1	410,9	436,7	406,4	386,6	442,2	416,5	488,0
10-11	597,6	585,3	600,4	557,0	491,7	512,0	582,2	576,9	509,5	524,5	525,7	563,0
11-12	663,8	630,8	632,5	593,7	573,1	612,2	656,2	615,4	604,3	583,0	618,7	620,4
12-13	649,7	655,5	601,4	609,2	544,4	624,3	648,4	619,4	637,3	583,4	618,2	589,6
13-14	574,4	619,0	552,5	542,9	553,4	599,5	658,7	627,9	631,7	524,7	550,1	524,4
14-15	499,6	495,7	458,9	411,4	442,3	493,0	562,1	515,4	539,5	418,6	448,4	409,0
15-16	311,8	300,7	315,3	268,0	292,0	346,7	395,4	359,6	362,5	220,5	257,7	231,6
16-17	107,8	118,7	159,6	159,5	169,4	199,0	255,3	204,9	183,3	100,7	110,2	76,0
17-18	21,4	33,7	42,8	46,0	63,4	64,4	88,4	60,7	62,2	22,3	26,9	9,5
18-19	0,0	0,5	0,6	0,7	5,5	4,7	8,8	2,9	3,8	0,1	0,4	0,0
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	4345,6	4389,8	4371,3	4173,9	3873,2	4337,0	4770,2	4429,5	4292,2	3923,6	4018,9	4039,2

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 12. Promedios horarios de la irradiación global en la estación La Botana (Pasto) en Wh/m².

ESTACION BOTANA (PASTO)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
1-2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
4-5	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
5-6	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1
6-7	18,9	17,1	23,4	29,9	32,7	26,2	23,5	25,7	35,7	47,7	43,7	29,9
7-8	123,7	103,7	117,9	145,9	138,9	116,5	121,6	134,3	170,7	193,9	185,6	144,7
8-9	291,0	255,8	257,3	298,1	275,5	254,5	258,2	286,0	335,8	351,6	353,0	301,9
9-10	442,6	393,2	379,0	421,8	407,9	380,8	421,3	414,6	464,4	477,0	499,3	427,7
10-11	521,1	453,0	446,8	490,2	492,0	469,0	513,6	510,2	527,6	524,5	546,6	492,7
11-12	528,9	482,9	461,7	500,4	517,1	508,7	562,7	551,9	540,4	533,6	547,6	515,0
12-13	531,6	458,5	451,6	473,9	475,9	494,1	509,4	534,8	545,6	500,5	526,8	491,9
13-14	502,1	456,4	427,7	455,2	459,1	494,5	490,5	508,7	521,0	444,6	448,4	431,0
14-15	402,9	383,8	378,6	386,2	387,5	421,5	411,0	453,1	427,0	365,8	339,9	351,6
15-16	282,2	298,8	293,5	283,4	289,4	314,9	319,2	320,4	323,0	245,7	220,3	239,2
16-17	170,4	177,7	182,6	159,5	160,6	181,1	198,8	195,4	187,8	132,5	110,8	124,7
17-18	60,6	68,5	57,1	43,3	41,7	49,5	64,0	64,3	51,7	26,9	21,6	31,0
18-19	0,9	3,3	1,8	0,7	0,5	1,0	1,9	1,7	0,5	0,2	0,1	0,3
19-20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
20-21	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
21-22	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
23-0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Acumulada diaria	3876,8	3552,8	3479,0	3688,7	3679,0	3712,3	3895,7	4001,2	4131,4	3844,9	3843,9	3581,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 13. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Aeropuerto Almirante Padilla (Riohacha) en Wh/m².

ESTACIÓN APTO. ALMIRANTE PADILLA (RIOHACHA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1
1-2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1
2-3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1
3-4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2
4-5	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2
5-6	0,4	0,3	0,6	4,4	10,2	11,9	7,1	6,1	5,0	3,8	1,9	0,3
6-7	26,6	30,9	55,7	82,2	117,5	120,4	99,6	103,9	106,6	99,9	71,1	40,3
7-8	172,5	181,5	211,9	238,0	287,5	295,5	259,1	316,1	309,7	299,2	225,5	193,2
8-9	354,4	351,2	374,6	393,2	459,6	486,2	444,9	490,5	512,7	445,2	395,3	373,5
9-10	495,3	535,2	540,9	526,9	594,6	657,6	609,2	665,0	628,3	565,2	528,0	518,3
10-11	623,2	676,8	691,7	664,9	719,3	779,0	742,6	815,1	808,7	672,2	594,8	619,0
11-12	589,9	672,8	723,3	726,2	773,7	832,1	833,1	841,6	789,4	650,9	556,5	589,3
12-13	698,6	761,1	763,2	742,0	766,3	839,9	819,4	896,0	800,5	666,3	677,0	661,8
13-14	686,2	764,0	723,8	705,0	678,8	783,3	742,5	818,5	718,2	607,5	610,7	625,5
14-15	565,6	608,1	612,7	550,1	537,4	620,2	625,2	589,1	564,9	420,6	413,2	517,5
15-16	327,7	406,2	446,7	379,0	350,3	454,1	460,6	301,6	341,9	274,0	209,0	305,3
16-17	162,3	241,2	241,5	191,4	177,1	262,4	266,6	159,6	145,1	103,5	89,5	115,6
17-18	32,7	55,3	59,3	52,4	46,7	87,1	94,9	44,0	26,5	7,7	5,0	11,1
18-19	0,1	0,3	0,3	0,6	0,8	2,7	4,3	0,5	0,4	0,1	0,1	0,0
19-20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
20-21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0
21-22	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,0
22-23	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1
23-0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0
Acumulada diaria	4735,5	5284,7	5446,2	5256,2	5520,1	6232,3	6009,0	6047,6	5757,9	4816,2	4377,7	4570,7

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 14. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Aeropuerto Sesquicentenario (San Andrés) en Wh/m².

ESTACION APTO. SESQUICENTENARIO (SAN ANDRÉS)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
1-2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
2-3	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
3-4	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
4-5	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
5-6	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,1
6-7	1,6	2,8	10,1	27,5	34,8	32,7	26,3	37,8	39,2	42,3	28,1	4,6
7-8	57,7	83,3	103,3	158,3	156,0	143,7	140,0	173,7	167,3	206,3	161,7	74,7
8-9	268,6	314,6	333,1	314,6	351,7	315,1	346,1	353,3	331,9	401,5	340,8	266,9
9-10	485,2	530,0	563,9	369,1	527,8	467,3	511,5	449,3	545,0	568,1	495,3	444,3
10-11	643,1	705,0	779,4	621,8	661,5	583,9	647,2	612,3	661,7	631,7	583,9	570,7
11-12	723,4	826,0	892,5	832,5	765,5	666,5	756,1	694,0	733,9	712,8	640,6	630,1
12-13	765,4	866,4	910,2	893,5	792,2	671,3	773,8	708,2	694,2	620,6	590,3	691,3
13-14	770,3	855,3	909,7	879,0	742,3	648,3	741,8	686,3	660,7	579,1	558,5	632,6
14-15	644,5	734,9	798,3	762,6	649,4	547,9	642,0	655,4	555,8	475,5	440,5	532,1
15-16	478,8	553,3	602,2	600,9	483,0	431,1	488,9	484,8	392,3	298,8	284,9	378,6
16-17	300,7	330,2	398,3	391,3	320,7	270,1	324,9	279,9	231,7	156,6	146,8	202,1
17-18	97,0	138,5	162,5	167,8	143,2	128,5	150,7	124,5	83,2	31,7	23,2	51,7
18-19	4,4	12,1	17,3	18,3	20,8	23,5	30,3	14,7	5,7	0,5	0,2	0,5
19-20	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
20-21	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
21-22	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
22-23	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
Acumulada diaria	5240,8	5952,9	6480,8	6037,4	5649,3	4930,2	5579,6	5274,4	5102,7	4726,1	4295,1	4480,3

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 15. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Universidad Tecnológica del Magdalena (Santa Marta) en Wh/m².

ESTACIÓN UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE MAGDALENA (SANTA MARTA)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,0	0,0	0,7	1,9	6,0	3,8	2,0	1,0	1,1	1,9	0,3	0,1
6-7	31,7	34,4	48,2	73,3	101,1	97,0	86,9	79,6	82,2	78,9	66,3	37,4
7-8	163,8	162,2	186,8	244,2	291,3	284,1	270,4	252,6	263,8	256,6	241,4	216,0
8-9	397,1	408,9	423,9	483,1	500,7	490,5	481,4	448,7	494,6	462,0	450,5	437,4
9-10	609,4	638,8	647,5	681,0	654,9	646,1	646,0	635,0	677,1	620,9	607,9	625,2
10-11	754,4	800,6	805,5	813,4	766,1	758,4	741,5	754,1	778,9	710,6	695,6	746,1
11-12	823,2	852,1	850,3	843,9	788,9	777,2	767,8	755,1	783,5	705,1	701,2	803,1
12-13	818,0	848,2	836,9	828,2	755,3	720,0	737,0	695,9	712,0	626,7	627,5	772,4
13-14	759,9	801,5	782,8	747,7	689,9	666,4	674,2	602,0	619,0	541,2	533,0	674,6
14-15	638,8	678,1	667,0	602,7	576,3	560,9	523,7	501,1	490,4	412,7	433,4	547,6
15-16	459,5	504,8	485,1	434,6	420,2	409,3	402,3	348,2	344,7	292,8	286,0	376,0
16-17	244,2	280,0	267,6	248,1	239,4	226,0	250,0	208,0	186,7	142,4	132,5	173,9
17-18	51,4	77,2	78,8	76,5	82,2	93,3	102,7	85,2	58,2	37,4	35,0	28,5
18-19	2,0	0,5	1,1	1,0	2,2	3,5	3,5	1,6	0,2	0,1	0,1	0,2
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Acumulada diaria	5753,3	6087,2	6082,1	6079,9	5874,5	5736,6	5689,1	5368,1	5492,3	4889,5	4810,8	5438,5

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 16. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Fedearroz IDEAM (Valledupar) en Wh/m².

ESTACION FEDEARROZ (VALLEDUPAR)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1-2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2-3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-4	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4-5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5-6	0,1	0,1	0,4	2,3	6,5	6,8	3,5	1,7	2,0	1,8	0,9	0,2
6-7	27,2	26,3	52,0	79,9	100,0	103,4	89,5	71,8	76,9	66,1	65,9	46,4
7-8	196,8	191,4	176,4	261,9	277,6	278,9	266,4	239,4	230,7	216,2	240,2	228,3
8-9	408,8	421,1	336,3	471,7	464,6	463,0	461,3	435,4	380,2	426,0	437,6	431,9
9-10	601,5	630,0	538,8	653,7	638,0	632,2	632,6	608,1	538,4	603,3	600,9	591,0
10-11	691,0	753,4	769,6	718,0	739,8	743,2	751,6	733,7	686,6	691,7	675,6	689,2
11-12	800,5	821,8	840,0	838,6	794,2	800,9	819,5	793,6	788,3	764,2	759,4	789,4
12-13	791,5	831,8	856,9	856,1	769,9	787,7	811,9	804,0	813,1	748,6	742,4	764,0
13-14	729,7	771,5	767,7	745,8	674,9	708,8	724,9	712,1	718,5	650,1	625,7	683,7
14-15	600,7	636,1	604,8	538,9	494,3	557,5	563,2	539,0	519,1	451,8	462,1	529,4
15-16	415,7	440,5	383,3	301,6	285,1	349,9	360,4	342,1	304,5	262,6	269,2	332,5
16-17	204,3	224,2	171,0	134,6	126,9	169,0	180,5	164,0	124,6	93,0	88,8	131,4
17-18	26,0	42,5	34,0	26,0	30,1	45,6	49,7	36,7	19,6	7,0	4,7	9,8
18-19	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	1,5	1,7	0,7	0,3	0,3	0,2	0,2
19-20	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,9	0,2	0,2	0,2
20-21	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
21-22	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
22-23	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
23-0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Acumulada diaria	5494,1	5791,0	5531,7	5629,6	5402,5	5648,3	5716,7	5482,4	5202,8	4982,6	4973,7	5227,5

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 17. Promedios horarios de la irradiación global en la estación ICA Villavicencio (Villavicencio) en Wh/m².

ESTACION ICA (VILLAVICENCIO)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
1-2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
2-3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4-5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5-6	0,2	0,2	0,3	1,1	2,1	1,9	0,8	0,7	2,2	4,1	2,9	0,8
6-7	38,0	33,7	37,9	55,4	61,0	62,6	53,7	54,8	84,3	95,0	82,4	57,2
7-8	185,8	148,0	140,3	173,8	180,1	179,2	177,9	181,1	260,6	277,7	271,2	233,0
8-9	402,8	324,3	284,0	316,1	325,9	340,0	325,6	350,6	446,0	471,2	464,6	452,7
9-10	629,7	511,8	436,6	465,6	480,1	487,1	452,8	500,6	601,4	628,1	643,4	626,1
10-11	763,4	647,7	566,9	571,3	576,1	565,9	562,6	592,4	661,1	683,9	697,7	701,6
11-12	757,4	709,8	602,5	600,9	637,6	609,1	606,4	622,1	669,0	693,5	682,6	676,9
12-13	742,2	663,9	632,1	633,1	633,3	588,1	611,3	626,7	720,2	684,7	648,5	677,9
13-14	645,0	613,2	593,2	588,4	551,0	493,9	515,0	578,2	690,0	620,7	538,0	567,4
14-15	495,4	492,7	504,6	469,6	464,4	419,8	474,3	492,3	549,3	488,4	400,4	458,7
15-16	331,7	356,5	345,8	330,0	317,8	300,3	346,6	348,8	365,0	304,2	261,4	313,1
16-17	173,9	188,3	185,9	166,1	158,5	159,5	186,6	190,8	182,7	135,1	111,9	137,1
17-18	41,4	50,7	45,6	34,9	33,9	34,9	44,0	45,7	32,9	16,6	12,2	22,3
18-19	0,5	0,6	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
19-20	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
20-21	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
21-22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2
22-23	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
23-0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Acumulada diaria	5207,4	4741,5	4375,9	4406,6	4422,1	4242,6	4358,1	4585,2	5264,7	5103,4	4817,3	4925,0

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

Tabla 18. Promedios horarios de la irradiación global en la estación Aeropuerto Yopal (Yopal) en Wh/m².

ESTACIÓN AEROPUERTO YOPAL (YOPAL)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0
1-2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2-3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4-5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
5-6	0,2	0,1	0,3	1,5	5,5	3,0	1,7	1,0	2,8	5,9	4,5	1,3
6-7	54,5	42,6	44,9	58,1	79,2	70,2	60,3	58,4	87,9	113,7	107,9	84,8
7-8	241,1	192,4	175,1	189,5	191,9	195,9	168,2	185,6	222,8	276,8	292,1	271,5
8-9	463,0	379,5	342,6	354,2	343,6	340,4	306,8	329,6	408,0	454,8	470,0	459,7
9-10	646,4	594,4	517,6	495,2	483,3	497,3	430,2	456,2	558,5	612,0	629,1	631,9
10-11	784,9	719,9	673,1	596,9	588,1	571,2	527,3	557,3	688,7	713,3	745,4	747,2
11-12	822,4	775,0	707,9	634,9	615,2	555,5	552,9	612,0	736,5	755,5	753,1	785,1
12-13	835,9	770,0	708,2	643,4	653,5	597,6	617,9	650,3	748,0	730,7	727,8	774,9
13-14	734,6	718,0	647,4	594,5	579,3	556,7	579,6	617,8	674,2	625,9	621,4	701,0
14-15	574,5	564,8	513,3	467,4	447,0	445,3	477,1	511,6	533,0	450,0	453,4	539,4
15-16	385,5	400,3	349,7	304,6	289,9	324,6	336,7	334,1	345,8	274,0	271,0	356,7
16-17	189,5	196,6	173,0	144,1	133,1	165,6	180,7	177,1	160,1	106,4	100,6	150,6
17-18	36,0	42,1	36,3	27,5	23,9	33,9	43,9	37,1	26,2	10,9	7,0	17,2
18-19	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,1	0,3	0,1	0,4
19-20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	2,7	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
20-21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0
21-22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
22-23	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0
23-0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Acumulada diaria	5769,2	5396,2	4889,9	4512,0	4433,6	4357,4	4283,5	4528,4	5192,6	5130,1	5183,4	5521,8

Entre 0 y 200 (Wh/m²) · Entre 200 y 400 (Wh/m²) · Entre 400 y 600 (Wh/m²) · Entre 600 y 800 (Wh/m²) · Mayor a 800 (Wh/m²)

ANEXO 5.

PROMEDIOS MENSUALES DE BRILLO SOLAR EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL PAÍS (HORAS DE SOL AL DÍA)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m)	Valor promedio (horas de Sol al día)												Promedio anual	Periodo de Información (Años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	-4,19	-69,94	84	4,3	4,1	4,2	4,7	4,8	5,0	6,0	6,4	5,9	5,5	5,2	4,6	5,1	ene-82 a dic-16 (32)
Aeropuerto Olaya Herrera	Medellín	Antioquia	6,22	-75,59	1516	5,6	5,3	4,8	4,1	4,5	5,6	6,5	6,1	5,0	4,3	4,5	4,9	5,1	abr-67 a dic-16 (38)
Aeropuerto Santiago Pérez	Arauca	Arauca	7,07	-70,74	128	8,8	8,1	6,5	5,3	5,0	4,5	4,7	5,3	6,0	6,5	7,0	8,0	6,3	jul-81 a dic-16 (34)
Las Flores	Barranquilla	Atlántico	11,04	-74,82	8	7,9	7,8	7,1	6,7	5,7	6,2	6,8	6,7	5,9	5,5	6,2	7,0	6,6	jul-80 a oct-13 (22)
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	Bolívar	10,45	-75,52	2	8,9	8,6	7,7	7,0	6,2	6,3	6,8	6,5	5,8	5,5	6,3	7,8	6,9	jul-79 a dic-15 (36)
UPTC	Tunja	Boyacá	5,54	-73,36	2690	7,4	6,7	5,6	4,7	4,3	4,3	4,6	4,9	5,1	5,0	5,4	6,6	5,4	ene-79 a sep-16 (37)
Aeropuerto La Nubia	Manizales	Caldas	5,03	-75,47	2104	5,4	4,9	4,1	3,5	3,5	4,0	4,9	4,5	3,8	3,4	3,7	4,6	4,2	ene-79 a oct-16 (31)
Aeropuerto Gustavo Artunduaga	Florencia	Caquetá	1,59	-75,56	244	5,7	4,3	3,4	3,4	3,5	3,3	3,4	4,1	4,8	4,8	4,9	5,5	4,3	ene-76 a may-16 (35)
Aeropuerto Yopal (El Alcaraván)	Yopal	Casanare	5,32	-72,39	325	8,1	7,0	5,1	4,3	4,6	4,2	4,4	4,8	5,5	5,8	6,3	7,8	5,6	sep-78 a nov-16 (32)
Aeropuerto Gillermo León Valencia	Popayán	Cauca	2,45	-76,61	1752	5,2	4,6	3,9	3,7	3,8	4,9	5,6	5,4	4,6	3,8	3,9	4,5	4,5	abr-80 a dic-16 (35)
Aeropuerto Alfonso López	Valledupar	Cesar	10,44	-73,25	138	9,2	8,8	7,8	6,8	6,2	6,9	7,1	6,8	6,3	6,4	7,4	8,5	7,4	dic-83 a oct-16 (30)
Aeropuerto El Caraño	Quibdó	Choco	5,69	-76,64	75	2,8	2,8	2,7	3,1	3,5	3,8	4,2	4,2	3,8	3,7	3,6	3,0	3,4	mar-79 a dic-16 (35)
Universidad de Córdoba	Montería	Córdoba	8,79	-75,86	15	7,6	7,2	6,2	5,3	4,7	5,4	6,3	5,9	5,0	5,3	6,0	6,2	5,9	ago-79 a jun-15 (30)
Aeropuerto El Dorado	Bogotá	Cundinamarca	4,71	-74,15	2547	6,0	5,2	4,4	3,5	3,5	3,9	4,3	4,4	4,1	3,8	4,2	5,1	4,4	ene-80 a sep-16 (32)
Puerto Inírida	Inírida	Guainía	3,87	-67,93	100	7,0	6,3	5,5	4,4	3,8	4,1	4,5	5,2	5,7	5,6	5,6	5,9	5,3	dic-78 a dic-16 (31)
El Trueno	San José Del Guaviare	Guaviare	2,37	-72,64	150	5,8	5,1	3,9	3,4	3,3	3,1	3,3	3,9	4,8	4,7	4,6	5,0	4,2	sep-82 a nov-16 (31)
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	6,5	5,7	4,9	5,0	5,3	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	6,0	5,5	mar-78 a dic-16 (37)
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	8,5	8,1	7,4	6,7	6,3	7,8	8,4	8,1	6,9	6,7	7,2	7,8	7,5	dic-76 a ago-16 (33)
Aeropuerto Simón Bolívar	Santa Marta	Magdalena	11,13	-74,23	4	9,1	8,8	8,0	7,6	7,1	7,6	7,5	7,1	6,8	6,6	7,3	8,6	7,7	sep-84 a nov-16 (30)
Aeropuerto Vanguardia	Villavicencio	Meta	4,16	-73,62	422	5,5	4,7	3,6	3,7	3,9	3,7	3,8	4,4	5,1	5,2	4,8	5,3	4,5	ene-79 a dic-16 (37)
El Encano	Pasto	Nariño	1,16	-77,16	2830	3,2	2,7	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,2	2,5	2,9	3,1	3,2	2,5	jun-85 a dic-16 (30)
Aeropuerto Camilo Daza	Cúcuta	Norte de Santander	7,93	-72,51	250	6,5	6,0	5,0	4,9	5,7	5,9	6,5	7,0	6,6	6,3	6,3	6,3	6,1	may-79 a ago-15 (33)
Acueducto Mocoa	Mocoa	Putumayo	1,16	-76,65	650	3,2	2,9	2,6	2,6	2,4	2,2	2,3	2,9	3,6	3,8	3,6	3,6	3,0	oct-85 a dic-16 (29)
Aeropuerto El Edén	Armenia	Quindío	4,45	-75,77	1229	5,6	5,1	4,5	4,3	4,1	4,7	5,8	6,1	5,0	4,4	4,4	4,8	4,9	oct-92 a dic-16 (24)
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,82	-75,74	1342	6,1	5,6	5,0	4,4	4,4	5,0	5,9	5,9	5,1	4,6	4,9	5,4	5,2	sep-80 a dic-16 (35)
Aeropuerto Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés y Providencia	12,54	-81,73	1	8,2	8,6	9,2	9,4	7,6	6,1	6,6	7,2	6,3	6,0	5,9	6,9	7,3	ene-80 a dic-16 (33)
Aeropuerto El Embrujo	Providencia	San Andrés y Providencia	13,36	-81,36	7	7,5	8,2	8,6	9,0	7,7	6,5	7,0	7,6	6,7	6,1	5,8	6,5	7,3	ene-80 a dic-16 (33)
Universidad Industrial Santander	Bucaramanga	Santander	7,14	-73,12	1018	5,9	4,3	3,3	3,6	3,8	3,0	3,9	3,8	3,6	3,5	4,4	5,3	4,0	ene-79 a jul-14 (20)
Universidad de Sucre	Sampués	Sucre	9,32	-75,39	160	7,3	6,8	5,7	4,8	4,4	5,5	6,1	5,5	4,6	4,5	4,8	6,0	5,5	ene-84 a ene-15 (29)
Aeropuerto Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,14	943	5,8	5,1	4,5	4,6	5,0	5,6	6,2	6,3	6,0	5,1	4,7	5,2	5,3	ene-79 a dic-16 (34)
Universidad del Valle	Cali	Valle	3,38	-76,53	996	5,5	5,2	4,9	4,6	4,6	5,2	6,1	6,0	5,1	4,6	4,5	4,9	5,1	ene-79 a feb-16 (34)
Mitú	Mitú	Vaupés	1,26	-70,24	180	4,3	3,8	3,9	3,7	3,3	3,5	3,6	4,7	4,9	4,8	4,7	4,1	4,1	jul-94 a dic-16 (17)
Aeropuerto Puerto Carreño	Puerto Carreño	Vichada	6,18	-67,49	57	8,4	8,1	7,2	5,6	4,6	4,1	4,5	4,7	5,4	6,3	6,9	7,6	6,1	ene-78 a dic-16 (37)

ANEXO 6.

PROMEDIOS MENSUALES DEL NÚMERO DE DÍAS SIN BRILLO SOLAR EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL PAÍS

Estación	Municipio	Departamento	Lat.	Long	Elevación (m.s.n.m)	Promedio del número de días sin brillo solar												Promedio anual	Periodo de Información (Años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	-4,19	-69,94	84	2,77	2,68	3,13	2,42	2,48	2,58	1,71	1,35	1,74	1,77	2,23	2,1	2,25	ene-82 a abr-12 (31)
Aeropuerto Olaya Herrera	Medellín	Antioquia	6,22	-75,59	1516	1,32	1,08	1,81	2,35	1,81	1,3	0,51	0,51	1,43	1,86	1,51	1,76	1,44	abr-67 a dic-12 (34)
Aeropuerto Santiago Pérez	Arauca	Arauca	7,07	-70,74	128	0,16	0,52	1,32	2,23	2,97	3,42	3,68	2	1,35	1,1	1,16	0,45	1,7	jul-81 a dic-12 (31)
Las Flores	Barranquilla	Atlántico	11,04	-74,82	8	0,11	0,18	0,57	0,64	1,68	1,71	0,82	0,61	1,04	1,14	0,75	0,5	0,81	jul-80 a may-12 (22)
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	Bolívar	10,45	-75,52	2	0,03	0,03	0,5	0,91	2,21	2,76	1,68	1,38	1,94	2,91	2,03	0,88	1,44	jul-79 a dic-12 (33)
UPTC	Tunja	Boyacá	5,54	-73,36	2690	0,09	0,45	1,06	1,61	1,48	1,42	0,88	0,58	0,64	0,88	0,58	0,3	0,83	ene-79 a jul-12 (33)
Aeropuerto La Nubia	Manizales	Caldas	5,03	-75,47	2104	1,48	1,97	2,88	4,06	3,64	2,7	1,7	1,45	2,79	3,58	2,94	2,24	2,62	ene-79 a oct-12 (31)
Aeropuerto Gustavo Artunduaga	Florencia	Caquetá	1,59	-75,56	244	1,33	3,61	5,06	5,24	5,12	6,58	7,15	4,24	2,42	2,12	2,21	1,45	3,88	ene-76 a dic-12 (32)
Aeropuerto Yopal (El Alcaraván)	Yopal	Casanare	5,32	-72,39	325	0,33	0,91	2,15	2,79	2,48	3,52	2,91	2	1,82	1,39	1,09	0,36	1,81	sep-78 a ago-12 (31)
Aeropuerto Guillermo León Valencia	Popayán	Cauca	2,45	-76,61	1752	1,3	1,45	2,76	3,03	2,79	1,09	0,36	0,39	1,45	2,24	1,88	1,64	1,7	abr-80 a nov-12 (33)
Aeropuerto Alfonso López	Valledupar	Cesar	10,44	-73,25	138	0,07	0,1	0,17	0,52	0,76	0,9	0,62	0,31	0,72	0,69	0,41	0,14	0,45	dic-83 a oct-12 (27)
Aeropuerto El Caraño	Quibdó	Choco	5,69	-76,64	75	5,67	4,79	6,7	5,88	5,24	3,79	3,12	2,55	3,82	4,39	4,42	5,91	4,69	mar-79 a nov-12 (33)
Universidad de Córdoba	Montería	Córdoba	8,79	-75,86	15	0,15	0,3	0,97	1,52	2,79	2,03	1,48	1,18	2,91	1,42	0,73	0,64	1,34	ago-79 a feb-12 (31)
Aeropuerto El Dorado	Bogotá	Cundinamarca	4,71	-74,15	2547	0,59	1,22	2,03	2,56	2,09	1,31	0,78	0,5	1,22	1,59	1,16	1,25	1,36	ene-82 a abr-12 (31)
Puerto Inírida	Inírida	Guainía	3,87	-67,93	100	0,89	1,23	1,51	2,09	3,14	2,54	2,03	1,17	0,83	1,09	1,8	0,77	1,59	dic-78 a dic-12 (31)
El Trueno	San José del Guaviare	Guaviare	2,37	-72,64	150	1,1	1,57	3,23	3,43	3,8	3,4	4,03	3,2	2,03	2,07	2,27	1,87	2,67	sep-82 a dic-12 (30)
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	0,36	0,94	1,88	1,61	1,64	0,91	0,61	0,52	0,52	0,97	0,82	0,94	0,97	mar-78 a dic-12 (33)
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	0,09	0,2	0,66	0,71	1,06	0,69	0,14	0,31	0,46	0,31	0,34	0,23	0,43	dic-76 a nov-12 (30)
Aeropuerto Simón Bolívar	Santa Marta	Magdalena	11,13	-74,23	4	0,04	0	0,15	0,56	1	0,7	0,56	0,3	0,81	0,37	0,7	0,3	0,5	ene-84 a dic-12 (26)
Aeropuerto Vanguardia	Villavicencio	Meta	4,16	-73,62	422	0,94	1,94	3,32	3,09	3,15	3,88	3,85	2,68	1,74	1,18	1,26	1,12	2,35	ene-79 a dic-12 (34)
El Abonuco	Pasto	Nariño	1,18	-77,30	2710	4,53	4,76	5,47	4,03	3,35	2,21	1,53	1,53	2,35	2,79	3,09	3,21	3,24	jun-85 a dic-12 (28)
Aeropuerto Camilo Daza	Cúcuta	N. de Santander	7,93	-72,51	250	1,45	2,21	3,48	2,82	1,27	1,06	0,79	0,24	0,45	0,67	0,55	1,18	1,35	may-79 a dic-12 (31)
Acueducto Mocoa	Mocoa	Putumayo	1,16	-76,65	650	4,43	5,11	6,89	6,07	6,46	7,61	8,43	7,07	4	2,86	3,11	3,71	5,48	oct-85 a dic-12 (28)
Aeropuerto El Edén	Armenia	Quindío	4,45	-75,77	1229	0,95	1,29	1,57	2,48	2,95	2,1	0,9	0,43	1,24	1,76	1,95	1,29	1,58	sep-92 a nov-12 (21)
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,82	-75,74	1342	1,03	1,36	1,82	2,88	2,3	1,73	0,79	0,76	1,03	2,06	1,76	1,52	1,59	sep-80 a nov-12 (33)
Aeropuerto Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés y Providencia	12,54	-81,73	1	0,33	0,15	0,03	0,21	1,55	2,79	2,42	1,39	1,91	3,33	3,55	1,7	1,61	ene-80 a ago-12 (32)
Aeropuerto El Embrujo	Providencia	San Andrés y Providencia	13,36	-81,36	7	0,55	0,24	0,09	0,24	1,52	2,76	1,39	1,18	1,61	2,82	3,15	1,73	1,44	ene-80 a sep-12 (33)
Universidad Industrial Santander	Bucaramanga	Santander	7,14	-73,12	1018	0,73	2,82	6,32	3,95	3,23	4,95	3,05	2,82	2,86	3,36	2,09	0,95	3,09	ene-79 a ene-04 (20)
Universidad de Sucre	Sincelejo	Sucre	9,32	-75,39	160	0,1	0,28	0,93	2,14	3,45	2,31	1,66	1,48	2	2,1	1,38	0,93	1,56	ene-84 a ago-12 (28)
Aeropuerto Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,14	943	1,18	1,79	2,76	2,85	1,85	1,64	0,67	0,39	0,82	1,85	2,21	1,42	1,62	ene-79 a nov-11 (33)
Universidad del Valle	Cali	Valle	3,38	-76,53	985	1,18	1,44	1,97	2,47	2	1,09	0,74	0,76	1,79	1,88	1,79	1,59	1,56	ene-79 a oct-12 (34)
Mitú	Mitú	Vaupés	1,26	-70,24	180	1,5	1,33	2,22	2,11	4	3	3,44	1,94	1,28	1,5	1,83	2,33	2,21	jul-84 a dic-12 (18)
Aeropuerto Puerto Carreño	Puerto Carreño	Vichada	6,18	-67,49	57	0,12	0,21	0,74	2,03	3,03	3,03	2,12	2,15	1,65	1,15	0,94	0,41	1,46	ene-78 a dic-12 (34)

ANEXO 7.
METODOLOGÍA PARA REALIZAR LOS MAPAS DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO

A continuación, se presenta la metodología para realizar los mapas de la distribución de la columna de ozono presentados en el atlas, a lo largo del año. Esta metodología también se utiliza para realizar el seguimiento del ozono total en el país, mes a mes, a través de los mapas del comportamiento promedio y las anomalías mensuales que se pueden registrar en la página web del IDEAM.

1. Descarga de los datos

Para generar los promedios de ozono total para cada mes, durante el periodo 1978-2016, es necesario construir la serie a través de los archivos diarios obtenidos a partir de mediciones satelitales. Estas mediciones fueron posibles, cuando entró en operación el satélite Nimbus-7 desde finales del año 1978. Este satélite estaba dotado de un instrumento en las medida del ozono: espectrofotómetro para el mapeo del Ozono Total (Total Ozone Mapping Spectrometer - TOMS), el cual midió la distribución global del ozono total. La misión del Nimbus-7 ha sido permanente hasta la fecha mediante la prolongación de sus programas con el lanzamiento de otros satélites, como el Meteor-3, lanzado en 1991, el Earth Probe, en 1996 y el AURA (lanzado en 2004) que, porta el Instrumento para el Monitoreo del Ozono (OMI - Ozone Monitoring Instrument), se encuentra en operación.

Se procedió de la siguiente manera:

a) Descarga de archivos diarios desde 01-11-1978 hasta 06-05-1993 del sensor TOMS portado en el satélite Nimbus-7.
   Longitudes: 288 puntos centrados en 179,375 W a 179,375 E (1,25 grados)
   Latitudes: 180 puntos centrados en 89,5 S a 89,5 N (1,0 grado)
   Se descargaron de: ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/nimbus7/data/ozone/

b) Descarga de archivos diarios desde 22-08-1991 hasta 24-11-1994 del sensor TOMS portado en el satélite Meteor-3, lanzado a bordo de un cohete ruso (Ciclón) el 18 de agosto de 1991 desde el cosmódromo ruso de Plesetsk en Rusia.
   Longitudes: 288 puntos centrados en 179,375 W a 179,375 E (1,25 grados)
   Latitudes: 180 puntos centrados en 89,5 S a 89,5 N (1,0 grado)
   Se descargaron de: ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/meteor3/data/ozone/

c) Descarga de archivos diarios desde 22-07-1996 hasta 31-12-2005 del sensor TOMS portado en el satélite Earth Probe, el cual fue lanzado el 2 de julio de 1996 y cuyo primer día completo de generación de archivos de datos comenzó el 22 de julio de 1996. Este instrumento proporcionaba datos en tiempo real.
Longitudes: 288 puntos centrados en 179,375 W a 179,375 E (1,25 grados)
Latitudes: 180 puntos centrados en 89,5 S a 89,5 N (1,0 grado)
Se descargaron de: ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/ozone/

d) Descarga de archivos diarios desde 01-10-2004 hasta 31-12-2016 del instrumento OMI portado en el satélite AURA. El instrumento es una contribución de Netherlands's Agency for Aerospace Programs (NIVR) en colaboración con el Finnish Meteorological Institute (FMI) en las misión AURA. Este satélite fue lanzado en el 2004 y sigue funcionando hasta la fecha.
Longitudes: 360 puntos centrados entre 179,5 W y 179,5 E (1,0 grados)
Latitudes: 180 puntos centrados entre 89,5 S y 89,5 N (1,0 grados)
Se descargaron de: ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone/

2. Construcción de promedios mensuales

Dado que los datos desde el 1º de noviembre de 1978 hasta el 30 de septiembre de 2004 venían grillados a 288 intervalos de longitud, espaciados cada uno a 1,25 grados, fue necesario interpolar, usando la metodología *kriging*, para ajustarlos a los 360 intervalos de longitud y espaciarlos a 1,0 grados, tal como son generados por el sensor OMI.

Como la parte final de la serie de datos producida por cada sensor, en algunos casos se superponía con el inicio de la serie de datos del sensor portado en el satélite lanzado con posterioridad, con el fin de crear la serie completa, se tomaron los datos del instrumento más reciente de la siguiente forma: desde 01-11-1978 hasta 21-08-1991 del sensor TOMS/Nimbus-7; desde 22-08-1991 hasta 24-11-1994 del sensor TOMS/Meteor-3; desde 22-07-1996 hasta 30-09-2004 del sensor TOMS/Earth Probe y desde 01/10/2004 hasta 31-12-2016 del sensor OMI/AURA.

Después de realizar este procedimiento, se generaron los promedios para cada mes y el promedio multianual, teniendo en cuenta la serie de datos desde noviembre de 1978 hasta diciembre de 2016.

3. Generación de los mapas mensuales y el anual de ozono total

Los mapas que representan la columna total de ozono se realizaron mediante varios pasos de análisis y clasificación espacial como son: interpolación, reclasificación, generación del mapa en formato ráster y conversión a formato vector, utilizando las herramientas de análisis de información geográfica propias del ArcGis (versión 10). El sistema de referencia oficial que se utiliza es Magna Sirgas, el sistema de coordenadas es geográfico.

El método de interpolación empleado para este caso corresponde al método *spline* (curvatura mínima bidimensional). La salida gráfica de estos mapas se hace en formato jpg y pdf.

ANEXO 8.

PROMEDIOS MENSUALES DE LA COLUMNA TOTAL DE OZONO EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL PAÍS EN UNIDADES DOBSON (UD)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m)	VALORES PROMEDIO DE OZONO TOTAL MENSUAL MULTIANUAL EN UNIDADES DOBSON (PERIODO 1978 – 2016)												Promedio anual
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	-4,19	-69,94	84	250,8	253,2	256,1	254,9	252,1	254,7	261,7	268,4	273,5	268,7	259,9	253,8	259,0
Aeropuerto Olaya Herrera	Medellín	Antioquia	6,22	-75,59	1490	240,7	244,3	251,9	257,2	258,5	261,9	268,6	272,5	274,2	265,4	250,9	243,1	257,4
Aeropuerto Santiago Pérez	Arauca	Arauca	7,07	-70,74	128	243,3	246,4	254,4	261,8	264,1	268,0	275,3	277,4	277,1	268,0	254,5	246,0	261,4
Aeropuerto Ernesto Cortissoz	Soledad	Atlántico	10,92	-74,78	14	243,2	246,4	256,1	264,7	269,9	274,3	280,5	282,1	280,3	269,2	254,5	245,2	263,9
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	Bolívar	10,45	-75,52	2	243,9	247,1	256,6	264,9	269,4	273,7	279,8	281,6	280,1	269,3	254,7	245,7	263,9
UPTC	Tunja	Boyacá	5,54	-73,36	2690	238,3	242,2	249,2	255,2	256,4	260,7	268,7	272,1	272,6	263,8	249,7	240,8	255,8
Aeropuerto La Nubia	Manizales	Caldas	5,03	-75,47	2104	241,7	245,5	252,1	256,4	256,7	260,2	267,3	271,4	273,7	265,2	251,2	243,7	257,1
Aeropuerto Gustavo Artunduaga	Florencia	Caquetá	1,59	-75,56	244	245,0	249,1	254,3	254,8	253,3	257,1	263,7	267,6	269,7	263,0	251,7	245,5	256,2
Aeropuerto Yopal (El Alcaraván)	Yopal	Casanare	5,32	-72,39	325	240,4	244,2	251,3	256,7	257,6	261,8	269,8	273,0	273,6	264,8	251,2	241,0	257,1
Aeropuerto Guillermo León Valencia	Popayán	Cauca	2,45	-76,61	1749	242,8	246,6	251,8	253,5	252,4	256,3	263,0	267,6	270,6	262,9	250,8	243,8	255,2
Aeropuerto Alfonso López	Valledupar	Cesar	10,44	-73,25	138	241,1	243,8	253,2	263,0	268,8	272,1	278,1	279,8	278,7	268,9	253,5	243,6	262,0
Aeropuerto El Caraño	Quibdó	Choco	5,69	-76,64	75	245,5	249,4	257,1	261,5	261,9	266,1	273,4	277,6	278,8	268,6	253,9	247,0	261,7
Universidad de Córdoba	Montería	Córdoba	8,79	-75,86	15	244,1	247,4	256,9	264,5	267,5	271,2	277,0	280,0	279,8	269,4	254,6	246,1	263,2
Aeropuerto El Dorado	Bogotá	Cundinamarca	4,71	-74,15	2547	241,4	245,5	252,3	256,5	256,5	260,4	268,3	271,8	273,1	265,0	251,5	243,6	257,2
Puerto Inírida	Inírida	Guainía	3,87	-67,93	100	243,8	246,7	252,7	256,7	256,9	260,9	268,4	271,8	273,8	266,2	254,0	243,9	258,0
San José del Guaviare	San José del Guaviare	Guaviare	2,55	-72,65	165	245,7	249,1	255,5	257,3	256,1	260,3	267,6	271,0	272,8	265,9	254,5	244,5	258,4
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	242,7	246,6	252,6	254,6	253,7	257,4	264,6	268,4	270,7	263,4	251,1	244,0	255,8
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	244,0	247,0	256,6	266,5	271,9	275,6	281,2	282,5	280,2	269,2	254,6	245,1	264,5
Aeropuerto Simón Bolívar	Santa Marta	Magdalena	11,13	-74,23	4	243,2	246,3	256,1	265,0	270,4	274,7	280,7	282,2	280,1	269,1	254,4	245,4	264,0
Aeropuerto Vanguardia	Villavicencio	Meta	4,16	-73,62	423	243,2	247,2	254,1	257,4	256,9	261,1	269,1	272,2	273,3	265,2	252,6	245,0	258,1
Aeropuerto Antonio Nariño	Pasto	Nariño	1,39	-77,29	1796	245,0	248,5	253,2	254,0	252,8	256,6	262,7	267,5	270,8	263,5	252,3	241,5	255,7
Aeropuerto Camilo Daza	Cúcuta	Norte de Santander	7,93	-72,51	250	241,9	245,3	253,9	261,4	263,6	266,6	273,3	276,2	276,4	267,7	254,0	241,2	260,1
Acueducto Mocoa	Mocoa	Putumayo	1,16	-76,65	650	244,1	248,0	252,7	252,9	251,5	255,1	261,1	265,3	268,1	261,1	250,3	244,2	254,5
Aeropuerto El Edén	Armenia	Quindío	4,45	-75,77	1229	242,9	246,7	252,9	256,7	256,5	260,1	267,4	271,6	274,0	265,5	251,7	244,7	257,5
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,81	-75,74	1342	242,7	246,5	253,0	257,0	257,1	260,7	268,0	272,1	274,4	265,7	251,7	244,6	257,8
Aeropuerto El Embrujo	Providencia	San Andrés y Providencia	13,36	-81,36	7	243,7	246,9	256,8	266,0	272,5	277,7	282,9	283,0	278,8	266,6	252,8	245,3	264,4
Aeropuerto Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés y Providencia	12,54	-81,73	1	243,5	246,3	255,9	265,0	271,8	277,1	282,1	282,9	279,3	267,4	253,1	244,7	264,1
Universidad Industrial de Santander	Bucaramanga	Santander	7,14	-73,12	1018	240,1	243,8	252,0	258,9	261,1	264,5	271,5	274,8	275,1	266,5	252,1	241,6	258,5
Aeropuerto Rafael Bravo	Corozal	Sucre	9,33	-75,28	166	243,5	246,7	256,1	263,9	267,8	271,5	277,3	280,0	279,7	269,4	254,6	245,5	263,0
Aeropuerto Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,14	943	241,7	245,7	252,0	255,9	255,7	259,3	266,8	270,7	272,9	264,9	251,3	243,8	256,7
Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	Palmira	Valle	3,53	-76,38	961	244,3	248,2	253,8	256,6	256,0	260,0	267,2	271,4	274,1	265,5	252,4	245,8	258,0
Aeropuerto Mitú	Mitú	Vaupés	1,27	-70,23	207	246,2	249,5	254,4	256,0	254,6	258,4	266,1	270,2	273,2	266,6	255,6	248,0	258,2
Aeropuerto Puerto Carreño	Puerto Carreño	Vichada	6,18	-67,49	57	242,8	245,4	252,0	258,0	260,6	264,6	272,1	274,3	275,1	266,7	253,3	242,6	259,0

ANEXO 9.
ANÁLISIS DE VARIABLES EN ALTURA CON BASE EN LOS OZONOSONDEOS REALIZADOS EN BOGOTÁ

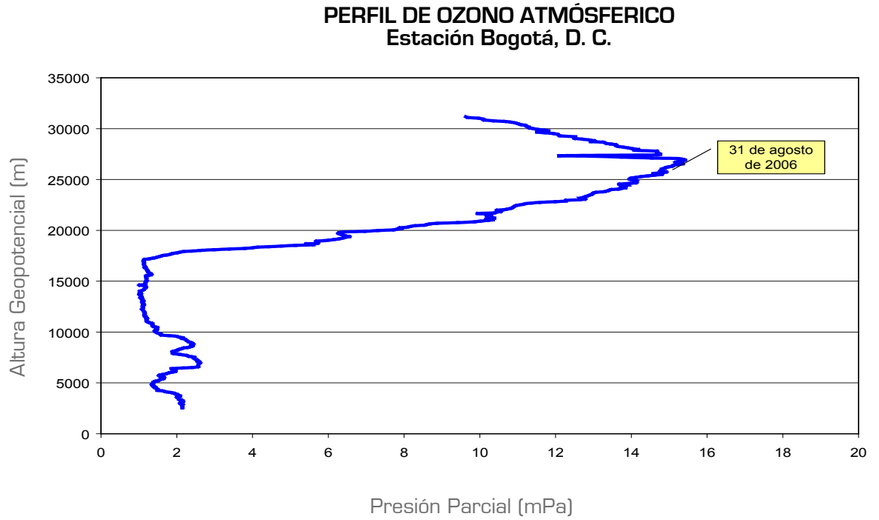
1. GENERALIDADES

El ozono es de vital importancia porque en la estratosfera (capa de la atmósfera, ubicada entre los 16 y 50 km de altitud) protege la vida del planeta, absorbiendo los rayos ultravioleta (particularmente la radiación UV-B en el rango de 280 a 320 nanómetros de longitud de onda) procedentes del Sol, los cuales son peligrosos en la salud humana, los animales y las plantas, incluyendo al plancton marino, contribuyendo así al calentamiento de la estratosfera, esta se manifiesta con el aumento de la temperatura con la altura. El ozono se encuentra desde la superficie terrestre hasta una altura de 70 kilómetros, pero la mayor cantidad se da entre los 19 y 35 kilómetros (región conocida como ***la capa de ozono***).

El IDEAM comenzó a realizar mediciones de la columna vertical de ozono, desde febrero de 1998, en la estación meteorológica Eldorado en Bogotá. Las observaciones de ozono en superficie y altura se efectúan mediante la ozonosonda. Los ozonosondeos se realizaron en Bogotá una vez al mes hasta principios del año 2012.

Figura 1. Comportamiento del perfil vertical de ozono atmosférico para el 31 de agosto de 2006 en la estación Eldorado.

Fuente: IDEAM..



2. ANÁLISIS DE LOS OZONOSONDEOS

Los siguientes análisis se efectuaron a partir de los ozonosondeos exitosos (73) de aproximadamente 100 lanzamientos que se realizaron en Bogotá desde 1998:

- Temperatura de la tropopausa (ºC)
- Altura de la tropopausa (metros)
- Altura base de la capa de ozono (metros)
- Altura de la máxima concentración de ozono y su valor (metros y milipascales)
- Ozono superficial (promedio y máxima)
- Gradientes de temperatura

En la mayoría de los análisis se trató de determinar el promedio mensual de la variable para poder definir su comportamiento durante el año.

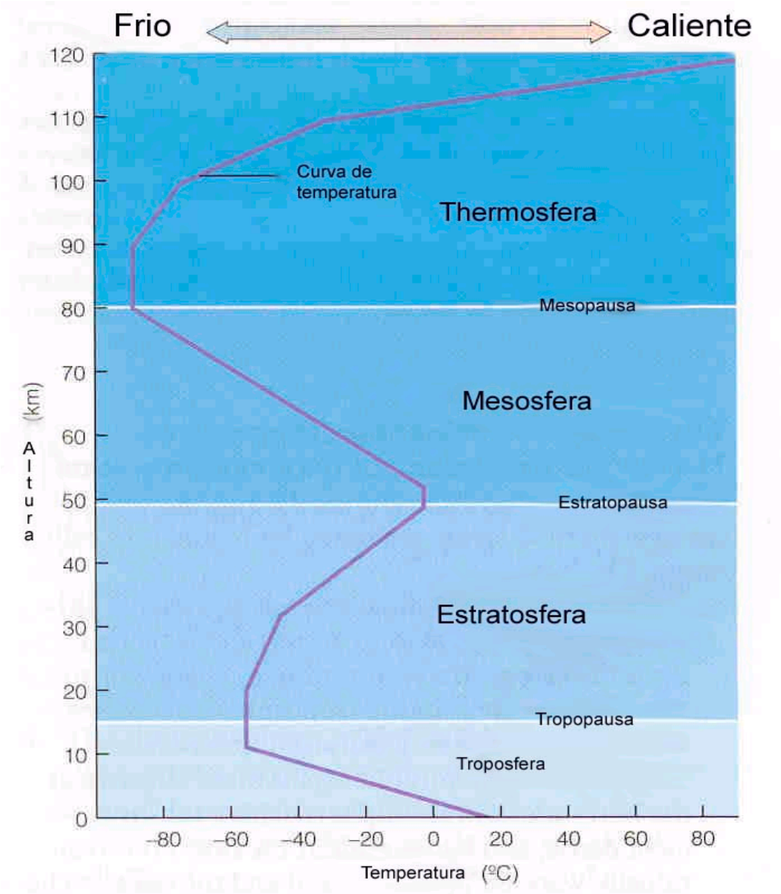
2.1 Temperatura de la tropopausa

La atmósfera, con base en el perfil vertical de la temperatura (ver Figura 2), se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. En la troposfera la temperatura generalmente disminuye con la altura y la tropopausa marca el límite superior de la troposfera, sobre esta la temperatura se mantiene constante antes de comenzar nuevamente a aumentar por encima de los 18 km.s.n.m. Esta situación térmica evita la convección del aire y confina de esta manera el clima a la troposfera.

En la Figura 3, se presenta el comportamiento del promedio mensual de la temperatura en la tropopausa sobre Bogotá, obtenido a través de los datos de los ozonosondeos. Se observa un comportamiento monomodal y el mes de enero se caracteriza por presentar los valores más bajos (-86ºC, debido posiblemente a la influencia del invierno del hemisferio Norte); a partir de febrero se registra un aumento gradual de la temperatura en la tropopausa hasta el mes de julio (por influencia del verano del hemisferio Norte),este es el máximo valor durante el año (cerca a los -77,5ºC). A partir de agosto empieza la disminución de la temperatura hasta el mínimo en enero.

Figura 2. Variación de la temperatura del aire con la altitud.

Fuente: http://www.oso.tamucc.edu/labs/lab5/lab5.es.htm



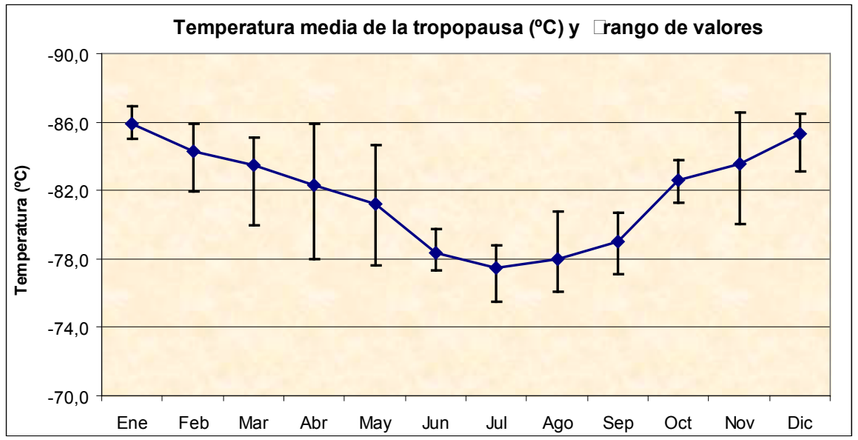
2.2 Altura de la tropopausa

La altura aproximada de la tropopausa es de 9 Km en los polos y entre los 16 a 19 Km en el ecuador. En la Figura 4, se presenta el comportamiento del promedio mensual de la altura en la tropopausa sobre Bogotá. Se observa un comportamiento monomodal y

el mes de febrero se caracteriza por presentar los valores más altos (17850 m); a partir de marzo disminuye de manera gradual la altura en la tropopausa hasta julio, que es cuando se presentan los mínimos valores durante el año (cerca de los 15800 m).

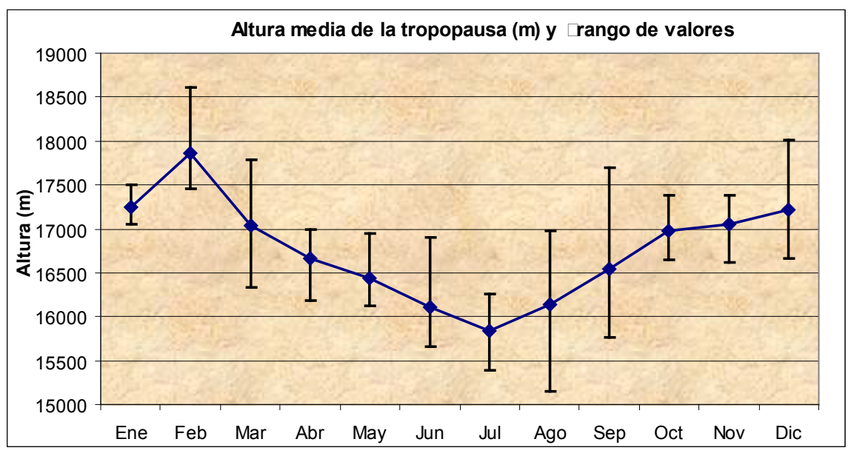
Fuente: IDEAM, 2010

Figura 3. Comportamiento de la temperatura media en la tropopausa con base en los Ozonosondeos realizados en Bogotá.



Fuente: IDEAM, 2010

Figura 4. Comportamiento de la altura media de la tropopausa con base en los Ozonosondeos realizados en Bogotá..

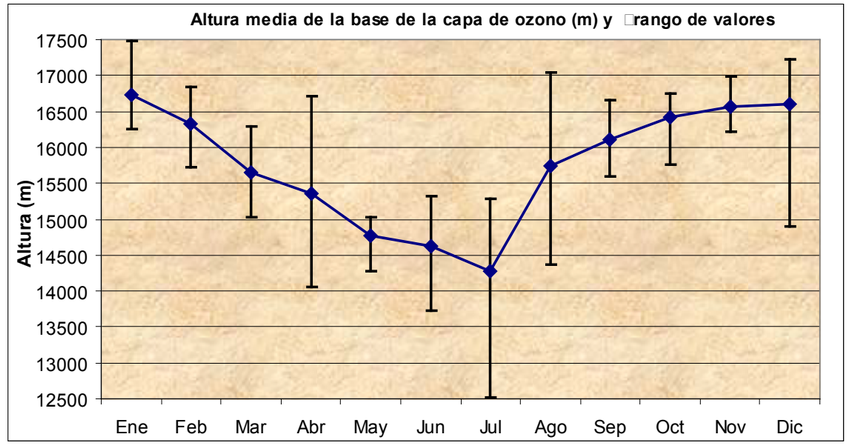


2.3 Altura base de la capa de ozono

En la Figura 1, se observa que la altura de la base de la capa de ozono se presenta alrededor de los 15 a 17 kilómetros sobre Bogotá, pero de acuerdo a la Figura 5, esta altura varía a lo largo del año y tiene un comportamiento monomodal, el cual, se caracteriza porque en enero los valores son más altos (16730 m), mientras que en julio, los más bajos (14270 m).

Figura 5. Comportamiento de la altura media de la base de la capa de ozono, con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.

Fuente: IDEAM, 2010

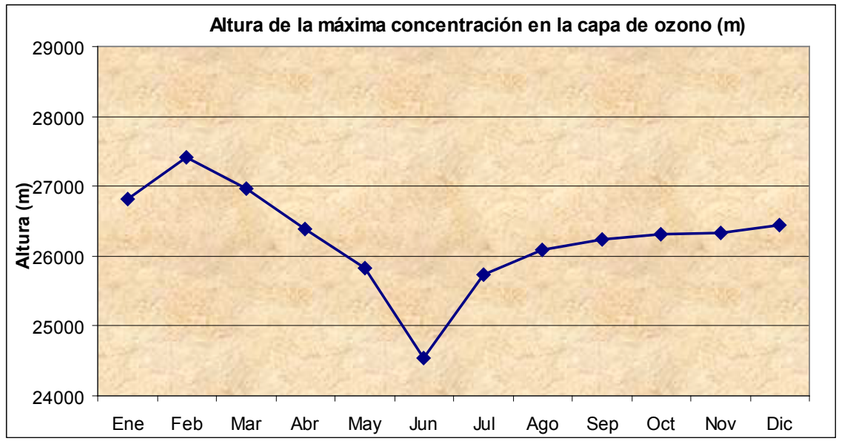


2.4. Altura de la máxima concentración de ozono y su valor

La altura de la máxima concentración, en la capa de ozono, está entre los 24 y 28 km (ver Figura 1). Su comportamiento se observa en la Figura 6, ha sido levemente ajustado (especialmente en abril, octubre, noviembre y diciembre) para que sea consistente, debido a la dificultad de obtener unos promedios adecuados a partir de una insuficiente cantidad de datos (en algunos meses solo se tenía disponible uno o dos ozonosondeos), ya que son escasos los lanzamientos que hayan llegado al pico de la capa de ozono. Su comportamiento monomodal se caracteriza porque en febrero se presentan los valores más altos (27.420 m) y en junio los más bajos del año (cerca de los 24.550 m).

Fuente: IDEAM, 2010

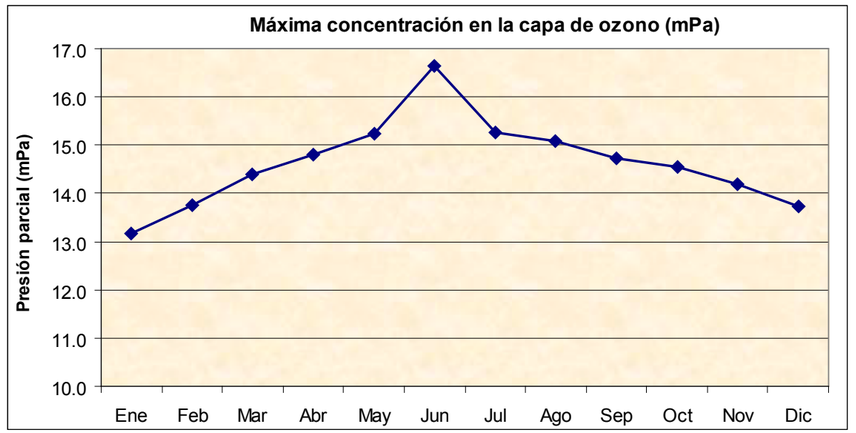
Figura 6. Comportamiento de la altura de la máxima concentración en la capa de ozono, con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.



Por otro lado, en la Figura 7 se describe el comportamiento de la máxima concentración de ozono en su capa, el cual también fue levemente ajustado (en marzo, julio, septiembre, octubre y noviembre), debido a la razón expuesta anteriormente. Los máximos valores de concentración están en junio (16,7 mPa, concentración expresada como presión parcial), a partir de julio se presenta una disminución gradual de la concentración hasta enero, que es cuando se presentan los mínimos valores durante el año (cerca de los 13,2 mPa).

Figura 7. Comportamiento de la máxima concentración en la capa de ozono, con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.

Fuente: IDEAM, 2010

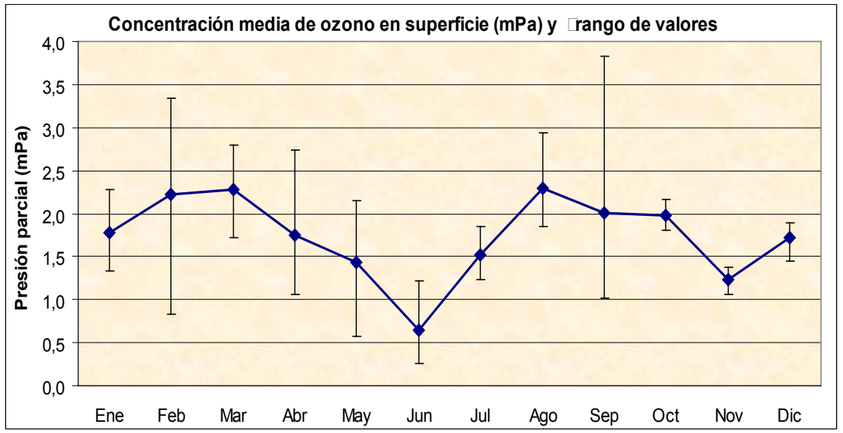


2.5 Ozono superficial (promedio y máxima)

En las figuras 8 y 9 se presentan los promedios y las máximas concentraciones mensuales del ozono en superficie. Ambas presentan un comportamiento bimodal, con un primer pico en febrero y marzo y el segundo entre agosto y octubre. Como se había mencionado, el ozono superficial es el principal contaminante fotoquímico y es causante de muchos problemas, porque reacciona fuertemente para destruir o alterar otras moléculas (por su alto poder oxidante) y actúa como un contaminante tóxico en las salud humana, produciendo daños respiratorios, pulmonares y cardiacos.

Fuente: IDEAM, 2010

Figura 8. Comportamiento del promedio de la concentración de ozono en superficie, con base en los Ozonosondeos realizados en Bogotá.

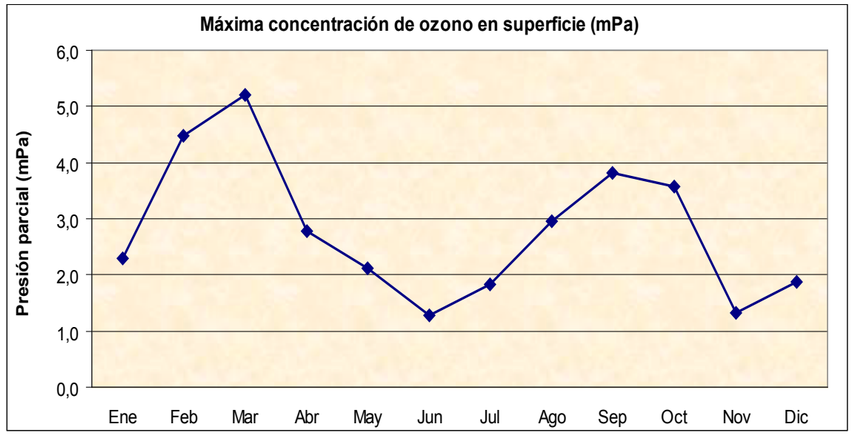


En la Figura 8 se observa que en los picos con concentraciones altas, se presentan promedios entre 2,0 y 2,5 milipascales (mPa, equivalentes a valores de entre 52 y 65 µg/m³), mientras que en junio y noviembre los promedios son más bajos, del orden de 0,7 mPa (18,2 µg/m³) y 1,2 mPa (31,2 µg/m³), respectivamente. Cabe recordar que, según la Resolución 601 del 2006, la norma a nivel nacional del O_3 (concentración máxima permisible) para una hora es de 120 µg/m³. Por otro lado, en la Figura 9, se observa que en el primer pico los valores máximos de la concentración del ozono son del orden de los 5,2 mPa (135,3 µg/m³), mientras que, en el segundo ocurren valores máximos del orden de 3,8 mPa (99,4 µg/m³).

Debido a lo anterior, se puede concluir que en el sector occidental de la ciudad (zona del aeropuerto), hacia el mediodía y en algunos días de febrero y marzo (posiblemente en septiembre y octubre), se pueden estar sobrepasando los valores máximos permisibles de ozono en una hora, según la Resolución 601 del 2006.

Figura 9. Comportamiento de la máxima concentración de ozono en superficie, con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.

Fuente: IDEAM, 2010



2.6 Gradientes de temperatura en Bogotá

El gradiente vertical de temperatura se define como el gradiente en el que la temperatura del aire cambia con la altura, expresado en (°C) por metros o kilómetros. Este se asume como el gradiente vertical de temperatura de la atmósfera porque consiste en una disminución de aproximadamente 6 a 7 °C por km (en la troposfera) pero varía mucho según el lugar y la hora del día. Una disminución de la temperatura con la altura se define como un gradiente negativo y un aumento de temperatura con la altura como uno positivo. De manera particular, es importante en la circulación vertical, ya que la temperatura del aire circundante determina el grado en el que una porción de aire se eleva o desciende.

En cuanto al análisis de los gradientes de temperatura en Bogotá, a partir de la información de los ozonosondeos, se tomaron diferentes sectores de la atmosfera, tal como se aprecian en la tabla 1. Para cada sector se obtuvo el promedio mensual y el análisis de su comportamiento es el siguiente:



- El gradiente negativo es más alto en la parte baja y alta de la troposfera (entre superficie y 5000 m y entre 10000 m y tropopausa), el cual es cercano a los -7,5 °C/1000 m, mientras que en la región media de la troposfera (entre 5000 m y 10000 m) el gradiente es más bajo, aproximadamente -6,5 °C/1000 m.

Tabla 1. Promedios mensuales de gradientes de temperatura por sectores °C/1000m.

Fuente: IDEAM, 2010

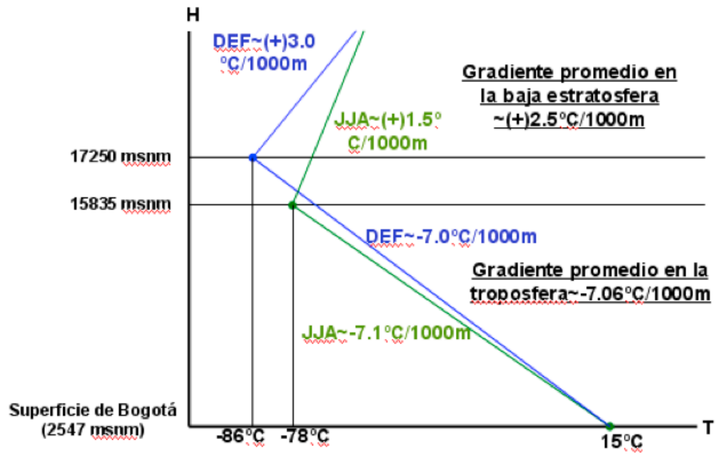
PROMEDIO Gradientes de Temperatura por sectores (C/1000 m)														
Sectores	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio	Promedio
Superficie hasta 5000 metros (m)	-7,2	-7,3	-7,4	-7,4	-7,5	-7,5	-7,6	-7,8	-7,6	-7,6	-7,4	-7,1	-7,5	
5000 m hasta 10000 m	-6,5	-6,5	-6,6	-6,3	-6,4	-6,7	-6,4	-6,5	-6,5	-6,4	-6,4	-6,4	-6,5	-7,15
10000 m hasta tropopausa	-7,4	-7,4	-7,4	-7,8	-7,5	-7,6	-7,6	-7,7	-7,6	-7,6	-7,5	-7,4	-7,5	
Superficie hasta tropopausa	**-6,98**	**-7,05**	**-7,07**	**-7,06**	**-7,09**	**-7,07**	**-7,10**	**-7,10**	**-7,07**	**-7,04**	**-7,07**	**-7,03**	**-7,06**	**-7,06**
Tropopausa hasta 25000 m	3,3	3,6	3,4	3,0	3,0	3,0	2,2	2,2	2,4	2,9	3,2	3,6	3,0	
25000 m hasta 30000 m	1,8	3,2	3,6	3,6	3,6	1,1	1,1	2,1	2,4	2,5	2,8	1,8	2,5	2,53
30000 m hasta 35000 m	3,4	2,3	1,8	2,6	1,1	Sin dato	1,3	1,5	2,0	2,0	2,5	3,1	2,1	

- El gradiente negativo promedio de la troposfera, teniendo en cuenta los gradientes promedios mensuales entre superficie y la tropopausa es de -7,06 °C/ 1000 m, pero al promediar los gradientes promedio en los diferentes sectores de la troposfera es de -7,15 °C/1000 m. Entonces se puede asumir que en promedio el gradiente en la troposfera en Bogotá es de -7,10 °C/1000 m.
- El promedio mensual del gradiente negativo de temperatura en la troposfera (ver Figura 10) es más alto hacia mitad de año (JJA-línea verde) y más bajo hacia los finales y comienzos del año en los sectores: entre superficie y 5.000 m, entre 10.000 m y la tropopausa y el promedio general entre la superficie y la troposfera.

- El promedio mensual del gradiente de temperatura en la parte baja de la estratosfera (sectores: entre tropopausa y 25000 m, entre 25000 m y 30000 m y entre 30000 m y 35000 m), tiende a ser más alto hacia los finales y comienzos del año y más bajo hacia mitad de año. En promedio el gradiente en esta zona de la estratosfera es de 2,5 °C/1000 m (ver tabla 1).

Fuente: IDEAM, 2010

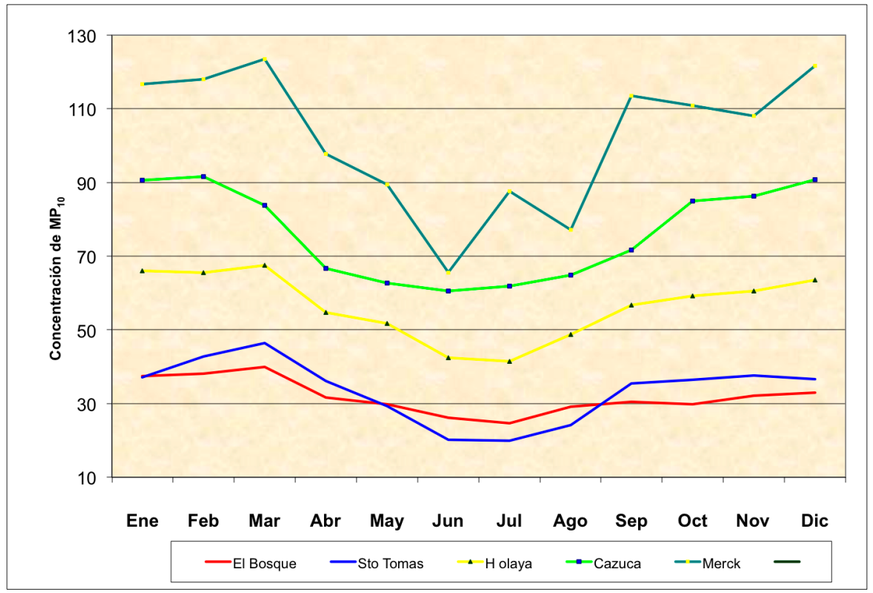
Figura 10. Gradientes de temperatura en la troposfera y baja estratosfera.



Finalmente, del anterior análisis se determina que, hacia mitad del año (periodo junio-julio-agosto - JJA) se presenta mayor inestabilidad atmosférica asociada a un mayor valor del gradiente térmico ambiental, esto contribuye a que durante estos meses se presenten los promedios de las concentraciones mensuales de contaminantes más bajas durante el año en Bogotá, por el contrario a lo que ocurre a finales y comienzos del año, que es cuando se presentan las concentraciones más altas de contaminantes, como se puede observar en la Figura 11, en la que se presenta el comportamiento del material particulado en algunas estaciones de la red de calidad del aire de la Secretaría Distrital de Ambiente – SDA en Bogotá.

Figura 11. Concentración de material particulado en Bogotá en µg/m³.

Fuente: IDEAM, 2010



ANEXO 10.
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SOLMÁFOROS INSTALADOS EN LA RED NACIONAL

Especificaciones técnicas

- **Medición:** Índice Ultravioleta, definido de acuerdo con la sugerencia de la OMS. Publicación No. ISBN 92 4 359007 3 (NLM clasificación: QT 162.U4).
- **Detector:** semiconductor con banda de medición angosta: UV, entre 280 - 390 nm.
- **Rango de medición del Índice:** 0,5 (1,38 µW/cm²) - 20 (55,6 µW/cm²)
- Domo de teflón para integración de radiación difusa y directa.
- Cabezal: duraluminio (Largo: 56 cm., Ancho: 26 cm., Alto: 22 cm.)
- Registro inalámbrico de datos vía modem GPRS
- Calibración realizada por la Universidad de Santiago para cada equipo, según estándares de la OMS. Calibración válida por 1 año.
- Salida con luz de color de acuerdo a la Tabla 1:

Tabla 1. Color del solmáforo, de acuerdo al IUV

COLOR	ÍNDICE UV µW/cm²
Verde	0 – 2,5
Amarillo	2,5 – 5, 5
Naranja	5,5 – 7,5
Rojo	7,5 – 10,5
Morado	> 10,5

Alimentación de energía

- Panel solar fotovoltaico de 20 W. Medidas 52,5 cm x 35 cm.
- Batería sellada de plomo de 7 A y 12 V de descarga profunda PowerSonic modelo PS-1270. Ubicada en el interior del Solmáforo.
- Controlador de carga de batería. Ubicado en el interior del solmáforo.

Especificaciones técnicas de la instalación

El solmáforo se instala sobre una columna metálica con acabado en pintura electrostática (alto= 2,4m, largo= 0,54m, ancho=0,15m), fijada a una base de concreto a través de una platina y pernos de anclaje. La base es en concreto de 3000 psi, de 82,5x40 cm x 15 cm de profundidad. El solmáforo cuenta con un panel solar en las alimentación de energía, por lo que no requiere conexión a la red eléctrica. En la Figura 1, se presenta un esquema de la instalación del solmáforo.

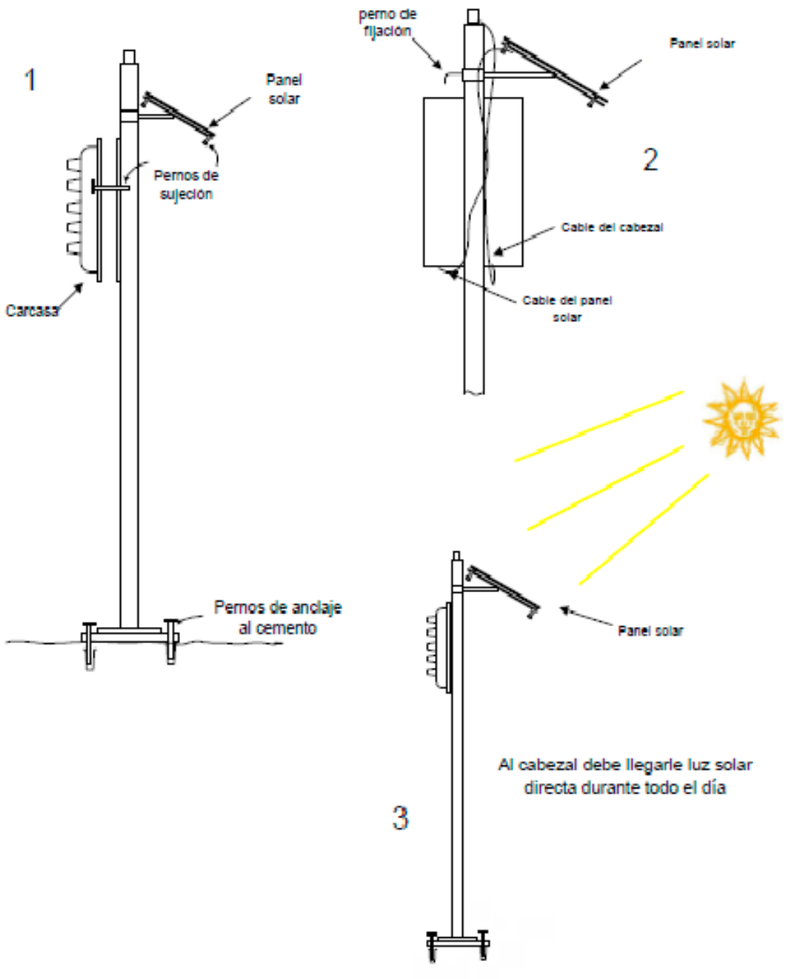
Transmisión de datos

El solmáforo instalado en Corferias cuenta con un sistema de transmisión de datos inalámbrico, que permite el envío de datos hasta un computador, utilizando un sistema de radio. El software instalado en el computador permite la captura de los

datos, los grafica en la pantalla, los guarda en el disco duro y (opcionalmente) los envía a una página web. El sistema para transmisión de información vía radio consta de los siguientes componentes:

Fuente (Optoelectrónica).

Figura 1. Esquema de instalación del Solmáforo.



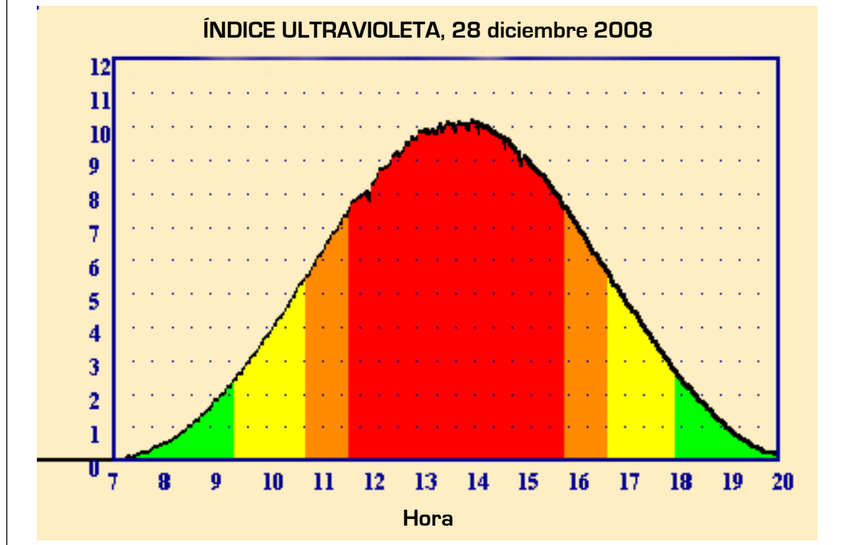
A. Emisión: Solmáforo, circuito emisor Xbee, 60 mW, 2,4 GHz y rango de transmisión con vista: 500 m. Rango en interiores: 100 m. El circuito está ubicado en el interior del solmáforo.

B. Recepción: Circuito receptor Xbee, computador con puerto USB, con el fin de aceptar la instalación y operación del programa de lectura de datos y cable USB. Para los restantes seis (6) solmáforos se instalará un sistema de transmisión de datos vía modem GPRS, el cual permitirá el envío de los datos de radiación UV y del índice UV captados por cada uno de los solmáforos en las diferentes ciudades a un modem receptor ubicado en la sede del IDEAM en Bogotá D.C.

Después de un día de medición, los datos transmitidos por los solmáforos deberían producir un gráfico similar al que se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Gráfico resultante de los datos captados por el solmáforo.

Fuente Optoelectrónica (b).



ANEXO 11.

PROMEDIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GLOBAL MEDIA RECIBIDA EN SUPERFICIE DE LAS ESTACIONES CONVENCIONALES DEL IDEAM USADAS EN EL ATLAS (Wh/m² POR DÍA)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m2 por día)												Promedio Anual	Periodo de información (años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Olaya Herrera	Medellín	Antioquía	6,22	-75,59	1516	4382,6	4409,5	4295,7	4165,2	4050,5	4321,6	4668,1	4605,7	4595,1	4419,0	3958,3	4149,4	4335,1	ene-85 a jun-97 (10)
Rio Claro	Sonsón	Antioquía	5,86	-74,85	449	4199,3	4201,9	4112,1	4701,4	4818,3	4650,9	4956,9	4898,0	4788,0	4184,2	4281,8	4200,9	4499,5	feb-87 a abr-89 (3)
Aeropuerto Santiago Pérez	Arauca	Arauca	7,07	-70,74	128	5156,3	4484,1	4617,1	4371,2	4292,6	4204,0	4299,1	4416,1	4895,9	4702,5	4786,5	5212,4	4619,8	ene-86 a ene-92 (4)
Aeropuerto Rafael Núñez	Cartagena	Bolívar	10,45	-75,52	2	5987,7	6412,9	6378,8	6012,8	4951,4	4988,7	5644,2	5213,1	5291,3	5014,5	4988,2	5746,8	5552,5	feb-90 a dic-00 (7)
Esclusa Tolón	Chiquinquirá	Boyacá	5,62	-73,78	2545	4856,7	4141,4	4626,4	3980,9	3855,3	4400,8	5213,7	4458,9	4685,7	4313,6	4385,7	4084,5	4417,0	ene-83 a dic-90 (3)
La Sierra	Duitama	Boyacá	5,97	-73,16	2700	4446,8	4411,4	4052,7	3990,4	4077,4	4297,7	4292,7	4387,1	4349,2	4074,5	3886,8	4466,3	4227,7	jul-85 a dic-01 (16)
Surbata Bonza	Duitama	Boyacá	5,80	-73,07	2485	4932,3	4933,7	4992,7	4741,5	4642,7	4407,6	4548,5	4637,0	4687,8	4758,8	4827,2	4969,5	4756,6	feb-87 a jun-97 (11)
Belencito	Nobsa	Boyacá	5,78	-72,89	2530	4894,5	4879,0	5083,2	3985,3	4314,4	4620,2	4760,5	5047,1	4543,5	4640,8	4530,9	4994,6	4691,1	ene-85 a sep-94 (5)
San Miguel de Sema	San Miguel de Sema	Boyacá	5,52	-73,72	2600	4716,0	4190,3	4821,8	4315,9	4120,5	4155,4	4419,4	4388,0	4542,7	3708,8	4150,7	4460,1	4332,5	ene-87 a nov-90 (3)
UPTC	Tunja	Boyacá	5,54	-73,36	2690	5061,0	4979,7	4855,5	4479,6	4198,1	4143,0	4167,1	4245,5	4412,5	4537,3	4341,2	4548,1	4497,4	dic-92 a dic-02 (7)
Villa de Leyva	Villa de Leyva	Boyacá	5,66	-73,54	2215	5151,1	5054,2	4891,2	4687,8	4457,9	4599,1	4559,7	4652,5	4654,0	4656,2	4290,9	4663,5	4693,2	ene-85 a dic-01 (16)
Maguare	El Doncello	Caquetá	1,64	-75,16	270	4407,6	4131,8	3630,4	3309,3	3492,4	3012,8	3292,8	3706,4	3914,7	4302,1	4112,8	4678,6	3832,6	ene-85 a may-05 (8)
Araracuara	Solano	Caquetá	-0,62	-72,38	150	4100,2	3761,7	3836,1	4018,8	3746,3	3301,8	4039,1	4227,2	4370,3	4343,3	4121,7	4053,5	3993,3	oct-86 a dic-99 (10)
Motilonia Codazzi	Agustín Codazzi	Cesar	10,00	-73,25	180	4382,9	4600,8	4785,2	4629,0	4630,8	4509,3	4374,2	4342,1	4613,5	4623,7	4412,1	4503,4	4533,9	ene-86 a oct-96 (11)
Unicórdoba	Montería	Córdoba	8,79	-75,86	15	4416,1	4325,0	4238,6	4311,0	4052,8	4527,7	4342,8	4195,2	4025,7	3968,8	3563,4	3385,1	4112,7	ene-85 a may-91 (3)
Aeropuerto El Dorado	Bogotá	Cundinamarca	4,71	-74,15	2547	4681,9	4312,7	4322,2	3716,7	3506,0	3658,9	3917,3	4168,2	3947,8	3961,0	4017,7	4241,4	4037,7	mar-81 a dic-04 (23)
La Iberia	Chocontá	Cundinamarca	5,03	-73,72	2760	4726,4	4235,6	4786,9	3986,8	3885,6	3814,6	3479,7	3339,0	4026,3	4517,1	4345,0	4232,2	4114,6	ene-80 a dic-90 (6)
Represa del Neusa	Cogua	Cundinamarca	5,15	-73,98	3100	4626,4	4047,2	4254,3	3776,3	3633,2	3525,1	3700,7	4154,2	4254,3	3967,0	4036,8	4333,3	4025,7	ene-80 a dic-90 (7)
La Ramada	Funza	Cundinamarca	4,72	-74,18	2545	4376,5	3930,7	4408,1	4036,3	4249,8	4152,4	4445,7	4618,1	4639,2	4585,3	4520,7	4743,6	4392,2	ene-83 a dic-90 (3)
Base Palanquero	Puerto Salgar	Cundinamarca	5,47	-74,65	172	4933,4	4893,9	4535,7	5299,8	5977,8	5860,4	5533,6	5938,3	5385,9	5503,3	5432,4	5582,4	5406,4	ene-83 a dic-85 (2)
Muña	Sibaté	Cundinamarca	4,55	-74,25	2565	4419,4	4588,0	4455,5	3965,8	4119,3	4288,0	4596,2	4550,8	4505,5	3900,7	4008,9	4068,2	4288,9	mar-80 a dic-90 (7)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m2 por día)												Promedio Anual	Periodo de información (años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Simijaca	Simijaca	Cundinamarca	5,50	-73,85	2572	5074,2	5439,4	5824,3	4995,1	5002,1	4650,8	5382,4	5364,9	4948,6	4483,4	4817,1	4990,4	5081,1	ene-85 a dic-90 (3)
La Primavera	Subachoque	Cundinamarca	4,85	-74,22	2590	4683,4	4548,5	4952,1	4201,9	4114,7	4184,5	4360,1	4240,3	4505,5	4297,3	4614,8	4392,7	4424,6	ene-80 a dic-90 (8)
Tabio	Tabio	Cundinamarca	4,77	-73,93	2620	4677,6	3777,4	3805,3	3307,6	3404,1	3665,8	3500,6	3676,2	3559,9	3771,6	4264,7	3948,4	3779,9	ene-80 a dic-90 (6)
Novilleros	Villa de San Diego de Ubaté	Cundinamarca	5,33	-73,78	2550	4565,9	4453,1	4717,1	4170,5	3970,5	3796,0	4007,7	4212,4	4322,9	4324,0	4003,0	4215,9	4229,9	ene-80 a dic-90 (8)
Hidrobetania	Campoalegre	Huila	2,71	-75,42	500	4462,7	4420,4	4188,8	4068,3	4320,4	4527,0	4454,1	4501,8	4825,7	4491,8	4712,5	4387,3	4446,7	abr-90 a feb-97 (7)
Aeropuerto Benito Salas	Neiva	Huila	2,95	-75,29	439	4836,0	4700,4	4590,5	4628,9	4552,2	4550,1	4509,7	4656,6	4785,1	4782,3	4607,8	4618,0	4651,5	mar-90 a ago-03 (14)
Parque Arqueológico	San Agustín	Huila	1,89	-76,29	1800	4716,9	4657,5	4311,1	4462,7	4602,3	4384,2	4136,8	4228,7	4894,9	4829,1	4777,9	4826,6	4569,1	may-90 a ago-03 (14)
La Mina	Hatonuevo	La Guajira	11,14	-72,62	80	5091,6	4726,6	5105,4	5011,7	5033,1	5192,6	5307,9	5527,4	5077,0	5035,9	4756,2	4498,9	5030,4	abr-89 a dic-00 (7)
Aeropuerto Almirante Padilla	Riohacha	La Guajira	11,53	-72,92	4	5202,8	5556,0	5761,0	5898,3	5618,0	5975,8	6237,6	6045,2	5832,8	5247,8	4977,5	4916,6	5605,8	sep-91 a abr-03 (10)
Nazareth	Uribia	La Guajira	12,18	-71,28	85	4868,0	4763,8	5365,8	5023,6	4880,2	6052,6	5670,4	5842,4	5501,6	4601,5	4118,1	4321,1	5084,1	dic-86 a sep-94 (7)
Prado Sevilla	Zona Bananera	Magdalena	10,76	-74,15	18	5373,1	5537,5	5698,7	5694,0	5349,7	5392,5	5488,7	5471,5	5037,5	5194,5	5026,5	5393,5	5388,1	ene-90 a sep-99 (10)
La Holanda	Granada	Meta	3,52	-73,72	360		3658,7	3841,7	3595,3	4093,4	4482,2	3982,1	4742,8	5158,3	4686,3	5355,1	4515,3	4373,7	feb-00 a dic-00 (1)
Aeropuerto Vanguardia	Villavicencio	Meta	4,16	-73,62	422	4784,9	4514,5	4337,1	4565,8	4699,2	4650,1	4542,9	4993,2	5307,6	5286,1	4747,4	4580,0	4750,7	ene-90 a may-01 (10)
Aeropuerto San Luis	Aldana	Nariño	0,86	-77,68	2961	4236,0	3950,9	3902,6	3980,9	4161,5	4337,7	4301,9	4058,9	4203,6	4230,1	3997,0	4003,5	4113,7	ene-85 a jul-03 (10)
Obonuco	Pasto	Nariño	1,20	-77,30	2710	3710,6	3417,9	3534,0	3574,7	3497,4	3302,1	3576,1	3555,9	3530,9	3544,8	3475,5	3473,3	3516,1	sep-89 a dic-93 (4)
Ábrego	Ábrego	N. de Santander	8,09	-73,22	1430	4910,9	4804,9	4839,1	4582,7	4515,6	4841,7	4885,8	4719,4	4723,3	4720,8	4510,5	4749,8	4733,7	feb-89 a may-02 (13)
Cinera Villa Olga	Cúcuta	N. de Santander	8,17	-72,47	100	4185,4	4708,1	5086,7	4877,9	5321,1	5728,1	5741,8	6006,7	6141,4	5467,2	5005,4	4895,4	5263,8	ene-87 a ago-05 (6)
Salazar	Salazar	N. de Santander	7,77	-72,83	860	4667,5	4557,0	4292,4	4549,9	5059,7	5032,8	5695,3	5471,3	5470,7	5036,9	4801,9	4497,3	4927,7	ene-91 a jul-01 (8)
Aeropuerto Matecaña	Pereira	Risaralda	4,82	-75,74	1342	4279,4	4406,3	4283,9	4099,7	3805,1	3940,5	4243,6	4362,0	4273,2	4338,6	4183,3	4315,4	4210,9	oct-90 a nov-96 (7)
Aeropuerto Palonegro	Lebrija	Santander	7,12	-73,18	1189	4012,9	3930,1	4029,2	3908,6	4164,3	3871,2	4081,0	3656,1	4079,5	4062,9	3830,9	3995,5	3968,5	may-87 a mar-98 (7)
El Cucharo	Pinchote	Santander	6,53	-73,20	975	4862,1	4889,1	4969,9	4813,3	4788,5	4839,8	4789,8	5093,5	5098,7	5116,8	4975,5	4988,8	4935,5	nov-91 a may-02 (12)
Guamo	Guamo	Tolima	4,01	-74,98	360	5016,8	4783,9	4511,0	4979,6	4979,8	4824,6	5035,4	5442,9	5519,9	5395,2	5006,9	4828,2	5027,0	abr-93 a dic-00 (7)
Aeropuerto Perales	Ibagué	Tolima	4,42	-75,14	943	4615,6	4578,8	4621,2	4651,4	4627,9	4717,9	4896,1	4986,2	4846,8	4679,7	4404,6	4332,7	4663,2	nov-89 a dic-99 (9)
Ing. Manuelita	Palmira	Valle del Cauca	3,57	-76,28	1020	4634,3	4652,7	4625,4	4490,0	4419,0	4248,0	4570,1	4665,8	4607,5	4512,3	4363,1	4444.9	4526,2	jul-74 a jun-05 (28)
Las Gaviotas	Cumaribo	Vichada	4,55	-70,93	171	5160,0	4990,4	4708,3	4254,0	4016,3	3820,5	4007,2	4227,2	4563,5	4502,4	4385,4	4814,5	4454,1	ene-89 a abr-01 (13)

ANEXO 12.

PROMEDIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GLOBAL MEDIA RECIBIDA EN SUPERFICIE DE LAS ESTACIONES AUTOMÁTICAS DEL IDEAM USADAS EN EL ATLAS (Wh/m² POR DÍA)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m2 por día)												Promedio Anual	Periodo de información (años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Vásquez Cobo	Leticia	Amazonas	-4,19	-69,94	84	4248,1	3980,1	3853,4	4068,3	3843,2	3783,9	4014,6	4739,4	5038,0	4713,3	4802,1	4457,7	4295,2	ago-14 a dic-16 (3)
Maceo	Maceo	Antioquía	6,57	-74,79	980	4495,8	4565,2	4378,1	4407,1	4539,3	5079,8	5297,4	5390,0	5388,2	4497,7	3973,9	4166,4	4681,6	abr-06 a dic-16 (9)
Metromedellin	Medellín	Antioquía	6,33	-75,55	1440	4423,3	4598,0	4356,7	4346,0	4345,7	4850,1	4976,5	4848,7	4890,8	4262,0	4188,7	4285,0	4530,9	jul-05 a dic-16 (9)
La Selva	Rionegro	Antioquía	6,13	-75,41	2125	4182,9	4279,7	4092,1	4242,1	4730,9	5214,6	5393,5	5153,5	4796,7	4376,9	3953,9	4357,5	4564,5	may-05 a dic-16 (6)
Santa Bárbara	Santa Bárbara	Antioquía	5,86	-75,56	1680	5152,7	5103,2	4904,0	4528,4	4528,3	5027,5	5423,3	5056,7	5073,0	4698,8	4468,1	4481,8	4870,5	abr-06 a dic-16 (8)
Aragón	Santa Rosa	Antioquía	6,53	-75,83	2600	4187,9	4253,7	3791,4	3731,5	3897,1	4553,5	4856,6	4784,4	4789,4	3854,8	3528,5	3832,5	4171,8	ene-05 a dic-16 (12)
Hacienda Cotové	Santafé de Antioquia	Antioquía	6,53	-75,83	534	4494,7	4762,8	4628,1	4922,9	4837,2	4782,0	4962,4	5009,7	4817,2	4635,0	4437,3	4337,9	4718,9	may-05 a dic-16 (9)
Santa Isabel-Valdivia	Valdivia	Antioquía	7,16	-75,44	1132	3959,4	4240,6	3972,4	4043,9	4039,9	4337,2	4713,5	4632,0	4595,5	4193,2	4068,7	4073,5	4239,1	may-05 a abr-16 (11)
Vegachí	Vegachí	Antioquía	6,77	-74,80	990	4351,9	4419,2	4177,8	4195,5	4394,3	4918,1	5217,0	5055,9	4911,2	4330,3	4174,1	4279,5	4535,4	may-05 a dic-16 (8)
Las Flores (ENAVAL)	Barranquilla	Atlántico	11,04	-74,82	8	6213,4	6027,1	6297,6	5660,4	5566,3	5679,1	5888,9	5676,3	5194,6	4720,0	4767,6	5524,8	5601,4	nov-09 a dic-16 (5)
Repelón	Repelón	Atlántico	10,49	-75,13	10	5592,8	5763,0	5799,6	5747,4	4954,0	5675,6	5650,9	5475,8	5310,5	4639,5	4724,3	5327,4	5388,4	abr-09 a dic-16 (3)
Aeropuerto Ernesto Cortissoz	Soledad	Atlántico	10,92	-74,78	31	5711,4	5935,8	5992,3	5412,7	4676,5	4780,6	4903,2	5129,5	5187,7	4543,6	4542,0	5283,7	5174,9	mar-14 a dic-16 (3)
Carmen de Bolívar	Carmen de Bolívar	Bolívar	9,72	-75,11	190	4775,2	5058,9	5124,2	4895,3	4607,7	5217,8	5302,6	5154,6	4548,0	4173,5	4182,5	4473,3	4792,8	feb-12 a dic-16 (5)
Aquitania	Aquitania	Boyacá	5,56	-72,88	3021	5354,8	5542,8	4800,7	4247,8	4069,4	4241,8	4062,1	4045,7	4346,2	4414,8	4390,1	4996,1	4542,7	abr-05 a dic-16 (10)
Chinavita	Chinavita	Boyacá	5,22	-73,35	2012	3726,9	3672,1	3298,2	2916,4	2845,5	2669,2	2558,1	2665,7	2873,8	3357,4	3415,8	3806,5	3150,5	mar-05 a dic-16 (11)
La Capilla	La Capilla	Boyacá	5,10	-73,44	1917	5330,9	5150,0	4758,8	4305,8	4288,8	3643,5	3693,4	3896,9	4641,2	5072,1	4961,1	5248,1	4582,6	mar-05 a dic-16 (9)
Tunguavita	Paipa	Boyacá	5,75	-73,12	2470	5608,3	5426,1	4830,1	4369,5	4362,1	4411,0	4533,9	4402,1	4436,6	4625,7	4797,3	5245,3	4754,0	abr-05 a dic-16 (12)
San Pablo de Borbur	San Pablo de Borbur	Boyacá	5,65	-74,07	742	4714,9	4350,9	4115,9	4388,0	4180,8	4598,8	4718,9	4925,9	4972,6	4771,4	4604,2	4817,4	4596,6	jun-08 a dic-16 (8)
Santa María	Santa María	Boyacá	4,84	-73,26	1300	3975,2	3727,5	3244,7	3192,6	3073,0	2851,4	2861,5	3346,4	4063,5	4016,0	3631,3	3679,2	3471,8	abr-05 a dic-16 (12)
Socha	Socha	Boyacá	5,99	-73,00	2503	5179,5	5272,1	4729,5	4101,3	4188,0	4251,8	4233,6	4205,0	4103,3	4234,2	4262,5	4731,1	4457,7	abr-05 a dic-16 (11)
Sogamoso	Sogamoso	Boyacá	5,75	-72,91	2495	5733,9	5260,2	5182,2	4371,6	4346,4	4327,4	4483,6	4258,4	4312,9	4398,0	4654,2	5081,4	4700,9	sep-12 a dic-16 (5)
Zetaquira	Zetaquirá	Boyacá	5,29	-73,17	1436	4586,0	4346,2	3935,1	3755,0	3575,9	3122,0	2944,9	3105,5	3546,4	3975,0	4223,5	4363,2	3789,9	abr-05 a dic-16 (10)
EMAS	Manizales	Caldas	5,09	-75,51	2211	4115,9	4050,6	3783,4	3673,3	3507,9	3584,5	4045,7	4003,8	4114,2	3705,6	3522,3	3756,8	3822,0	may-05 a dic-16 (12)
Villamaría	Villamaría	Caldas	5,05	-75,51	1906	4529,4	4440,3	4299,7	4068,0	3896,0	3886,1	4204,5	4204,1	4351,1	4143,7	4092,0	4268,2	4198,6	may-05 a dic-16 (10)
Florencia - deslizamiento	Florencia	Caquetá	1,73	-75,65	600	3873,1	3684,1	3279,3	3261,5	2978,0	2892,9	3081,6	3301,6	3726,8	3644,1	3546,0	3712,9	3415,2	feb-06 a dic-16 (7)
Macagual - Florencia	Florencia	Caquetá	1,50	-75,66	280	4082,3	3952,6	3349,6	3485,4	3004,8	3193,8	3137,7	3577,7	3770,0	4001,1	3997,9	4019,1	3631,0	jul-05 a dic-16 (6)
San Vicente del Caguan	San Vicente del Caguán	Caquetá	2,06	-74,76	300	5060,0	4445,4	4302,7	4130,2	4044,5	3789,6	3873,4	4183,3	5024,5	5001,2	4742,3	4982,4	4465,0	jul-09 a dic-16 (6)
El Diamante	Paz de Ariporo	Casanare	5,82	-71,42	160	5319,4	5446,4	5005,4	4456,5	4639,5	4318,6	4255,1	4641,8	5233,9	5276,8	4979,8	5128,2	4891,8	oct-05 a dic-16 (6)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m2 por día)												Promedio Anual	Periodo de información (años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Aeropuerto Yopal (El Alcaraván)	Yopal	Casanare	5,32	-72,39	325	5769,2	5396,2	4889,9	4512,0	4433,6	4357,4	4283,5	4528,4	5192,6	5130,1	5183,4	5521,8	4933,2	nov-09 a dic-16 (6)
El Diviso	Argelia	Cauca	2,31	-77,26	1750	4172,6	4430,9	4461,1	4472,1	4780,2	5236,2	5330,0	5521,9	5454,3	4722,8	4270,9	4037,5	4740,9	oct-05 a dic-16 (6)
Aeropuerto Guapi	Guapi	Cauca	2,57	-77,89	42	3151,0	3335,9	3481,1	3841,4	3475,9	3465,0	3398,0	3729,5	3734,7	3316,3	3017,2	3157,6	3425,3	oct-05 a dic-16 (7)
Inza	Inza	Cauca	2,55	-76,06	1800	4592,7	4475,6	4255,5	4210,7	3991,9	3736,9	3971,4	3802,2	4236,8	4421,7	4384,7	4519,6	4216,6	dic-05 a dic-16 (9)
La Sierra	La Sierra	Cauca	2,19	-76,75	1870	4946,6	4865,3	4287,5	4030,6	4424,6	4611,6	4979,7	4932,9	4811,2	4603,2	4405,1	4753,5	4637,7	oct-05 a dic-16 (6)
Estrecho Patía	Patia	Cauca	1,96	-77,12	720	5599,7	5094,1	4960,1	4842,2	4573,7	4603,1	4632,3	4919,9	5139,0	5093,4	4960,9	5148,6	4963,9	oct-05 a dic-16 (6)
Aguachica	Aguachica	Cesar	8,12	-73,58	103	5102,1	5727,6	5355,7	4722,0	4900,1	4964,9	5527,4	5452,2	5217,0	4999,4	4405,1	4657,9	5085,9	sep-05 a dic-16 (3)
Fedearroz	Valledupar	Cesar	10,46	-73,25	184	5494,1	5791,0	5531,7	5629,6	5402,5	5648,3	5716,7	5482,4	5202,8	4982,6	4973,7	5227,5	5423,6	sep-05 a dic-16 (11)
Capurgana	Acandí	Chocó	8,62	-77,33	19	4054,4	4016,9	4192,8	4205,0	4020,2	4555,6	4559,3	4523,2	4496,9	4365,9	3924,2	3897,2	4234,3	abr-07 a dic-16 (7)
IDEAM Bogotá Centro	Bogotá	Cundinamarca	4,60	-74,07	2646	4122,6	3948,7	3715,8	3595,0	3705,2	3808,3	4187,3	4150,7	4262,4	3636,5	3193,7	3364,1	3807,5	dic-13 a dic-16 (4)
Universidad Nacional	Bogotá	Cundinamarca	4,64	-74,09	2556	4750,5	4291,0	3820,4	3584,9	3819,4	3989,8	4077,0	4027,6	3959,1	3891,4	3640,9	4018,9	3989,2	jun-12 a dic-16 (5)
Nueva Generación	Cota	Cundinamarca	4,78	-74,09	2590	4458,8	4223,1	3592,4	3034,4	3225,2	3602,0	3592,0	3565,0	3626,5	3336,8	3344,0	3702,1	3608,5	feb-15 a dic-16 (2)
Universidad de Cundinamarca	Girardot	Cundinamarca	4,31	-74,81	309	4297,0	4368,6	4279,6	4382,1	4263,1	4388,2	4704,4	4737,3	4840,3	4498,0	4126,1	4438,6	4443,6	abr-05 a dic-16 (10)
Santa Cruz de Siecha	Guasca	Cundinamarca	4,78	-73,87	3100	4306,0	4294,7	3745,9	3554,1	3582,3	3743,5	3823,4	3591,2	3670,2	3794,7	3654,3	4128,1	3824,0	abr-05 a dic-16 (11)
Tibaitatá	Mosquera	Cundinamarca	4,69	-74,21	2543	4789,7	4755,4	4152,4	3822,9	3587,1	3887,9	3882,2	4062,9	4141,9	4023,0	3943,8	4265,5	4109,6	feb-05 a dic-16 (12)
Hacienda Santa Ana	Nemocón	Cundinamarca	5,09	-73,88	2572	4936,9	4700,0	4124,5	3888,6	3980,7	4006,2	4122,6	3961,7	3868,6	4227,3	4263,2	4756,1	4236,4	mar-05 a dic-16 (10)
Pasca	Pasca	Cundinamarca	4,31	-74,31	2256	4641,6	4214,8	3967,4	3984,6	3890,3	3971,6	3930,4	3936,1	4251,6	4037,5	3699,2	4249,3	4064,5	jul-08 a dic-16 (8)
Quebrada Negra	Quebrada Negra	Cundinamarca	5,14	-74,48	1107	4662,3	4827,9	4655,4	4526,4	4484,7	4611,6	4760,0	4424,1	4806,6	4835,4	4674,0	4674,7	4661,9	abr-05 a dic-16 (8)
San Cayetano	San Cayetano	Cundinamarca	4,52	-74,09	2807	3286,9	3014,4	2888,6	3038,4	3266,7	3472,3	3639,9	3452,1	3534,6	3117,8	2832,3	3328,9	3239,4	feb-05 a dic-16 (8)
Villa Teresa	Sumapaz	Cundinamarca	4,35	-74,15	3624	4839,6	4290,8	3807,2	3391,3	3702,2	3856,8	3971,9	3811,0	4031,9	3929,3	3679,2	4267,1	3964,9	may-07 a dic-16 (10)
La Boyera	Villa de San Diego de Ubaté	Cundinamarca	5,30	-73,85	2610	4857,3	4822,2	4290,0	3845,2	3882,1	4065,4	4033,6	4168,8	4309,9	4160,1	3867,1	4434,8	4228,0	ago-05 a dic-16 (10)
Villeta	Villeta	Cundinamarca	5,02	-74,47	878	4666,5	4483,5	4497,5	4452,6	4496,9	4381,0	4457,7	4388,1	4494,2	4746,1	4752,3	4806,5	4551,9	may-05 a dic-16 (10)
Hacienda Manila	Baraya	Huila	3,13	-75,08	600	5485,4	5252,4	4881,4	5064,4	5154,4	4933,9	5063,1	4929,2	5227,2	5146,5	5157,3	5379,8	5139,6	jul-05 a dic-16 (6)
Los Guacharos	La Palestina	Huila	2,22	-76,12	1590	3744,2	3385,3	2988,5	3323,4	3254,2	3235,6	3297,6	3286,0	3894,5	3428,0	3327,3	3443,9	3384,0	jun-06 a dic-16 (8)
La Plata	La Plata	Huila	2,76	-75,07	2101	4296,7	3889,9	3546,3	3616,7	3738,4	3741,5	3769,1	3763,8	4133,0	3945,6	3881,7	3976,4	3858,3	jul-05 a dic-16 (9)
Marengo	Pitalito	Huila	2,22	-76,12	1550	4632,9	4189,4	3852,5	4291,6	4198,0	3902,1	3719,5	3824,9	4474,9	4352,0	4363,2	4573,9	4197,9	oct-08 a dic-16 (6)
La Primavera	Salado Blanco	Huila	2,02	-76,11	1919	4087,2	3736,0	3625,3	4061,1	4192,9	3898,3	3770,3	4015,8	4486,1	4177,9	3546,5	3506,4	3925,3	jul-05 a dic-16 (8)
Granja Paici	Uribia	La Guajira	11,59	-72,33	45	5592,9	5884,0	5477,0	5828,4	5457,6	6093,4	6069,0	5996,7	5715,0	4976,4	4970,4	4989,7	5587,5	abr-05 a dic-16 (9)
La Gran Vía	Aracataca	Magdalena	10,85	-74,13	30	5196,8	5363,6	5299,8	5339,3	5362,3	5122,4	5148,0	4994,4	4885,5	4607,7	4575,2	4919,1	5067,8	oct-08 a dic-16 (8)
Batallón No. 6	Fundación	Magdalena	10,47	-73,93	1280	5540,0	5246,8	4614,0	3916,0	3785,5	4131,9	4044,5	4154,4	4095,7	3792,0	4171,8	4142,0	4302,9	mar-06 a dic-16 (7)
Universidad Tecnológica de Magdalena	Santa Marta	Magdalena	11,22	-74,19	7	5746,9	6080,3	6082,1	6079,9	5874,5	5736,6	5689,1	5368,1	5492,3	4885,7	4803,0	5438,5	5606,4	sep-07 a dic-16 (8)
La Palomera	Puerto López	Meta	4,26	-72,56	188	4969,7	5146,2	4435,1	4134,5	4027,4	3956,8	3919,4	4276,8	4616,9	4659,3	4617,6	4824,8	4465,4	sep-05 a dic-16 (8)
Salinas de Upin	Restrepo	Meta	4,27	-73,59	690	3044,3	2795,7	2623,4	2616,6	2482,0	2383,1	2390,4	2798,0	3473,2	3277,7	2803,3	2928,5	2801,3	jul-08 a dic-16 (9)
ICA Villavicencio	Villavicencio	Meta	4,14	-73,63	444	5207,4	4741,5	4375,9	4406,6	4422,1	4242,6	4358,1	4585,2	5264,7	5103,4	4817,3	4925,0	4704,1	mar-07 a dic-16 (10)
La Libertad	Villavicencio	Meta	4,06	-73,47	336	5329,0	5172,8	4796,3	4952,7	4895,4	4468,9	4498,9	4838,9	5452,9	5006,4	4743,1	5143,8	4941,6	may-11 a dic-16 (5)
La Josefina	Contadero	Nariño	0,93	-77,49	2450	3858,9	4290,2	3766,8	4083,0	3987,8	4150,3	4132,1	3649,9	3865,0	3893,4	4049,9	3941,0	3972,4	dic-05 a dic-16 (3)
Botana	Pasto	Nariño	1,16	-77,28	2820	3876,0	3552,8	3479,0	3688,7	3679,0	3712,3	3895,7	4001,2	4131,4	3844,9	3843,9	3581,7	3773,9	may-05 a dic-16 (11)
Cerro Páramo-Puerres	Puerres	Nariño	0,84	-77,39	3585	2620,7	2537,1	2389,8	2564,4	2525,7	1871,4	1850,9	1849,4	2198,5	2945,6	3146,3	2868,0	2447,3	dic-05 a dic-16 (11)
Viento Libre	Taminango	Nariño	1,62	-77,34	1400	4979,0	4514,8	4638,7	4697,4	4598,5	4811,9	4867,5	5099,3	5150,0	4862,3	4885,1	4783,9	4824,0	nov-05 a dic-16 (9)
El Paraíso	Túquerres	Nariño	1,07	-77,64	3120	3744,2	3634,7	3294,2	3698,5	3732,4	3747,1	3850,6	3968,8	3972,5	3782,8	3724,2	3872,3	3751,8	ene-06 a dic-16 (6)
Universidad Francisco de Paula Santander	Cúcuta	Norte de Santander	7,90	-72,49	311	5023,1	5141,9	4711,7	4972,9	5453,6	5323,9	5431,6	5720,8	6156,4	5574,6	5230,6	4878,5	5301,6	ene-06 a dic-16 (10)

Estación	Municipio	Departamento	Lat	Long	Elevación (m.s.n.m.)	Valor promedio (Wh/m2 por día)												Promedio Anual	Periodo de información (años aproximados con información)
						ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Alcaldía de Herrán	Herrán	Norte de Santander	7,51	-72,49	2040	4208,9	4246,0	3951,3	3235,9	3535,5	3805,3	3969,3	4091,7	4155,3	3722,5	3465,5	3659,6	3837,2	nov-06 a dic-16 (6)
Unipamplona	Pamplona	Norte de Santander	7,36	-72,67	2362	4411,1	3868,7	3829,6	3344,1	3446,0	3602,7	3809,5	4255,9	4149,8	3977,4	3703,9	4018,0	3868,1	oct-09 a dic-16 (4)
Acueducto Mocoa	Mocoa	Putumayo	1,16	-76,65	650	3501,1	2970,3	2938,8	3127,5	2872,0	2617,7	2715,3	3280,3	3758,4	3905,6	3721,4	3463,9	3239,4	ene-11 a dic-16 (6)
El Pepino	Mocoa	Putumayo	1,08	-76,67	760	3622,2	3476,3	3157,7	3535,5	3321,2	2862,8	3124,2	3181,6	3744,4	3974,3	3941,0	3876,3	3484,8	ago-05 a dic-16 (8)
Armenia	Armenia	Quindío	4,53	-75,69	1485	4144,2	4133,6	4057,0	3909,2	3724,8	3889,2	4358,1	4399,0	4522,1	4003,4	4048,4	3782,7	4081,0	feb-06 a dic-16 (10)
Calarcá	Calarcá	Quindío	4,53	-75,60	2255	3094,0	2856,6	2604,6	2489,8	2500,5	2669,0	2987,5	3203,3	3324,2	2665,7	2466,6	2631,0	2791,1	may-05 a dic-16 (10)
Parque Santa Emilia	Belén de Umbría	Risaralda	5,21	-75,90	1748	3764,2	4148,9	4020,7	3522,4	3735,2	4271,8	4582,1	4533,6	4382,6	3703,8	3410,3	3540,2	3968,0	oct-05 a dic-16 (10)
Marsella	Marsella	Risaralda	4,93	-75,74	1659	4320,6	4261,8	4321,3	4033,1	4012,6	4019,2	4375,4	4402,0	4425,4	4075,7	3970,1	3914,3	4177,6	may-05 a dic-16 (10)
Parque Nacional Natural Quimbaya	Pereira	Risaralda	4,76	-75,74	1881	4018,4	3874,0	3582,8	3574,2	3521,1	3623,7	4017,6	3881,1	3983,2	3496,2	3278,7	3495,9	3695,6	may-05 a dic-16 (8)
Aeropuerto Sesquicentenario	San Andrés	San Andrés y Providencia	12,54	-81,73	1	5242,0	5953,9	6481,5	6038,1	5649,6	4930,9	5580,0	5274,8	5103,3	4726,5	4295,7	4480,7	5313,1	jul-14 a dic-16 (2)
Vizcaína-La Lizama	Barrancabermeja	Santander	6,98	-73,70	114	4519,3	4648,6	4514,8	4348,4	4539,1	4636,9	4868,1	5033,4	4921,3	4665,4	4269,5	4248,9	4601,1	sep-10 a dic-16 (6)
Mogotes	Mogotes	Santander	6,47	-72,97	1673	4374,6	4583,1	4052,9	4033,7	3924,5	4002,2	4014,0	4173,1	4046,7	4094,4	3956,2	4063,4	4109,9	abr-05 a dic-16 (8)
San Vicente de Chucurí	San Vicente de Chucurí	Santander	6,82	-73,47	1073	3366,0	3525,7	3016,4	2938,4	3114,6	3418,7	3589,5	3629,3	3652,3	3170,3	2872,8	2813,4	3258,9	may-05 a dic-16 (6)
El Tesoro - IDEAM	Sampuez	Sucre	9,36	-75,29	168	5355,5	5293,0	5060,0	5561,1	4911,2	5592,9	5579,7	5371,7	4772,8	4735,9	4825,5	4728,8	5149,0	nov-12 a dic-16 (3)
San Marcos	San Marcos	Sucre	8,60	-75,14	31	5049,7	5162,3	5098,3	4922,2	4656,4	4957,7	5158,8	5212,1	4898,0	4622,9	4402,8	4484,3	4885,5	oct-05 a dic-16 (7)
Unisucre (Puerta Roja)	Sincelejo	Sucre	9,32	-75,39	160	4843,9	4986,3	4794,7	4343,1	3899,6	4510,0	4530,5	4517,6	4324,5	3996,1	3750,6	4265,7	4396,9	may-05 a dic-16 (5)
Hacienda Pajonales	Ambalema	Tolima	4,76	-74,83	277	4863,3	4839,3	4511,5	4915,4	4904,2	4896,9	5211,9	5156,5	5220,6	4816,3	4909,4	5065,6	4942,6	abr-05 a dic-16 (10)
Cajamarca	Cajamarca	Tolima	4,44	-75,50	2530	3731,2	4075,2	4113,1	4033,1	4211,1	3990,4	4254,4	3916,2	3932,8	3936,0	3645,6	3657,8	3958,1	dic-06 a dic-16 (9)
Nataima	Espinal	Tolima	4,19	-74,96	393	4399,5	5146,3	4851,7	5100,8	4891,9	5105,9	5229,0	5336,2	5644,3	5292,9	4692,6	4387,0	5006,5	mar-07 a dic-16 (7)
Batallón Rooke	Ibagué	Tolima	4,42	-75,25	1323	4507,5	4546,5	4579,5	4532,9	4556,0	4985,6	5160,3	4981,7	5088,1	4678,5	4230,7	4303,7	4679,2	dic-06 a dic-16 (8)
Cerros Noroccidentales	Ibagué	Tolima	4,47	-75,24	1946	3571,2	3156,5	3039,6	3236,5	3041,2	3584,5	4085,8	4330,9	4622,8	3405,3	2535,5	2812,9	3451,9	nov-05 a dic-16 (10)
Murillo	Murillo	Tolima	4,87	-75,17	3023	3692,8	3880,7	3944,4	4051,6	4640,1	5260,4	5402,0	5188,0	4914,5	3895,2	3453,0	3601,0	4327,0	nov-05 a dic-16 (10)
Las Brisas	Ansermanuevo	Valle del Cauca	4,78	-76,14	1971	4335,8	4280,4	4324,8	4401,5	4368,9	4976,8	5294,2	5174,4	5234,5	4616,6	4112,2	4333,4	4621,1	jun-05 a dic-16 (4)
Siloe	Cali	Valle del Cauca	3,43	-76,56	1238	4122,6	4481,4	4533,9	4370,5	4131,7	4261,1	4738,1	4739,1	4961,8	4321,0	4013,0	4086,3	4396,7	jul-07 a dic-16 (5)
Univalle	Cali	Valle del Cauca	3,38	-76,53	996	4568,8	4564,6	4526,2	4436,4	4313,3	4488,6	4762,9	4829,9	4794,9	4474,3	4224,7	4267,7	4521,0	nov-06 a dic-16 (9)
Zaragoza	Cartago	Valle del Cauca	4,69	-75,93	943	5044,8	5057,3	5457,9	5279,0	5123,4	5204,0	5468,0	5389,4	5708,8	5066,3	5081,0	4875,7	5229,6	jun-05 a dic-16 (2)
El Vinculo	Guadalajara de Buga	Valle del Cauca	3,83	-76,30	981	4300,1	3991,2	4447,8	4497,6	4137,8	4218,9	4340,1	4378,8	4587,8	4221,6	4267,8	4247,1	4303,0	jun-05 a dic-16 (6)

ANEXO 13.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE VARIABLES ASTRONÓMICAS PARA DETERMINAR RADIACIÓN GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo para determinar las variables astronómicas, utilizadas para cuantificar valores de radiación solar en cualquier hora del día y lugar de Colombia.

EJEMPLO

Calcular la declinación solar (δ), ángulo horario (ω), altura del Sol sobre el horizonte geográfico (h), ecuación del tiempo (E_T) y duración astronómica del día (N) a las 10 am hora local del día 16 de febrero, para el siguiente lugar de Colombia:

Leticia (Amazonas)

Latitud geográfica (Φ) = -4° 11′ Sur

Longitud geográfica (L_L) = 69° 57′ W

SOLUCIÓN

Primero se calcula la posición angular (a), utilizando la ecuación (3-2)

Donde *nd* (Número del día juliano) es: 47

$$\mathbf{a} = \frac{2\pi\,(47 - 1)}{365} = 0{,}79 \text{ radianes}$$

Ahora se calcula la declinación solar (δ) utilizando la ecuación 3-4,

δ = -12° 36′

De la Ecuación 3-13, $\mathbf{E_T}$ = - 14 minutos

Para calcular el tiempo solar verdadero TSV utilizamos la ecuación 3-12

$$TSV = TSM + 4\,(L_s - L_L) + E_T$$

Donde TSM (hora local) = 10:00

L_s = meridiano de referencia para Colombia =75°

L_L = Longitud geográfica de Leticia = 69° 57′

E_T para el 16 de febrero = -14 minutos

$$TSV = 10{:}00 + 4(75° - 69° 57′) - 14′$$

$$TSV = 10{:}00 \text{ horas} + 6{,}24 \text{ minutos}$$

El ángulo horario (ω) en las 10 am, se calcula con la siguiente igualdad:

$$\omega = 12 - TSV \qquad (3\text{-}11)$$

ω = 12 – 10 horas y 6.24 minutos = 1 hora y 53.76 minutos = 1.89 horas

El ángulo horario se expresa en unidades de arco (grados) o en unidades de tiempo (horas), su conversión es: 1 hora = 15°. Entonces ω = 28,35°

La altura del Sol sobre el horizonte geográfico (h), se calcula con la ecuación 3-6

$$\text{Sen } h = \text{Sen } \Phi \text{ Sen } \delta + \text{Cos } \Phi \text{ Cos } \delta \text{ Cos } \omega \qquad (3\text{-}6)$$

$$\text{Sen } h = 0{,}84772393$$

Duración astronómica del día (N)

Se calcula con el Senh a la salida del Sol, esto es la ecuación 3-6 igualada a cero, de donde resulta la ecuación 3-7. Así se determina el angulo ω a la salida del Sol, es decir el angulo desde el zenit del lugar hasta la salida del Sol sobre el horizonte geográfico del sitio, con esto se calcula N expresado en tiempo mediante la igualdad:

$$N = 2/15(W)$$

Para el caso de Leticia:

$$W = \cos w = \frac{-\text{sen}f\ \text{sen}d}{\cos f\ \cos d} = 91{,}5$$

N = 2/15(W) = 91,5* 2/15 = 12,2 horas

En Colombia la duración astronómica del día N no varía como en el caso de los paises no intertropicales.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología del atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. 16
Figura 2. Sensores de radiación global utilizados en el atlas. 17
Figura 3. Imágenes del Sol tomadas en canales de luz ultravioleta lejana (171Å) y de rayos X de alta energía, obtenidas por el Observatorio Solar y Hemisférico (SOHO) y por el Observatorio de Dinámica Solar (SDO). ... 21
Figura 4. Estructura del Sol. (Fuente: NASA-ECURED). 22
Figura 5. A partir del Telescopio Solar Óptico, a bordo de la nave japonesa Hinode, se muestra en detalle la granulación solar (celdas convectivas) y en los puntos brillantes entre los gránulos se concentran los campos magnéticos. 22
Figura 6. A la izquierda una erupción solar registrada por la nave espacial Hinode de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). A la derecha se presenta una de las erupciones solares más intensas de los últimos 30 años, captada el 5 de diciembre de 2006 por la Cámara para Imágenes Solares de Rayos-X, ubicada en el satélite GOES-13 de la NOAA. 23
Figura 7. La atmósfera externa del Sol o "corona". En la figura superior también se muestra el halo coronal y adicionalmente una erupción (derecha de la figura) hacia el ecuador del Sol el 21 de agosto de 1996. Abajo, se muestra la corona polar del sur del Sol. 23
Figura 8. Eyección de masa coronal (CME), observada por la nave Stereo de la NASA el 12 de diciembre de 2008. 24
Figura 9. (a) Manchas solares. (Fuente: Solarviews). (b) Se observa una de las manchas solares más grande del ciclo número 24, formada el 31 de octubre de 2008. Esta mancha tenía dos núcleos oscuros cada uno más ancho que el diámetro de la Tierra, los cuales estaban conectados por filamentos magnéticos activos de miles de kilómetros de longitud. 24
Figura 10. Número de manchas solares pasadas y futuras. 25
Figura 11. Predicción del número de manchas solares según el Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA. 26
Figura 12. Movimiento de la tierra alrededor del Sol. 26
Figura 13. Declinación solar. 27
Figura 14. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre durante los meses del año. (Fuente: Atlas, 2005). 28
Figura 15. Sistema de coordenadas celestes: (a) horizontales y (b) ecuatoriales. 28
Figura 16. El triángulo astronómico. 30
Figura 17. Dirección del haz de radiación solar. (Fuente: Atlas, 2005). 31
Figura 18. Energía radiada por el Sol y la Tierra. 32
Figura 19. Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (área amarilla) y a nivel del mar para condiciones de cielo despejado (área roja). 33
Figura 20. Espectro electromagnético. 33
Figura 21. Valores de la constante solar medidos por medio de satélites. 35

Figura 22. Dispersión, reflexión y absorción de la luz. 36
Figura 23. Coeficientes de absorción (en %) por diferentes gases de la atmósfera en función de la longitud de onda del espectro electromagnético, distinguiéndose los intervalos de radiación ultravioleta, visible e infrarrojo. 37
Figura 24. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre. 38
Figura 25. Componente directa de la radiación Sol. 39
Figura 26. Absorción de la radiación UV en la atmósfera. 40
Figura 27. Efectos de la radiación UV sobre la salud (Fuente: OMS, 2003) 41
Figura 28. Factores que influyen en los niveles de radiación UV. 42
Figura 29. Sistema de protección solar con mensajes sencillos y fáciles de recordar. (Fuente: OMS, 2003). 46
Figura 30. Código internacional de colores. 47
Figura 31. Pictogramas relativos al índice UV. 47
Figura 32. Distribución del ozono en altura. (Fuente: AEMET). 48
Figura 33. Sensores de radiación global utilizados en el atlas. Izquierda actinógrafos de estaciones convencionales y derecha piranómetros en EMAS. (Fuente: IDEAM). 51
Figura 34. Estación Meteorológica Automática Satelital (EMAS) del IDEAM. 52
Figura 35. Red de estaciones de radiación global de Cenicaña. 53
Figura 36. Red de estaciones de radiación global de Cenicafé. 54
Figura 37. Red de estaciones de radiación global de la CAR. 55
Figura 38. Red de estaciones de radiación global del IPSE. 56
Figura 39. Red de estaciones de radiación global de Fedearroz. 58
Figura 40. Piranómetros. 59
Figura 41. Pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6. 59
Figura 42. Pirheliómetro Eppley de incidencia normal. 60
Figura 43. Actinógrafo bimetálico, tipo Robitzsch-Fuess 58dc. 60
Figura 44. Heliógrafo Campbell-Stokes. 61
Figura 45. Red nacional de heliógrafos del IDEAM. 62
Figura 46. Irradiación global media incidente sobre una superficie horizontal recibida durante el año (kWh/m2 por año). 64
Figura 47. Irradiación global media anual incidente sobre una superficie horizontal en Latinoamérica (kWh/m2 por día). 65
Figura 48. Promedio anual multianual de la irradiación global recibida en una superficie horizontal durante el día (KWh/m2 por día), con histogramas de las principales ciudades del país. (Promedios mensuales en Wh/m2 por día). 66
Figura 49. Promedio anual multianual de horas de Sol al día con histogramas de las principales ciudades del país. 75
Figura 50. Segunda jornada de calibración de piranómetros en Cartagena. 84
Figura 51. a) Piranómetro destapado (mide radiación global) y b) tapado (mide radiación difusa). 85
Figura 52. Geometría de los rayos solares. 85
Figura 53. Gráfica de correlacionan de los valores de Insenh contra ΔmV. 86
Figura 54. Gráfica de correlación entre la irradiancia del sensor de referencia y la del logosens de la estación del aeropuerto de Yopal en el 2014. 87
Figura 55. Gráfica de actinógrafo. Arriba gráfica del actinógrafo de la estación Nazareth en La Guajira para el 21 de julio de 1992. Abajo, área bajo la curva. 87
Figura 56. Comparativo entre los promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria, el brillo solar y la precipitación en la estación Tibaitatá (Mosquera, Cundinamarca). 90
Figura 57. a) Dos de los Espectrorradiómetros Biospherical GUV-511 utilizados por el IDEAM. b) Espectrorradiómetro Biospherical GUV-2511 utilizado por la Fundación Universitaria Los Libertadores. 92
Figura 58. Solmáforos instalados en Bogotá-Corferias (izquierda) y Cartagena (derecha) 94

Figura 59 Máximo valor diario del índice UV (IUV) para cielos despejados. 95
Figura 60. Pronóstico del IUV para el 13 de septiembre de 2017 con nubosidad y para cielos despejados. 96
Figura 61. Promedio mensual del índice UV, obtenido del máximo promedio horario en el día en las ciudades de Bogotá, San Andrés y Pasto. 98
Figura 62. Ozonosondeos de Bogotá que han alcanzado mayor altura el 22 de diciembre de 2005 con 35.424 m (azul) y el del 8 de mayo de 2001 con 34.247 m (rojo). 106
Figura 63. Equipos empleados en la medición del perfil de ozono y del ozono total. 107
Figura 64. Medida del número de densidad del ozono, en Unidades Dobson por kilómetro, a partir de medidas SBUV y diagrama esquemático de la circulación Brewer-Dobson. 108
Figura 65. Distribución media del ozono total, en unidades Dobson (o miliatmósferas) contenido en una columna de aire de 1 cm2 de sección que va desde la superficie de la Tierra hasta el tope de la atmósfera. 109
Figura 66. Promedio global del ozono total obtenido a partir de datos TOMS. Periodo 1979-1992. 110
Figura 67. (a) Participación de las tecnologías renovables en el consumo final a nivel global (arriba) y (b) Participación de la capacidad instalada de las energías renovables en el mundo3 (abajo). 119
Figura 68. Aproximación a la generación actual de empleos directos e indirectos de las energías renovables en el mundo. 120
Figura 69. Principales tecnologías de la energía solar para el aprovechamiento como el calor y electricidad. 121
Figura 70. Esquema del efecto fotovoltaico en una celda solar 122
Figura 71. Capacidad global instalada de sistemas fotovoltaicos. 122
Figura 72. Capacidad global adicional de sistemas fotovoltaicos e inversiones anuales globales en el periodo 2004-2013. 123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. El Sol en números 21
Tabla 2. Albedo de algunas superficies comunes..... 36
Tabla 3. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta 45
Tabla 4. Clasificación de tipos de piel 45
Tabla 5. Protección solar recomendada. 46
Tabla 6. Peligros de la radiación UV. Mitos y realidades. 47
Tabla 7. Ubicación de las estaciones de Cenicaña* 53
Tabla 8. Ubicación de las estaciones de Cenicafé 54
Tabla 9. Ubicación de las estaciones de la CAR 55
Tabla 10. Ubicación de las estaciones del IPSE..... 56
Tabla 11. Ubicación de las estaciones de Fedearroz.....57
Tabla 12. Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación 58
Tabla 13. Conversiones útiles para radiación 63
Tabla 14. Promedios mensuales de la radiación global acumulada diaria en la estación automática satelital de Zaragoza (Cartago-Valle del Cauca). . 89
Tabla 15. Estaciones convencionales de radiación visible y ultravioleta..... 93
Tabla 16. Solmáforos instalados en Colombia 93
Tabla 17. Categoría de exposición y medidas de protección recomendadas de acuerdo al IUV..... 94
Tabla 18. Conversiones útiles para radiación visible y ultravioleta 95
Tabla 19. Normatividad asociada a las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) 124
Tabla 20. Normatividad asociada a las FNCE, en proceso de elaboración y gestión. 126

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en enero (kWh/m2 por día)..... 68
Mapa 2. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en febrero (kWh/m2 por día). 68
Mapa 3. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en marzo (kWh/m2 por día)..... 69
Mapa 4. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en abril (kWh/m² por día). 69
Mapa 5. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en mayo (kWh/m² por día)..... 70
Mapa 6. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día junio (kWh/m² por día). 70
Mapa 7. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en julio (kWh/m² por día). 71
Mapa 8. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en agosto (kWh/m² por día).....71
Mapa 9. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en septiembre (kWh/m² por día).....72
Mapa 10. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en octubre (kWh/m² por día). 72
Mapa 11. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en noviembre (kWh/m² por día).....73
Mapa 12. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día en diciembre (kWh/m² por día).....73
Mapa 13. Irradiación global media recibida en una superficie horizontal durante el día, promedio anual multianual (kWh/m² por día).....74
Mapa 14. Promedio de horas de Sol al día en enero 77
Mapa 15. Promedio de horas de Sol al día en febrero 77
Mapa 16. Promedio de horas de Sol al día en marzo 78
Mapa 17. Promedio de horas de Sol al día en abril..... 78
Mapa 18. Promedio de horas de Sol al día en mayo 79
Mapa 19. Promedio de horas de Sol al día en junio 79
Mapa 20. Promedio de horas de Sol al día en julio 80
Mapa 21. Promedio de horas de Sol al día en agosto 80
Mapa 22. Promedio de horas de Sol al día en septiembre 81
Mapa 23. Promedio de horas de Sol al día en octubre..... 81
Mapa 24. Promedio de horas de Sol al día en noviembre 82
Mapa 25. Promedio de horas de Sol al día en diciembre..... 82
Mapa 26. Promedio anual multianual de horas de Sol al día. 83
Mapa 27. Promedio anual multianual del número de días al mes sin brillo solar sobre el territorio colombiano. 83
Mapa 28. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en enero. 98

Mapa 29. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en febrero. 99
Mapa 30. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en marzo. 99
Mapa 31. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en abril. 100
Mapa 32. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en mayo. 100
Mapa 33. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en junio. 101
Mapa 34. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en julio. 101
Mapa 35. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en agosto 102
Mapa 36. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en septiembre. 102
Mapa 37. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en octubre. 103
Mapa 38. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en noviembre. 103
Mapa 39. Distribución promedio del máximo valor diario del índice ultravioleta en diciembre. 104
Mapa 40. Distribución media anual del máximo valor diario del índice ultravioleta 104
Mapa 41. Distribución promedio de la columna total de ozono en enero en Unidades Dobson. 111
Mapa 42. Distribución promedio de la columna total de ozono en febrero en Unidades Dobson. 112
Mapa 43. Distribución promedio de la columna total de ozono en marzo en Unidades Dobson. 112
Mapa 44. Distribución promedio de la columna total de ozono en abril en Unidades Dobson. 113
Mapa 45. Distribución promedio de la columna total de ozono en mayo en Unidades Dobson. 113
Mapa 46. Distribución promedio de la columna total de ozono en junio en Unidades Dobson. 114
Mapa 47. Distribución promedio de la columna total de ozono en julio en Unidades Dobson. 114
Mapa 48. Distribución promedio de la columna total de ozono para el mes de agosto en Unidades Dobson. 115
Mapa 49. Distribución promedio de la columna total de ozono para el mes de septiembre en Unidades Dobson. 115
Mapa 50. Distribución promedio de la columna total de ozono en octubre en Unidades Dobson. 116
Mapa 51. Distribución promedio de la columna total de ozono en noviembre en Unidades Dobson. 116
Mapa 52. Distribución promedio de la columna total de ozono en diciembre en Unidades Dobson. 117
Mapa 53. Distribución media anual multianual de la columna total de ozono en Unidades Dobson obtenida en el periodo 1978-2016. 117

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Meteorológica de Japón (2003). *Chapter 7 Measurement of Sunshine Duration and Solar Radiation*. Disponible en http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/ric/Our%20activities/International/CP7-Sunshine.pdf.

Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems (ISE). *Agora energiewende estudio "Current and Future Cost of Photovoltaics"*. Disponible en https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/studie-current-and-future-cost-of-photovoltaics-long-term-scenarios-for-market-development-system-prices-and-lcoe-of-utility-scale-pv-systems.html.

IDEAM (2004). *El ozono. Documento técnico de respaldo a la página web del Ideam.* Meteo/008-2004. Nota técnica del Ideam. (Septiembre 2004). Gloria Esperanza León Aristizábal - Henry Oswaldo Benavides Ballesteros.

IDEAM (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia.* Disponible en http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=1398&shelfbrowse_itemnumber=1493#holdings.

IDEAM (2010). *Radiación ultravioleta, índice UV y su pronóstico*. Nota técnica: IDEAM–Meteo/001-2010. Disponible en http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/atmosfera/indice-uv/nota-tecnica-indice-uv.pdf.

IDEAM (2010). *Análisis de variables en altura con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.* Nota técnica: IDEAM–METEO/004-2010. Disponible en http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022452/NotatecnicaAnalisisOzonosondeos.pdf

IDEAM (2006). *Resolución 601 del 2006. Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.* Disponible en

http://www.ideam.gov.co/documents

IRENA (2016) *Red de Políticas de Energías Renovables para el siglo 21* (REN21, sigla en inglés). Disponible en

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf

NASA (1996). *Satélite Earth Probe*. Disponible en https://eospso.nasa.gov/missions/total-ozone-mapping-spectrometer-earth-probe

NASA (2004). *Satélite Aura*. Disponible en https://www.nasa.gov/mission_pages/aura/main/index.html

OMM. (1983). *Guide to Climatological Practices Second Edition* (WMO-No.100). (Geneva - Switzerland). Disponible en http://ac.ciifen.org/omm-biblioteca/CCA/WMO-100-Second.pdf

OMM. (2011). *Guide to Climatological Practices 3rd Edition* (WMO-No.100). (Geneva - Switzerland). Disponible en http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/WMO_100_en.pdf

OMM. (1986). *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements. World Climate Research Programme* (Series No. 7, WMO/TDNo. 149), (Geneva - Switzerland).

OMM. (1996). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-Nº 8)* Edición Sexta. Disponible en https://es.scribd.com/document/199620278/Wmo-no-8-Guia-de-Instrumentos-Ed-6-1996

OMM. (2008). *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-Nº 8)*. Septima Edición y Actualizada en 2010. Disponible en

https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf

OMS, OMM, PNUMA y ICNIRP. (2003) *Guía práctica Índice UV solar mundial*. Disponible en https://www.yumpu.com/es/document/view/27664400/indice-uv-solar-mundial-world-health-organization/3

OMS. (2006). *Proyecto global, La radiación ultravioleta y Programas* GMES RESPONDER y INTERSUN. Colaboración. OMM, PNUMA, IARC, CNIRP. Disponible en http://www.who.int/bulletin/volumes/86/2/08-020208/en/

OptoElectrónica Icalma (2012). *Solmaforo, medidor instantáneo de Radiación UV y transmisión de datos sistema inhalámbrico*. Santiago de Chile, 2012. Disponible en http://www.optoelectronica.cl/Solmaforo.pdf, http://www.optoelectronica.cl/

REN21. (2016). *Renewables Global Status Report.* Disponible en http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf

UPME, (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia.* Disponible en

http://www.upme.gov.co/atlas_radiacion.htm

WHO, WMO, UNEP. y ICNIRP (2002) *Global solar UV index : a practical guide*.(WHO/SDE/OEH/02.2). Geneva: World Health Organization. Disponible en

http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf

IDEAM

Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales