

# ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA



Libertad y Orden

Ministerio de Minas y Energía  
Unidad de Planeación  
Mínero Energética

**UPME**

Carrera 50 No. 26-00  
PBX (57) 1 222 0601  
[www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

Ministerio de Ambiente, Vivienda  
y Desarrollo Territorial



República de Colombia  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA  
Y ESTUDIOS AMBIENTALES

Carrera 10 N° 20-30

Bogotá D.C. - Colombia

[www.ideal.gov.co](http://www.ideal.gov.co)

República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía



Libertad y Orden

**UPME**



2005

2005





Libertad y Orden

República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía

# Atlas de Radiación Solar de Colombia



República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía

**UNIDAD DE PLANEACIÓN  
MINERO ENERGÉTICA**

**UPME**



República de Colombia  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA  
Y ESTUDIO AMBIENTALES**



## CRÉDITOS

**E**l presente documento se apoyó en información, textos y modelos del Atlas Solar de 1993, realizado por los desaparecidos Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas –INEA– e Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras –HIMAT–, así como en datos e información suministrados por entidades como el IDEAM, Cenicaña y Cenicafé.

### **Integrantes del equipo de trabajo**

#### **UPME**

- Carlos Arturo Flórez Piedrahita, Director General
- Alberto Rodríguez Hernández, Subdirector de Energía
- Henry Josué Zapata Lesmes, Físico
- Ismael Concha Perdomo, Físico
- Luis Carlos Romero Romero, Ingeniero Mecánico
- Daniel Roberto Vesga Alfaro, Ingeniero Eléctrico

#### **IDEAM**

- Carlos Costa Posada, Director General
- Maximiliano Henríquez Daza, Subdirector de Meteorología
- Ovidio Simbaqueva Fonseca, Ingeniero Geógrafo
- Olga Cecilia González Gómez, Meteoróloga, Investigador Científico

## **Consultores**

### *Especialista*

- César Chacón Cardona, Físico, Msc

### *Profesional de apoyo*

- Jaime Alberto Pérez Lozano, Ing. Ambiental

### *Técnicos digitadores*

- Iván Ricardo Simbaqueva Gallo
- John Rodríguez Pantoja
- Katherine Sánchez
- Diana Carolina Baracaldo

## **Agradecimientos**

Se hace un reconocimiento al apoyo de las oficinas administrativas y jurídicas y en general a los funcionarios y ex funcionarios de la UPME y el IDEAM que participaron en este proyecto, sin cuyo aporte no hubiese sido posible la realización del Atlas.

Igualmente se hace un especial reconocimiento a las entidades que han recopilado información climática de variables como la radiación solar:

- a: CENICAFÉ que con la colaboración del ingeniero Agrónomo-Agrometeorólogo Orlando Guzmán Martínez, facilitó su información en la zona cafetera.
- a: CENICAÑA que con la ayuda del Meteorólogo Enrique Cortés, gestionó el suministro de la información en zonas de los cultivos de caña de azúcar.

# TABLA DE CONTENIDO

	<b>Páginas</b>
PRÓLOGO .....	11
ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA .....	15
Qué es? .....	15
Qué tiene? .....	16
Cómo se realizó? .....	17
Qué aportó? .....	19
Resultados .....	19
Conclusiones y recomendaciones .....	19
Cómo utilizar los mapas de radiación global? .....	20
MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA .	25
MAPAS DE BRILLO SOLAR .....	43
MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA BANDA 305NM.....	61
MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO .....	79
MAPAS DE ÍNDICE UV PARA COLOMBIA .....	97
<b>APÉNDICE A</b> .....	<b>115</b>
<b>1. Relaciones astronómicas Sol- Tierra</b> .....	<b>115</b>
1.1 Propagación de la radiación solar .....	115
1.2 Distancia Tierra - Sol (R).....	116
1.3 Declinación del Sol .....	117
1.4 La esfera celeste .....	119
1.5 Sistemas de coordenadas .....	120
1.5.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales .....	120
1.5.2 Coordenadas celestes ecuatoriales .....	120
1.5.3 Triángulo astronómico para la obtención de la posición del Sol .....	121

	<b>Páginas</b>
1.5.4 Altura del Sol .....	122
1.5.5. Duración astronómica del día (N) .....	122
1.5.6 Dirección del haz de radiación .....	123
1.6 Medida del tiempo .....	123
1.6.1 Tiempo Solar Verdadero (TSV) .....	123
1.6.2 Tiempo Solar Medio (TSM) .....	124
1.6.3 Ecuación de Tiempo (Et) .....	124
Bibliografía .....	126
<b>APÉNDICE B</b> .....	<b>127</b>
<b>2. Características de la radiación solar</b> .....	<b>127</b>
2.1 El Sol .....	127
2.2 Radiación Solar .....	129
2.2.1 Distribución espectral de la Radiación solar .....	129
2.2.2 Constante solar (I <sub>0</sub> ) .....	130
2.3 Radiación solar diaria fuera de la atmósfera Terrestre HO(n) .....	131
2.4 Atenuación de la radiación solar en la atmosfera .....	131
2.4.1. Absorción selectiva de la radiación solar en la atmósfera .....	133
2.4.2 Atenuación de la radiación solar por difusión .....	134
2.4.3 Factor de turbidez .....	135
2.4.4 Transmitancia de la atmósfera terrestre (G) .....	135
2.5 Radiación Incidente sobre la superficie terrestre .....	135
2.5.1 Radiación directa (H <sub>b</sub> ) .....	136
2.5.2 Radiación difusa (H <sub>d</sub> ) .....	136
2.5.3 Radiación global (H) .....	136
2.5.4 Albedo .....	137
Bibliografía .....	137
<b>APÉNDICE C</b> .....	<b>139</b>
<b>3. Medición de la radiación solar</b> .....	<b>139</b>
3.1 Instrumentos de medida .....	139
3.2 Medida de la Radiación Solar Directa .....	140
3.2.1. Pirheliómetro de Cavidad Absoluta .....	140



	<b>Páginas</b>
3.2.2. Pirheliómetros Secundarios .....	141
3.3. Medición de la radiación solar difusa .....	142
3.4. Medidas de radiación global, difusa y reflejada .....	143
3.4.1. Piranómetros .....	143
3.4.2. Actinógrafo .....	144
3.4.3. El Solarímetro (Heliógrafo) .....	145
3.5. Calibración de instrumentos .....	146
3.5.1. Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR) .....	146
3.5.2. Calibración de Pirheliómetros .....	146
3.5.3. Calibración de Piranómetros .....	146
3.5.4. Calibración de Actinógrafos .....	147
3.6. Estación meteorológica .....	147
3.7. Estimación la radiación solar .....	148
3.7.1. Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales .....	148
3.7.2. Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales .....	150
3.7.3. Estimación de la radiación solar directa sobre superficies horizontales .....	152
3.7.4. Modelo Multivariado para el brillo Solar .....	153
3.7.5. Estimación de la radiación solar global sobre superficies inclinadas. ....	154
3.7.6. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el sur. ....	155
3.7.7. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el norte. ....	155
Bibliografía .....	155
<b>APÉNDICE D</b> .....	<b>157</b>
<b>4. Evaluación de la radiación solar en colombia</b> .....	<b>157</b>
4.1. Información para la elaboración del Atlas de Radiacion Solar de Colombia	157
4.2. Evaluación de la gráficas de radiacion solar .....	158
4.3. Base de datos .....	159
4.4. Análisis estadístico y modelación matemática de la información .....	159
4.4.1. Modelo de Angström .....	159
4.4.2. Modelo de Angström modificado .....	159
4.4.3. Análisis de los coeficientes de la Ecuación de Angström modificado .....	160
4.4.4. Componentes difusa y directa de la radiación solar global representados en la ecuación de Ångström .....	160

	<b>Páginas</b>
4.5. Modelo de control de calidad de datos .....	161
4.6. Representación en Serie de Fourier del comportamiento armónico de las series de tiempo .....	162
4.7. Modelo multivariado para el brillo Solar .....	163
4.8. Modelización de Estaciones de Referencia para el territorio colombiano .....	163
4.9 Interpolación digital de la información radiométrica .....	165
4.9.1. Interpretación de los mapas .....	165
Ejemplo .....	165
4.9.2. Estimación de la radiación sobre superficies inclinadas .....	165
Ejemplo .....	165
4.10. Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia .....	166
Bibliografía .....	167
Conversión de algunas unidades .....	167
<b>APÉNDICE E</b> .....	169
<b>5. La Radiación ultravioleta (UV) y sus índices en Colombia</b> .....	169
5.1. Red Nacional de Estaciones de Radiación UV .....	169
5.2. Índices UV .....	172
5.3. Determinación de los Índices UV .....	172
5.4. Utilización de los Índices UV .....	172
5.5. Metodología utilizada para la determinación de radiación ultravioleta B a partir de la columna total de ozono medida .....	175
5.5.1. Descripción Teórica .....	175

## PRÓLOGO

La sociedad y sus modelos de desarrollo son el resultado de los aportes de cada nueva generación. Colombia ha asumido el reto institucional de vencer las barreras para integrar y socializar estas contribuciones, como parte del conocimiento acumulado del país.

Algunos de estos aportes se consolidan en la segunda edición del Atlas de Radiación Solar de Colombia, que busca avanzar en el conocimiento de los recursos energéticos renovables y apoyar la toma de decisiones en cuanto a soluciones energéticas para atender las necesidades de las diferentes zonas del país. Esta edición recopila la información básica de referencia para el aprovechamiento de la energía solar como una opción para el uso sostenible de los recursos energéticos de Colombia.

Con la sinergia institucional el IDEAM y la UPME, mediante la suscripción de un convenio a finales del año 2002, integraron habilidades con el fin de evitar la duplicación de esfuerzos y maximizar el alcance de los resultados, logrando así mejorar sustancialmente la eficiencia en las inversiones de los recursos económicos del Estado. Esta colaboración ha facilitado el cumplimiento de la normativa vigente en la materia, concretamente en lo que se refiere a la Ley 697 de 2001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas, y en desarrollo del Decreto 3683 de 2003, referente al inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales.

Esta segunda versión del Atlas Solar ha mejorado significativamente la cantidad y calidad de información presentada en la versión anterior. Se incrementó el número de puntos con información disponible, logrando de esta manera una mejor cobertura espacio-temporal; se establecieron nuevos modelos de generación de datos en sitios con escasa información y se recurrió a la utilización de sistemas de información geográficos para el establecimiento de mapas del recurso solar.

La inclusión de estos nuevos elementos ha significado nuevos retos para vincular a los grupos de investigación, la academia y expertos en el tema,

con la finalidad de encontrar nuevas metodologías de toma, evaluación, procesamiento, modelamiento temporal y espacial de la información, como también en el mejoramiento de criterios para la distribución y equipamiento de las estaciones de medida de las variables de radiación y brillo solar.

El compendio de mapas de radiación global y brillo solar constituye una valiosa herramienta para el planeamiento y dimensionamiento de sistemas solares destinados al abastecimiento de energía, con el fin de satisfacer los requerimientos de iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización, calentamiento de agua y secado de productos agrícolas, entre otros.

Adicionalmente, se evaluó por primera vez en Colombia la información de la banda espectral ultravioleta (UV) y se determinó la distribución espectral en cuatro longitudes de onda de este parámetro en el país. Este conocimiento es de fundamental importancia en investigaciones relacionadas con la salud humana, los ecosistemas y los materiales sintéticos expuestos a la intemperie y utilizados en diferentes actividades productivas.

Estamos seguros de que el conocimiento aportado en el presente Atlas redundará en una mejora de las condiciones de vida de los colombianos y será un insumo básico para los grupos de investigación y la academia en general.

**Carlos Arturo Flórez Piedrahita**  
Director General  
Unidad de Planeación Minero  
Energética

**Carlos Costa Posada**  
Director General  
Instituto de Hidrología, Meteorología  
y Estudios Ambientales