

**Atlas de Radiación
Solar de Colombia**

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

¿Qué es?

Es un conjunto de mapas donde se representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia; en estos mapas se establece el valor promedio diario de radiación solar global, brillo y radiación ultravioleta solar que incide sobre una superficie plana por metro cuadrado. De cada una de estas variables se muestran los valores promedio en el tiempo mediante 13 mapas, uno para cada mes del año y un mapa promedio anual. El Atlas es un documento de referencia para Colombia que contribuye al conocimiento de la disponibilidad de sus recursos renovables y facilita la identificación de regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población.

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, y como fuente directa de producción de biomasa.

El Atlas de Radiación Solar brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país. Para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía, por ejemplo, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de la energía solar permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización o sistemas solares térmicos para el suministro de calor en calentamiento de agua o aire en secadores de productos agrícolas,

entre otras aplicaciones. Igualmente, los mapas son importantes para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes.

Se aporta por primera vez información solar de Colombia en la banda espectral ultravioleta (UV), radiación electromagnética de alta frecuencia y peligrosidad, como una importante referencia para quienes trabajan en la salud (comunidades médicas), el medio ambiente, el nivel técnico y científico dadas sus repercusiones sobre la vida humana, los ecosistemas y los materiales, aportando elementos para prevenir sobre los efectos nocivos de esta radiación en las diferentes zonas del país.

Con esta segunda edición del Atlas se subsanan algunas de las limitaciones del pasado en cuanto a la calidad en el procesamiento de la información, complementándose mediante tratamientos estadísticos en las series de tiempo, lapsos o periodos sin información. Se utiliza una modelación físico-matemática para establecer el potencial de radiación solar en regiones donde no se mide de forma directa, pero sí se mide otras variables meteorológicas que permiten su correlación, como es el caso del brillo solar con lo cual ha permitido incrementar el número de puntos con información de radiación en el territorio colombiano.

En Colombia –por su posición geográfica en el planeta, dentro de la zona tórrida y en la región andina– existen condiciones climáticas variadas y especiales que afectan la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de energía limpia para un desarrollo sostenible. En la medida en que fructifiquen los esfuerzos del IDEAM para mejorar tanto la red de estaciones de referencia en su distribución y operación en el territorio colombiano como la información que se captura, procesa y analiza, se continuará perfeccionando el conocimiento de nuestros recursos naturales.

¿Qué contiene?

El Atlas de Radiación Solar de Colombia contiene una aproximación a la distribución espacial del recurso solar, desarrollada con base en información radiométrica medida directamente en 71 estaciones sobre el territorio nacional, complementada con 383 estaciones meteorológicas donde se realizan medidas rutinarias de brillo solar, y 96 estaciones donde se rea-

lizan mediciones de humedad relativa y temperatura, variables que fueron correlacionadas con la intensidad radiante sobre la superficie. El Atlas ofrece 4 colecciones de 13 mapas sobre radiación solar global, brillo solar, radiación solar UV, ozono e índices UV¹. Corresponde en el caso de la radiación solar global a la interpolación de información recolectada y estimada de 550 estaciones meteorológicas y en el caso de brillo, a 479 estaciones.

En el caso de los mapas de ozono, radiación ultravioleta B (Banda centrada en 305nm de longitud de onda), e índices UV, se correlacionaron mediciones en tierra de alrededor de 5 estaciones con información satelital obtenida de la NASA, permitiendo establecer en la región de Colombia la estimación de esas variables en 280 puntos a partir de los cuales se realizó la interpolación espacial.

En todos los casos se determinó el valor de cada punto sobre el territorio nacional interpolando los valores de las 12 estaciones meteorológicas más cercanas, utilizando una función de peso con inverso de la distancia del punto a cada estación, según el caso, de radiación global, brillo solar, ozono estratosférico, radiación ultravioleta o índice UV.

Para quienes estén interesados en conocer información básica del Sol, la descripción de su movimiento o de la caracterización de la energía solar y su interacción con la Tierra, o sobre la metodología utilizada en la elaboración de estos mapas, esta publicación cuenta con un conjunto de apéndices con información al respecto, que ha tomado como base los textos del Atlas del INEA HIMAT del año 1993.

El Apéndice A incluye los principales aspectos para comprender las relaciones astronómicas Sol-Tierra, ilustrando temas sobre la órbita terrestre, el recorrido del Sol en la esfera celeste, sistemas de coordenadas que pueden describir el movimiento del Sol y la duración astronómica del día, o la manera de determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre superficies inclinadas.

¹ *valor adimensional que expresa el peligro que sufre la piel humana al exponerse a la radiación solar en condiciones de cielo despejado alrededor del mediodía.*

El Apéndice B muestra las características del Sol, su radiación, la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre.

El Apéndice C presenta los instrumentos utilizados para la medición de la radiación solar y las metodologías para su calibración de acuerdo con estándares internacionales, algunos métodos para la estimación de la radiación solar y la forma de estimarla sobre superficies inclinadas.

El Apéndice D ilustra sobre la evaluación de la información utilizada en la estimación del brillo y la radiación global solar, el análisis estadístico, la modelación de la información, el modelo de control de datos, el comportamiento armónico de las series de tiempo representadas en series de Fourier, el modelo multivariado para la estimación del brillo solar, modelación de las estaciones meteorológicas de referencia y la interpolación de la información. Termina con un ejemplo para determinar la radiación solar sobre superficies inclinadas a partir de la radiación sobre superficies horizontales ilustrada en el presente Atlas.

El Apéndice E realiza un acercamiento en Colombia sobre el comportamiento de la radiación ultravioleta UV y sus índices, tomando información de la Red Nacional de Radiación; se destaca entre otros la determinación y utilización de los índices y su incidencia sobre el fototipo de la piel.

Para el caso de los Apéndices D y E, donde se muestra la base teórica de la metodología y los cálculos involucrados, resultaría muy productivo para el país interesar a lectores con conocimientos en física, estadística, ingeniería y medicina, a quienes agradeceríamos igualmente revisar toda la obra y realizar aportes que ayuden a mejorar los resultados obtenidos.

¿Cómo se realizó?

Este trabajo es el resultado de una sinergia entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, que aportan sus recursos técnicos y administrativos dentro de un convenio marco, firmado en diciembre del año 2002, para desarrollar actividades conjuntas a fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energía alternativas y renovables en Colombia.

El primer resultado del convenio se obtuvo con la elaboración y publicación de esta segunda versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia. Se ha continuado desde el año 2004 con otras actividades que apuntan a la publicación del Atlas de Energía Eólica y del Atlas de Hidroenergía de Colombia.

Para la realización del presente trabajo se llevaron a cabo principalmente las actividades que se describen a continuación:

- Recolección de la información meteorológica (radiación solar, brillo solar, temperatura, humedad relativa) medida por el IDEAM como institución encargada de la medición de estas variables y de la vigilancia del medio ambiente en el orden nacional. Igualmente, el IDEAM recopiló información proveniente de instituciones de carácter privado como CENICAFÉ y CENICAÑA, que disponen de redes meteorológicas propias para sus investigaciones en café y caña de azúcar, respectivamente. En el caso del ozono, la información base se obtiene directamente de la base de datos publicada por la Agencia Norteamericana para la Aeronáutica y el Espacio, NASA, de su misión de vigilancia del ozono TOMSII. La información de radiación ultravioleta es tomada de la red latitudinal de estaciones UV del país.
- Para el caso de la radiación solar global se realizó la digitalización y evaluación de las gráficas de actinógrafos, obteniendo los valores de radiación, que se almacenaron mediante hojas de cálculo para su modelación matemática.
- El tratamiento estadístico de la información, necesario para la radiación solar global, ya que la mayor parte de las estaciones radiométricas experimentaba un considerable número de vacíos en sus series de datos, de manera que el trabajo inicial fue complementar la base de datos con la nueva información evaluada.
- Se estableció como función del tiempo un año típico para describir cada una de las variables utilizadas dentro de la modelación físico-matemática, en la representación en Serie de Fourier, lo cual permitió obtener un comportamiento promedio para completar los vacíos de las series de tiempo.

- Modelación físico-matemática. Debido a la gran heterogeneidad del territorio colombiano, la red actual de estaciones radiométricas (alrededor de 71 estaciones) es insuficiente para establecer una representación espacial adecuada del recurso solar, razón por la cual se recurrió al modelo de Ångström modificado, que permite estimar la radiación solar a partir de valores de brillo solar, donde la red de estaciones es más numerosa (cerca de 383 estaciones). Adicionalmente, sobre la base de adecuados resultados de correlación mediante un modelo multivariado, se obtuvieron estimaciones de brillo solar a partir de valores medidos de la humedad relativa y la diferencia de temperaturas (cerca de 96 estaciones). Con el anterior trabajo fue posible ampliar el número de puntos de referencia (cerca de 550), para conformar una malla con información de radiación solar global y brillo solar para interpolar espacialmente.
- En el caso de la radiación ultravioleta sobre la superficie, se implementó la solución de la ecuación de transferencia radiactiva (Ley de Lambert Beer) para la determinación de la radiación superficial en las bandas de 305 nm, 320 nm, 340 nm del espectro ultravioleta.
- Con la información anteriormente obtenida se procede a la elaboración del conjunto de trece mapas por variable (radiación global, brillo solar, ozono, radiación UVB-305 nm, índice UV) utilizando el método de interpolación de los vecinos más próximos. De esta forma se determina una aproximación a la distribución espacial sobre el territorio colombiano.

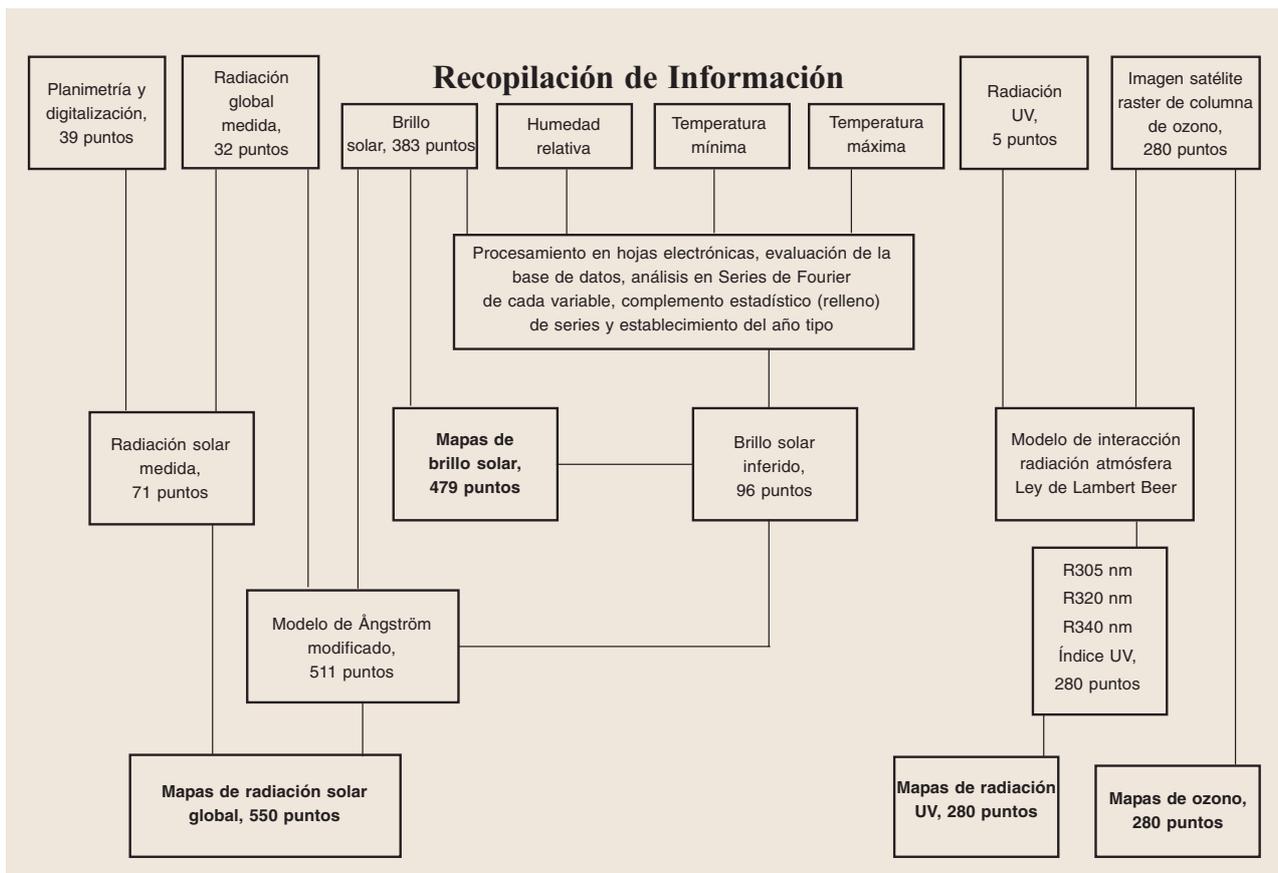


Figura 1.1. Flujograma de ejecución del proyecto

¿Qué aporta?

El Atlas de Radiación Solar de Colombia brinda un acercamiento potencial y disponibilidad del recurso energético solar, así como un mayor conocimiento de su componente de radiación ultravioleta, teniendo cuenta los siguientes aspectos:

- Disponibilidad de la radiación solar como fuente renovable de energía y como variable termodinámica para el estudio de la dinámica atmosférica.
- Bases de datos de radiación solar global, brillo solar, humedad relativa y temperatura; variables meteorológicas importantes para el dimensionamiento de sistemas y tecnologías que aprovechan la energía solar (térmicas, fotovoltaicas, etc.).
- La distribución de la columna total de ozono y las variaciones de radiación ultravioleta sobre la superficie del país, incluyendo índices de radiación solar ultravioleta que orientan acerca del peligro frente a la exposición indiscriminada de la población a la radiación solar ultravioleta.
- Bases teóricas para la comprensión de la naturaleza de la radiación solar, su comportamiento en el tiempo, la atenuación de la radiación en su paso por la atmósfera y su interacción con el ser humano y la naturaleza en general.
- Métodos de complementación de la información radiométrica y de brillo solar, a través de la determinación de correlaciones lineales entre variables meteorológicas por medio de una modelación físico-matemática. Una metodología para la evaluación del recurso solar a partir de otras variables meteorológicas.
- Una metodología implementada para el tratamiento estadístico de series de tiempo pertenecientes a variables meteorológicas; determinación del año típico de cada variable, depuración de la información y posterior complemento (relleno) de los vacíos de series de tiempo.
- Mapas que facilitan dimensionar soluciones energéticas que aprovechan la energía solar en la ciudad y en el campo, con aplicaciones útiles en el sector agrícola o industrial, y que ayudan a emplear racionalmente los recursos naturales.

- Un reto a los centros de investigación y universidades para realizar mejoras a los modelos realizados que se puedan aportar al IDEAM, para implementarlos en el perfeccionamiento de las series de datos, la estimación de variables meteorológicas mediante correlaciones entre ellas, la interpolación espacial, etc.

Resultados

Los resultados más sobresalientes de este trabajo de investigación pueden resumirse a continuación:

- Se cuenta con un compendio de mapas multianuales (promedios mensuales y promedio anual) de radiación global, brillo solar, columna total de ozono, radiación ultravioleta e índice UV sobre el territorio colombiano.
- Obtención de series de tiempo de información radiométrica, brillo solar, temperatura máxima, temperatura mínima, ozono y radiación ultravioleta.
- Tratamiento estadístico para series de tiempo aplicado a variables meteorológicas.
- Para modelar espacialmente se utilizan sistemas de información geográficos.
- Elaboración de documentos de apéndice descriptivos, útiles como material de consulta en tópicos de la radiación solar, ozono, radiación ultravioleta, estadística de series de tiempo y modelos matemáticos.
- La UPME y el IDEAM como entidades nacionales encargadas del planeamiento energético y de la mediación de variables ambientales, realizan respectivamente, con mucho esfuerzo de sus funcionarios y directores, un primer trabajo para implementar en el IDEAM las bases de datos y metodologías para la evaluación periódica del recurso solar y la difusión de mapas con su distribución espacial en el territorio nacional.

Conclusiones y recomendaciones

- En general, Colombia tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose la península de La Guajira, con un valor pro-

medio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento.

- Las isóneas de radiación fueron definidas con los datos de la red radiométrica del periodo 1980-2002, lo cual permitió establecer una aproximación de la distribución del recurso solar en el país.
- El presente Atlas es una referencia técnica y científica de gran utilidad para disciplinas como la Arquitectura, la Biología, la Ecología, la Agronomía, la Ingeniería Energética y la Medicina, entre otras.
- Considerando las regiones naturales del país, es conveniente ubicar estaciones piloto seleccionadas con criterios energéticos y meteorológicos en cada una de ellas. Estas estaciones deben tener la instrumentación necesaria para medir en las diferentes bandas del espectro, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo; la radiación solar global y sus componentes: directa, difusa, reflejada, total ascendente y descendente, y los demás parámetros meteorológicos, según las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología.
- Es necesario involucrar en el quehacer científico y técnico los resultados de este estudio, con la finalidad de difundirlo, utilizarlo y mejorarlo con los aportes de instituciones públicas y privadas.
- Una aproximación a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones es:

REGIÓN	kWh/m ² /año
GUAJIRA	2.190
COSTA ATLÁNTICA	1.825
ORINOQUIA	1.643
AMAZONIA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

- Es necesario, al nivel de estudios básicos, mejorar los modelos empleados para realización del Atlas

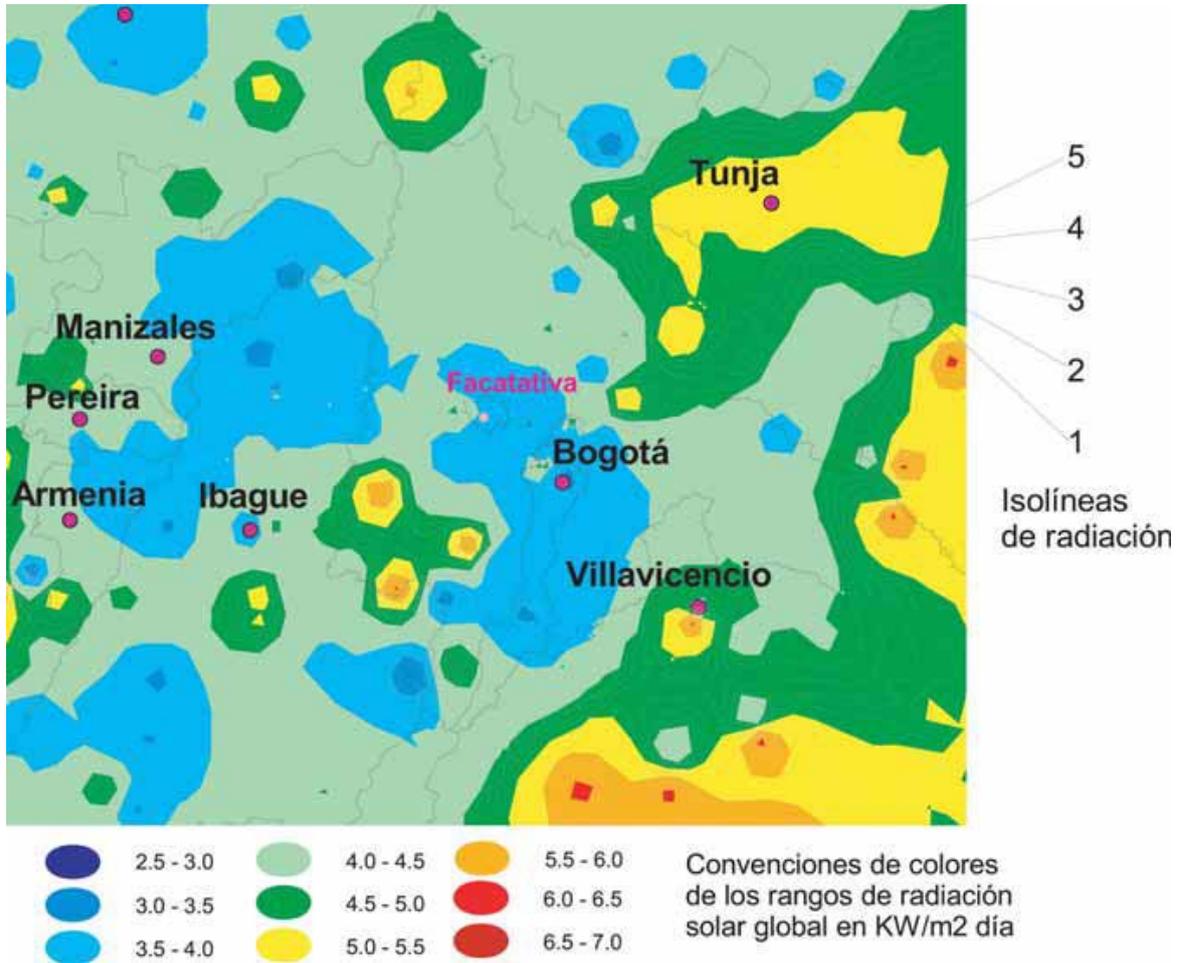
en cuanto a correlacionar mejor las variables de humedad y temperatura con el brillo y la radiación solar, teniendo en cuenta una regionalización del país y sus pisos térmicos.

- Se requiere realizar mejoras al modelamiento espacial en cuanto a establecer un algoritmo que permita interpolar los valores de radiación solar o cualquier otra variable climatológica teniendo en cuenta la región geográfica, la altura y los puntos con valores conocidos dentro de la misma región.
- Es importante mejorar la distribución de la ubicación geográfica de las estaciones, con criterios de región, altura sobre el nivel del mar y homogeneidad en el cubrimiento del territorio nacional.

¿Cómo utilizar los mapas de radiación solar global?

Para ilustrar sobre el uso de los mapas de radiación solar global, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tener presente que este trabajo es una aproximación a la realidad de nuestro país en el recurso solar y que en particular en la zona de la Amazonia y Orinoquia el número de estaciones de referencia con mediciones de este recurso son muy pocas, lo que afecta sensiblemente los resultados de este trabajo y por lo tanto representa un primer y básico acercamiento a estas zonas del nuestro territorio.
- Igualmente, para el caso en páramos y nevados debe mirarse la información suministrada con cuidado o excluirse, ya que estos lugares presentan microclimas especiales y la red nacional actual no posee mediciones directas en estos lugares.
- Todos los valores son referidos en unidades de kWh/m² durante un día promedio.
- Las convenciones que mediante colores establecen los rangos de radiación solar global son las que se muestran en la siguiente figura:



- e. Note que al color azul oscuro se asocia el rango de 2,5 a 3,0, seguido por el azul, en el rango de 3,0 a 3,5, y así sucesivamente se realizan incrementos de 0,5 de un color al siguiente hasta llegar al rojo intenso, de 6,5 a 7,0.
- f. Observe en el mapa que cada franja de color posee cinco (5) isólinas de radiación y por lo tanto cuando se pasa de una a otra se aumenta o disminuye el valor en 0,1 (recuerde que cada franja de color tiene asociado un incremento de 0,5, es decir, por ejemplo, la franja del verde va desde 4,5 hasta 5,0)
- g. Para establecer el valor de radiación solar global en un determinado mes y lugar, se debe primero identificar el mapa del mes respectivo en el glosario de mapas de radiación solar global²,

luego se debe ubicar el lugar deseado, posteriormente establecer la franja de color a la que pertenece y la isólinea más cercana al lugar, a la cual se le asigna valor sumando, desde el valor más bajo en el límite inferior de la franja de colores (ver convenciones de colores), el incremento de 0,1 correspondiente de cada isólinea hasta llegar a la isólinea del lugar en consideración (o alternativamente restando 0,1 desde el valor más alto en el límite con la franja superior de colores), estableciéndose de esta manera el valor

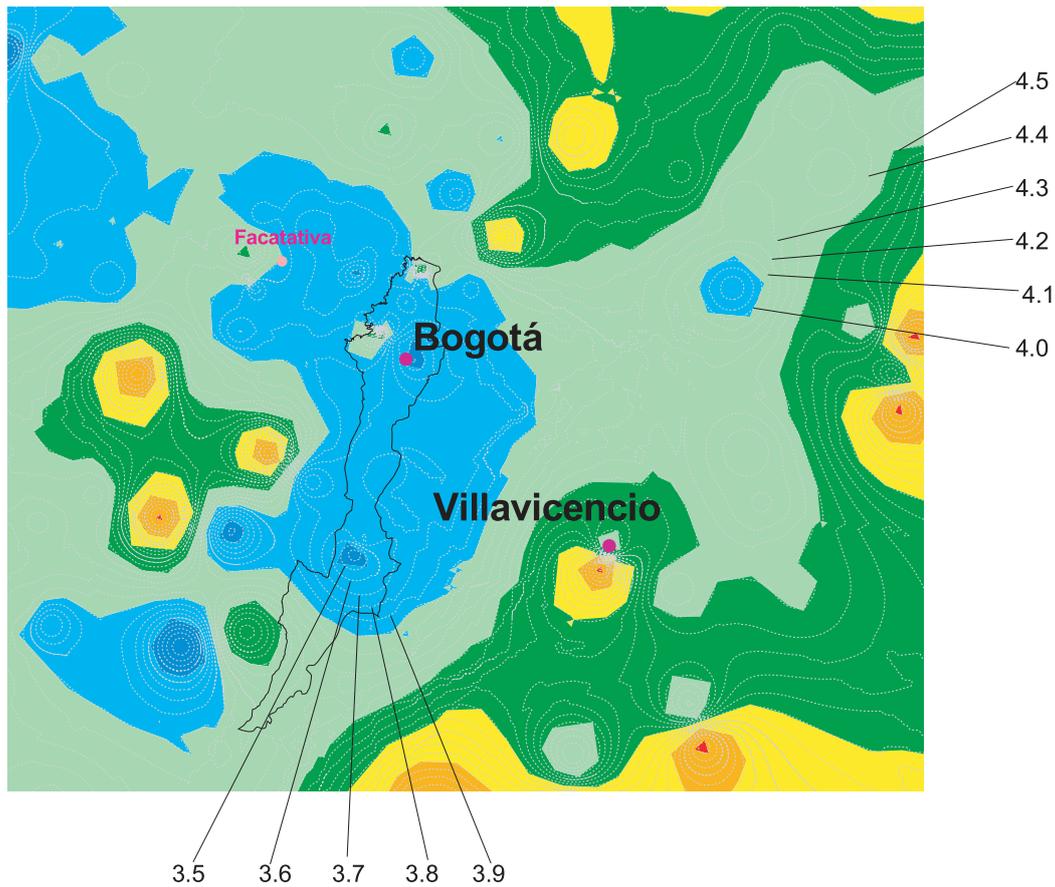
² Esto se aplica especialmente cuando se están realizando diseños de sistemas que aprovechan el recurso solar, para lo cual es necesario revisar en los mapas mensuales el mes más crítico para el lugar donde se desean instalar los sistemas.

aproximado de la radiación solar global del lugar.

Un ejemplo de lo anterior es: Hallar la radiación solar global para el municipio de Facatativá, Cundinamarca, para el mes de abril.

a. Se identifica el mapa del mes de abril.

b. Se ubica el municipio de Facatativá como lo ilustra la figura en el punto de color amarillo.



c. Se establece que pertenece a la franja de color azul claro (3,5 a 4,0 kWh/m²) y que pertenece a la isolínea número 4 desde el valor más bajo en el límite con la franja de color azul (3,0 a 3,5). Asociándose el valor de 3,5 más $4 \cdot 0,1$, es decir 3,9 kWh/m² día promedio, para el mes de abril en el municipio de Facatativá.

d. Alternativamente, es posible observar que solamente falta una isolínea para pasar al valor más alto en el límite con la franja de color verde claro (4,0 a 4,5), por lo cual a 4,0 se le resta $1 \cdot 0,1$ obteniéndose también 3,9 kWh/m² día promedio para el mes de abril en el municipio de Facatativá.