

Criterios de clasificación espacial para discriminar datos que incrementan la incertidumbre en la respuesta de modelos determinísticos

^{*1}Díaz-Torres, J. J., ¹Hernández-Mena, L., ^{2,3}Murillo-Tovar, M. A., ⁴Suárez-Plascencia, C.,
y ⁴Aviña-Rodríguez, E.

¹Unidad de Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco

²Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Programa de Cátedras, Ciudad de México, México.

³Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México

⁴Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: Díaz-Torres, J. J., Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.

Av. Normalistas 800, C.P. 44270, Guadalajara, Jalisco, México. Teléfono: (+5233) 3345 5200, Ext. 1612, e-mail: jdiaz@ciatej.mx

Resumen

Un modelo de corte determinístico se tomó como ejemplo para evaluar la incertidumbre que genera su respuesta de salida. Este modelo calcula la radiación solar sobre la superficie de la Tierra: Solar Analyst. Se diseñó una propuesta metodológica para clasificar y seleccionar los datos de irradiación diaria media mensual del modelo que mejor explican las magnitudes observadas en una estación meteorológica (Colomos) instalada en la zona centro-noroeste del Área Metropolitana de Guadalajara. La clasificación estuvo basada en el análisis espacial definido por criterios físicos (geomorfológicos) y filtros estadísticos (estandarización y umbrales). Esta clasificación permitió segregar los resultados del modelo en dos grupos: 1) Los datos próximos al valor de irradiación diaria media mensual, los cuales explican la variabilidad de las observaciones de campo, y 2) Los datos que se alejan de esta condición. Los resultados indican que la respuesta Sf-36 explica con mayor aproximación las observaciones de Colomos. La irradiación diaria media mensual calculada fue de $6.55 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en promedio, con una incertidumbre del 7.6%. Después de la reclasificación de esta respuesta, nuevos límites espaciales fueron establecidos. Se encontró que solo ~79% del área de estudio presenta condiciones topográfica y valores de irradiación diaria media mensual muy semejantes a los que predominan entorno la estación Colomos. La sustracción de los datos extremos de las distribuciones mensuales (~21%) produjo una dramática disminución en la amplitud total de los datos. Una nueva estimación sobre la incertidumbre media mensual del área efectivamente validada por Colomos indica que ésta se redujo a 1.7% respecto al valor medio mensual de irradiación. Esta metodología se propone como una efectiva herramienta de clasificación que ayuda a identificar los resultados de un modelo que mejor explican el comportamiento real de un fenómeno sobre el espacio, aún cuando los datos de validación están limitados a un pequeño número de sitios de monitoreo.

Palabras claves:

Análisis espacial, Criterios físicos, Filtro estadístico, Incertidumbre, Solar Analyst Model, Guadalajara.

I. Introducción

El Sol es la principal fuente de energía sobre la Tierra. Esto tiene importantes implicaciones sobre el medio natural y la salud de los seres vivos. Por ejemplo, la radiación solar puede desencadenar procesos bio-químicos en plantas, tales como la fotosíntesis, que interviene en la generación de compuestos ricos en energía, o la foto-morfogénesis que está estrechamente relacionada con las funciones reguladoras del crecimiento. Por otra parte, el intercambio de energía entre las plantas y el aire, se convierte en el calor que activa el metabolismo y los procesos de transpiración, produciendo un efecto de modulación térmica de microclimas (Adams, 2009; Jones, 2013). Además, la radiación puede producir el calentamiento del aire y del suelo, y evaporación o derretimiento de la nieve (Gates, 1980; Strahler, 2010). La radiación solar también es un factor clave en los estudios del clima y el estado del tiempo, ya que la intensidad y el tiempo de incidencia del flujo radiante pueden detonar diversos fenómenos físicos y químicos en la atmósfera (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000). Hay dos conceptos que debemos describir: 1) La irradiancia, que se define como la cantidad de flujo radiante por unidad de área y por unidad de tiempo (energía instantánea) (W m^{-2}); y 2) La irradiación, que corresponde a la energía solar por unidad de área acumulada durante un periodo de tiempo (kWh m^{-2}) (Hofierka y Šúri, 2002).

En las últimas décadas se han desarrollado una gran variedad de modelos para estimar la proporción de energía solar que alcanza la superficie terrestre (Hetrick et al., 1993; Miklánek, 1993; Kumar et al., 1997; McKenney et al., 1999; Wilson y Gallant, 2000; Hofierka y Šúri, 2002; Pons, 2002; Pons y Ninzerola, 2008). Estos modelos se han adaptado a plataformas computacionales, para mejorar la calidad de sus productos, así como para reducir la incertidumbre y el tiempo de procesamiento. Recientemente,

Ruiz-Arias et al. (2009) evaluaron la respuesta de varios de estos modelos, y demostraron que sus cálculos son bastante aceptables. El modelo Solar Analyst (SA) propuesto por Hetrick y et al. (1993) y Rich et al. (1994) es uno de ellos. Debido a la estructura y el funcionamiento del modelo SA, este se puede clasificar como un modelo de corte determinístico. Los modelos determinísticos resuelven el comportamiento regular de una variable por medio de ecuaciones compuestas por una función objetivo y variables con valores restringidos (Ríos-Insua et al., 2004). Debido a que estos modelos se sustentan en la respuesta de ecuaciones matemáticas condicionadas a ciertos límites, la validación de sus resultados y la determinación de su incertidumbre depende fundamentalmente de observaciones de campo. No obstante que el modelo SA presenta algunas limitaciones operacionales (por ejemplo, para evaluar el comportamiento aleatorio de la irradiación o la simulación de las propiedades anisotrópicas de la atmósfera), el modelo involucra un robusto sistema de ecuaciones y coeficientes que permite obtener resultados con una buena aproximación (Hetrick et al., 1993).

La validación de la irradiación mediante el modelo SA requiere de sistemas de monitoreo regionales; sin embargo, frecuentemente se cuenta con redes compuestas por un reducido número de estaciones meteorológicas. La insuficiencia de estaciones impone limitantes cuando la topografía tiene grandes contrastes. La ciudad de Guadalajara representa un excelente ejemplo ya que se encuentra sobre una planicie rodeada por un profundo cañón y estructuras volcánicas de gran relieve; además, la cobertura espacial de la red de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) está restringida para evaluar la respuesta del modelo sobre estos tres tipos de topografías. Este caso ofrece la oportunidad para implementar técnicas de análisis espacial (p.e. Álgebra de

mapas, análisis de geometrías, reclasificaciones o descomposición de propiedades en capas) y estadístico, para identificar las áreas donde la respuesta del modelo SA ofrece una mayor certidumbre.

Este estudio propone un método sencillo para establecer nuevos límites espaciales, pero también para reducir la incertidumbre en la respuesta de dicho modelo. En nuestro caso, las propiedades geomorfológicas del terreno fueron consideradas como criterio de clasificación debido a que caracterizan al factor sobre el cual no se tiene un control (mediciones, estaciones) para validar la respuesta del modelo SA. Adicionalmente, las propiedades estadísticas de la irradiación estimada sobre la superficie de Guadalajara fueron evaluadas para seleccionar datos (superficies) que son conformes a las observaciones de campo.

1. Modelo Solar Analyst

El modelo SA es un sistema eficaz para el cálculo de la irradiación que ha sido probado en regiones tropicales y templadas, así como en zonas con alto relieve (Rich et al., 1992; Fu y Rich, 2000; Tovar-Pescador et al., 2006). Está diseñado para calcular la irradiación global que potencialmente alcanza la superficie de la Tierra bajo condiciones de cielo despejado. Está constituido por un algoritmo (*Hemispherical Viewshed Algorithm*) y tres componentes modulares (*viewshed*, *sunmap* y *skymap*), que en conjunto conforman una herramienta de análisis integrada en la estructura del software de ArcGIS.

El modelo SA hace un análisis segmentado sobre cualquier Modelo Digital de Elevación (MDE), integrando la irradiancia proveniente de todas las direcciones posibles para cada celda del MDE para un periodo determinado. También determina la Irradiación Global (IG) (Ecuación 1) basado en la suma de los dos componentes principales de la radiación solar: la Irradiación Directa Total (IDRT)

y la Irradiación Difusa Total (IDFT) (Ecuaciones 2 y 3); la irradiación reflejada por otras superficies (tercera componente) es discriminada por el modelo debido a que su estimación es bastante compleja y su contribución a la irradiación global es poco significativa (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995).

$$I_G = I_{DRT} + I_{DFT} \quad [Ec. 1]$$

$$I_{DRT} = \sum I_{DR(\theta, \psi)} \quad [Ec. 2]$$

$$I_{DFT} = \sum I_{DF(\theta, \psi)} \quad [Ec. 3]$$

Donde IDR y IDF representan la radiación instantánea directa y difusa, respectivamente, para una posición específica del Sol, definida por el ángulo cenital (θ) y el ángulo azimutal (ψ).

El modelo SA considera tres tipos de factores atenuantes para el análisis de la irradiación solar (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995). Los factores astronómicos consideran las relaciones entre el Sol y la Tierra, tales como: la distancia entre el Sol y la Tierra, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la trayectoria de eclíptica solar, o la constante solar (I_{sc}). Por otra parte, los aerosoles y el vapor de agua que se encuentran en la atmósfera son causantes de la disminución de una proporción de la energía incidente, por tanto, la transmisividad y la difusión de la atmósfera representan a los factores atmosféricos. Por lo que toca a los factores topográficos, las superficies con relieves altos producen una disminución en la cantidad de energía que incide sobre áreas contiguas o sea, un efecto de sombra topográfica.

Los factores astronómicos y topográficos producen grandes variaciones espaciales de la irradiación durante el ciclo anual, mientras que los factores atmosféricos lo hacen a corto plazo (horas o días). Los factores astronómicos y topográficos están completamente controlados dentro del proceso de modelado (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995; Hofierka y Šúri,

2002), mientras que los factores atmosféricos, normalmente son determinados bajo el supuesto de una condición predominante a través del tiempo (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995; Fu y Rich, 1999).

2. Área de estudio

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se localiza en el occidente de México ($20^{\circ}39'55''$ N, $103^{\circ}20'56''$ O). Está asentada sobre una planicie rodeada al sur y oeste por estructuras volcánicas y limitada por un profundo cañón en sus extremo norte y este (Figura 1). Los datos del MDE generados por el programa denominado *Misión de Topografía de Radar* (Shuttle Radar Topography Mission) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration, NASA) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) fueron utilizados para describir los rasgos topográficos y como base para caracterizar la irradiación sobre nuestra área de estudio.

En torno al AMG predominan superficies de bajo relieve con un rango de elevación entre 1,500 y 1,675 msnm (1,585 msnm en promedio). Estas áreas representan amplios valles (Atemajac, Tesistán y Toluquilla) levemente erosionados por sistemas de drenaje poco desarrollados. Por otra parte, las superficies con alto relieve están constituidas por las estructuras del Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) y la Sierra Volcánica del Sur de Guadalajara (SVSG), éstas presentan elevaciones de hasta 2,260 msnm; mientras que la parte más profunda del Cañón de Río Santiago (CRS) en la sección colindante al área de estudio tiene elevaciones de ~ 900 msnm. Estos prominentes rasgos topográficos producen notables contrastes de relieve que se manifiestan en la inclinación de la pendiente. Las superficies con pendiente alta reducen la cantidad de energía solar sobre superficies adyacentes (Hetrick et al., 1993; Fu y Rich, 1999).

El clima del AMG es cálido y húmedo, el periodo de lluvias se presenta durante el

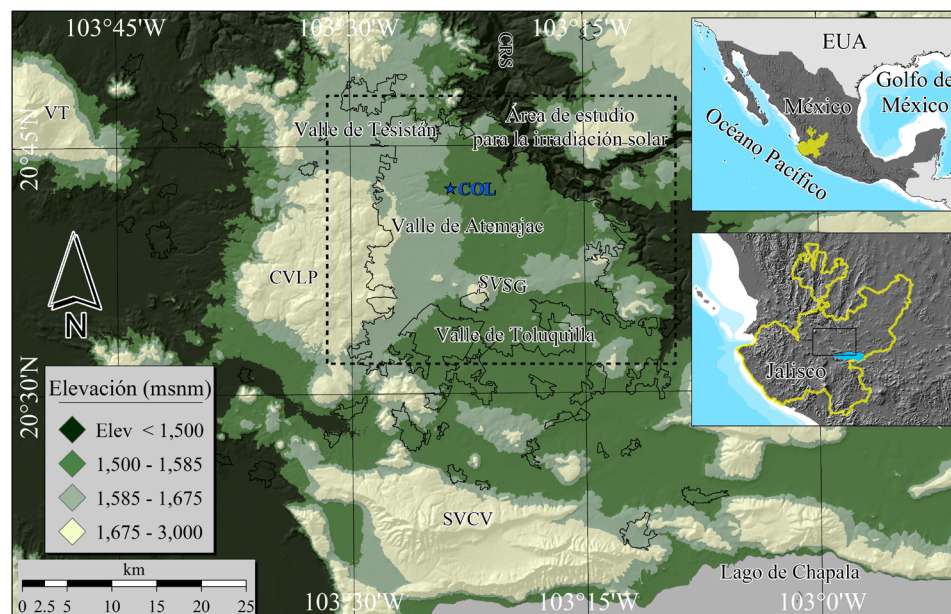


Figura 1. Mapa topográfico del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). La línea punteada muestra la superficie del área de estudio donde se realizó análisis de la radiación solar. La estrella azul indica la posición de la estación Colomos (COL). Otras abreviaturas: Sierra Volcánica Cerro Viejo (SVCV); Complejo Volcánico La Primavera (CVLP); Cañón del Río Santiago (CRS); Volcán de Tequila (VT); Sierra Volcánica del Sur de Guadalajara (SVSG). Fuente del modelo digital de elevaciones: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Modificado de Díaz-Torres et al. (2017).

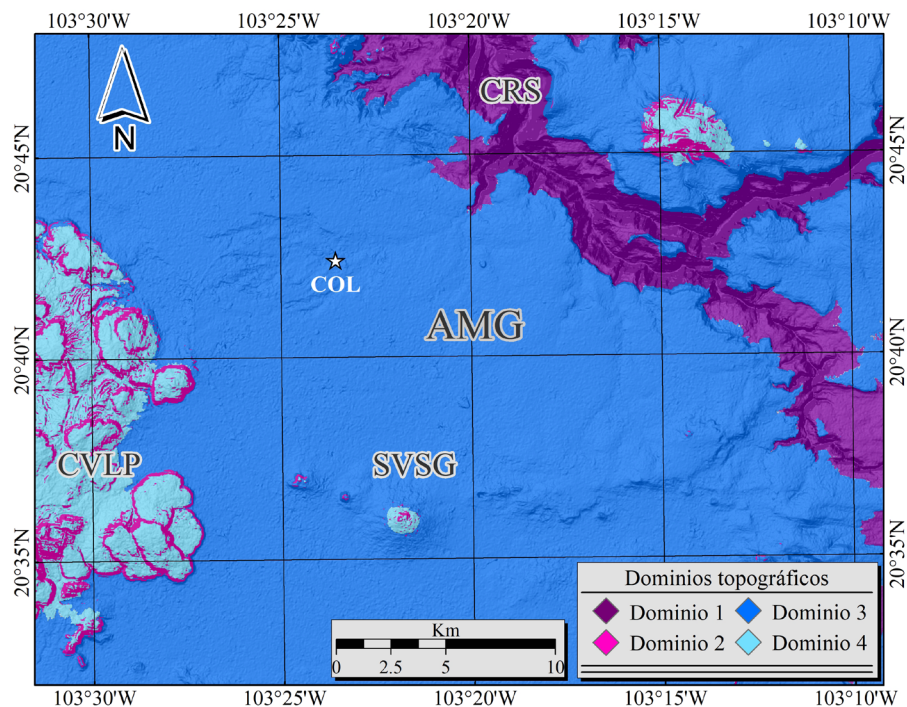


Figura 2. Mapa con la clasificación de dominios topográficos alrededor del Área Metropolitana de Guadalajara (Los detalles se describen en la sección III.2).

periodo verano-otoño (Mayo-Octubre) (García, 1988). La temporada de lluvias se caracteriza por intensas precipitaciones, fuerte actividad eléctrica y presencia de gruesas capas de nubes. Estas condiciones predominan durante períodos prolongados (horas o días) separados por periodos de cielo despejado. El resto del año, una condición de estabilidad atmosférica favorece días con cielo despejado (Tereshchenko y Filonov, 1997; Davydova y Skiba, 1999).

II. METODOLOGÍA

Se diseñó una propuesta metodológica para reducir la incertidumbre de modelos determinísticos, cuando se dispone de un número limitado de sitios de monitoreo para su validación. Para el análisis de irradiación en el AMG se consideró un ciclo anual. El modelo SA se puso a prueba. Varias corridas se llevaron a cabo para identificar la mejor respuestas de salida. La determinación de los parámetros atmosféricos del modelo fue fijada en base a las observaciones

de una estación meteorológica. Los resultados de este modelo y las observaciones de campo sirvieron para llevar a cabo un análisis espacial basado en criterios geomorfológicos y filtrado estadístico. Fueron establecidos nuevos límites espaciales y en las magnitudes de irradiación para identificar las superficies donde la respuesta del modelo ofrece mayor certidumbre.

1. Datos

Los datos de elevación de la misión SRTM están almacenados en archivos con formato raster, los cuales representan arreglos matriciales geo-referenciados y compuestos por celdas con resolución espacial de 1 segundo de arco (~28 m por lado). Debido a que esta información es fundamental para el pre-procesamiento y cálculo de la irradiación, estos datos fueron usados para calcular la irradiación solar en nuestra área de estudio. Una matriz de 1,404 columnas por 1,125 filas (1,579,500 celdas) fue sometida a una revisión cuidadosa para verificar

la calidad y conformidad de los datos, así como para identificar y eliminar posibles artefactos. La estadística descriptiva de esta matriz demostró que no hubo celdas vacías, valores negativos, ni valores iguales a cero.

Por otra parte, los registros de una estación meteorológica (Colomos) fueron utilizados para calibrar los parámetros atmosféricos del modelo y para validar la respuesta de salida más adecuada. Colomos fue la única estación instalada dentro del área de estudio que sistemática y continuamente midió la irradiancia solar (W m^{-2}), registrando datos promedio cada 10 minutos. A partir de estos datos se estimó la irradiación diaria media mensual en términos de $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$, basados en el método de integración diaria de la irradiación (Guevara-Vázquez, 2003).

2. Supuestos, condiciones y parámetros del modelo

La irradiación diaria media mensual se estimó durante un ciclo anual; el modelo SA fue probado en el AMG asumiendo que las condiciones de cielo despejado prevalecen en todo momento. Durante las temporadas de estiaje no se tuvo ningún problema para establecer correlaciones entre los datos modelados (SA) y los observados (Colomos), pero durante la temporada de lluvias la nubosidad produjo grandes desviaciones entre los datos modelados y los observados.

Debido a que el efecto atenuante de las nubes difícilmente se ha podido evaluar como parte del análisis de la irradiación solar (Hofierka y Sürri, 2002), otra escala temporal de análisis se implementó para corroborar las altas cantidades de energía que pueden llegar a la superficie durante algunos lapsos de cielo despejado durante la temporada de lluvias. El análisis de la irradiación diaria observada en Colomos se llevó a cabo en días con cielo despejado, por lo que se identificaron los días de mayor irradiación por mes. Adicionalmente, se identificaron varios

días por mes durante los cuales predominó una condición de cielo despejado, alternada con lapsos de cielo nublado. Tanto los valores máximos como los promedios de irradiación diaria se usaron para validar la respuesta del modelo durante la temporada de lluvias.

El modelo SA utiliza los coeficientes de difusión (τ_d) y de transmisividad (τ) atmosférica para reproducir la capacidad atenuante de la atmósfera (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995). La combinación de estos coeficientes ofrece una aproximación respecto al efecto atenuante de la atmósfera, cuyas características varían en función de la altitud y la posición latitudinal del área de interés. Siete respuestas de salida del modelo SA se determinaron a partir de la combinación de estos coeficientes; los valores propuestos por Fu y Rich (1999) (0.3 para el coeficiente de difusión; y 0.5 para el coeficiente de transmisividad) fueron tomados como referencia para simular condiciones atenuantes que produce el cielo despejado.

3. Criterios de clasificación

El análisis espacial se llevó a cabo después de haber identificado la mejor respuesta del modelo. El procedimiento se dividió en dos pasos: primero se estableció una clasificación del terreno basada en criterios geomorfológicos. Después se hizo una clasificación basada en criterios estadísticos de los datos de irradiación (amplitud, frecuencia y distribución). El segundo paso permitió remover datos remanentes (valores extremos de irradiación) que no se pudieron suprimir mediante los criterios geomorfológicos.

3.1 Criterios Geomorfológicos

Las propiedades topográficas de una superficie intervienen directamente en la disponibilidad de energía solar a la que puede estar expuesta (Hetrick et al., 1993), por lo tanto, el relieve es factor fundamental en el cálculo de la

irradiación. El modelo SA ha sido probado con éxito bajo distintas condiciones topográficas, y evaluada con un gran número de observaciones de campo sobre distintas características de relieve (Rich et al., 1994; Tovar-Pescador et al., 2006). En este sentido, la respuesta del modelo SA estará condicionada a la densidad y distribución de los sitios de validación. Debido a que dentro del área de estudio solo se cuenta con una estación de monitoreo, la validación del modelo se reduce a aquellas superficies con características topográficas semejantes a las que predominan entorno al sitio de monitoreo. Este factor condicionante indujo la caracterización del relieve alrededor de la estación Colomos.

Los datos de programa SRTM fueron usados para caracterizar la topografía del AMG. El análisis geomorfológico basado en la pendiente del terreno permitió establecer una clasificación del relieve. Las características del relieve en Colomos fueron establecidas como referencia para identificar aquellas superficies donde la respuesta del modelo puede ser validada con mayor certidumbre, pero también para remover las superficies que no cumplen con este criterio. La remoción de superficies con alto relieve también estuvo apoyada en un criterio de localización de las geoformas. Debido a que estas superficies producen un efecto de sombra topográfica (reducción de la irradiación) sobre áreas adyacentes, fue necesario preservar algunas de éstas, con el objeto de evitar desviaciones entre el cálculo de la irradiación modelada y la irradiación que realmente podría llegar o ser obstruida sobre estas superficies colindantes.

3.2 Criterios de filtrado estadístico

El Teorema del Límite Central evaluado a través de la Función de Densidad ($f(x)$) de una Variable Aleatoria Continua (x) (Ecuación 4) supone que las observaciones de una variable tienen una distribución normal. Este patrón proporciona un punto de referencia para

explicar el comportamiento de un vasto número de fenómenos (Fischer, 2011). Comúnmente, la translación del valor medio (μ) en una distribución de datos y el re-escalamiento de su desviación estándar (σ) ayuda a normalizar la variable aleatoria (z) de esta función (Yamane, 1973) (Ecuación 5).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad N(\mu, \sigma) \quad [Ec. 4]$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}; \quad N(0,1) \quad [Ec. 5]$$

Basados en estos supuestos evaluamos el histograma de cada arreglo matricial mensual del Sf-36. Los datos de irradiación fueron estandarizados para definir su Distribución Normal Unitaria (DNU) (Ecuación 6). Cada celda fue transformada tomando en cuenta el componente exponencial (z) de la función en la ecuación 5. Esta transformación estableció límites normalizados que facilitaron el análisis y la relación entre los diferentes conjuntos de datos (Yamane, 1973).

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad [Ec. 6]$$

En esta ecuación, el factor z corresponde al valor estandarizado, mientras que x_i representa el valor original de la irradiación de cualquier celda. El software ER Mapper fue implementado para llevar a cabo: 1) La estandarización sobre la respuesta del modelo SA, 2) La definición del umbral de estandarización, así como 3) La clasificación y sustracción de los valores de radiación que estuvieron fuera del umbral establecido. Después de todo, sólo los valores estandarizados de irradiación diaria cercanos a la media mensual fueron preservados, mientras que los restantes fueron suprimidos. La reorganización de la ecuación 6, permitió

transformar los valores normalizados de nuevo a los valores originales de irradiación.

3.3 Análisis estadísticos de histogramas

Para conocer los efectos de reclasificación producidos por los criterios de análisis espacial, se implementó una evaluación sobre las propiedades estadísticas de irradiación media mensual. Una primera descripción estadística fue tomada como referencia a partir de los datos de origen (en toda el área). Una segunda descripción se llevó a cabo posterior al análisis espacial para establecer un análisis de contraste. Parámetros estadísticos tales como las medidas de tendencia central permitieron identificar grandes diferencias. El análisis también estuvo apoyado en los parámetros de Fisher: Coeficientes de asimetría (γ_1) y curtosis (γ_2) (Ecuaciones 7 y 8, respectivamente).

$$\gamma_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{(n-1)(n-2)\sigma^3} \quad [Ec. 7]$$

$$\gamma_2 = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad [Ec. 8]$$

Una evaluación sobre los efectos de sustracción de datos de irradiación correspondiente a superficies no validadas se llevó a cabo mediante estos dos últimos coeficientes. Una razón de cambio en los valores de estos parámetros se estimó para determinar el grado de mejora en la distribución de los histogramas mensuales que se produjo a causa de la sustracción de los datos no validados (Ecuación 9).

$$x = \left[1 - \left(\frac{Sf36}{Sf36(SpA)} \right) \right] * 100 \quad [Ec. 9]$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Selección de la respuesta del modelo

Las observaciones de la estación Colomos se utilizaron como referencia para elegir la respuesta del modelo SA. La irradiación diaria media mensual observada validó las respuesta del modelo durante las temporadas de estiaje, mientras que las observaciones de irradiación media diaria y particularmente las máxima diaria permitieron validar al modelo durante la temporada de lluvia (Tabla 1).

Un Análisis de Varianza sobre la irradiación estimada por este modelo indicó que cualquier respuesta explica cerca del 96% de la variabilidad en la irradiación observada en Colomos, con un nivel de confianza igual a 95% ($P < 0.001$). Sin embargo, la definición de clusters, la comparación múltiple de muestras y el análisis de dispersión de los datos, permitieron identificar que las magnitudes de irradiación obtenidas mediante la respuesta Sf-36 ($\tau_d = 0.3$ y $\tau = 0.6$) son las que mejor corresponden con las observaciones de campo (detalles en Díaz-Torres et al., 2017).

El análisis de Sf-36 indica que la irradiación diaria media anual estimada bajo condiciones de cielo despejado sobre el AMG es de $6.55 \pm 0.46 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una incertidumbre del 7.6%. Un notable contraste temporal de irradiación se observa a través del ciclo anual. Durante julio, la irradiación diaria promedio mensual fue calculada en $8.22 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que en diciembre se estimó un 52.7% de esta irradiación. A pesar de la presencia de gruesas capas de nubes o lluvia durante la temporada de lluvias, los registros de Colomos confirman que durante días despejados de esta temporada, la irradiación es mayor que en cualquier época del año (Tabla 1).

La evaluación del modelo SA y su comparación con otros modelos ha demostrado que su respuesta es bastante aceptable. Según (Ruiz-Arias et al., 2009), el modelo aplicado a su

Tabla 1. Estadística de la irradiación media calculada y la observada en el área de estudio ($\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Mes	Min	Max	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.	Estación Colomos		
							Promedio mensual	Promedio diario	Máximo diario
Enero	0.386	6.204	4.621	4.698	4.717	0.513	4.775	4.497	
Febrero	0.430	6.785	5.491	5.568	5.599	0.504	5.897	6.134	
Marzo	0.680	7.575	6.700	6.804	6.819	0.459	7.030	7.206	
Abril	1.084	8.132	7.547	7.651	7.676	0.404	7.456	7.714	
Mayo	2.450	8.741	8.085	8.179	8.216	0.423	6.620	7.048	8.100
Junio	2.056	8.804	8.090	8.200	8.233	0.430	6.270	6.664	7.910
Julio	2.291	8.989	8.224	8.340	8.377	0.446	6.348	6.503	8.182
Agosto	1.472	8.299	7.747	7.856	7.882	0.401	6.198	6.498	8.078
Septiembre	0.854	8.115	7.321	7.414	7.469	0.465	5.008	5.224	5.611
Octubre	0.466	6.783	5.642	5.722	5.753	0.480	5.427	5.264	
Noviembre	0.405	6.402	4.875	4.954	4.997	0.523	4.349	4.132	4.869
Diciembre	0.369	5.993	4.334	4.400	4.434	0.513	4.248	4.031	

Las lluvias durante Septiembre y Noviembre presentaron condiciones atípicas que redujeron la magnitud de la irradiación calculada por Sf-36. Noviembre se pudo estimar a partir de la irradiación máxima diaria observada en Colomos, mientras que septiembre quedó indeterminado.

Valores en negritas: Datos para validar el valor medio mensual de Sf-36.

Temporada de lluvias en el AMG (sombreado).

caso de estudio correspondió con 92% de las observaciones de campo, lo que indica que los resultados de este modelo representan una buena aproximación de la irradiación que normalmente llegaría a la superficie. Sin embargo, una validación fue implementada tomando en cuenta las diferentes condiciones topográficas en el área de estudio. Debido a que se carece de suficientes sitios de muestreo para validar la irradiación en superficies con diferentes grados de inclinación y localizadas sobre distintas unidades geomorfológicas, un análisis espacial basado en criterios geomorfológicos y estadísticos se utilizó para identificar y remover del análisis las áreas que no pudieron ser validadas bajo dichos criterios.

2. Análisis espacial

La clasificación del relieve mediante los criterios geomorfológicos permitió la definición de cuatro dominios topográficos (Figura 2) dentro del área

de estudio: 1) Relieve con abruptas pendientes $>15^\circ$ dentro del CRS, 2) Flancos de estructuras volcánicas con pendiente $>15^\circ$, 3) Planicies onduladas con elevaciones de 1500 a 1675 msnm y pendientes $<15^\circ$, y 4) Superficies semiplanas con pendientes $<15^\circ$ localizadas en la parte altas de varias estructuras volcánicas. La estación Colomos está ubicada sobre una superficie correspondiente al dominio 3. Las características morfológicas de este dominio predominan en el 75% del área de estudio, el resto corresponde a superficies donde se carece de observaciones que validen la respuesta del modelo SA.

Esta clasificación geomorfológica indica que la superficie acumulada entre los dominios 1 y 2 representan $\sim 11\%$ del total del área de estudio. La implementación de los criterios geomorfológicos ayudó a identificar y remover $\sim 8.3\%$ de la superficie total del área de estudio, correspondientes al dominio 1 (Figura 3). Para fines prácticos la superficie restante del modelo

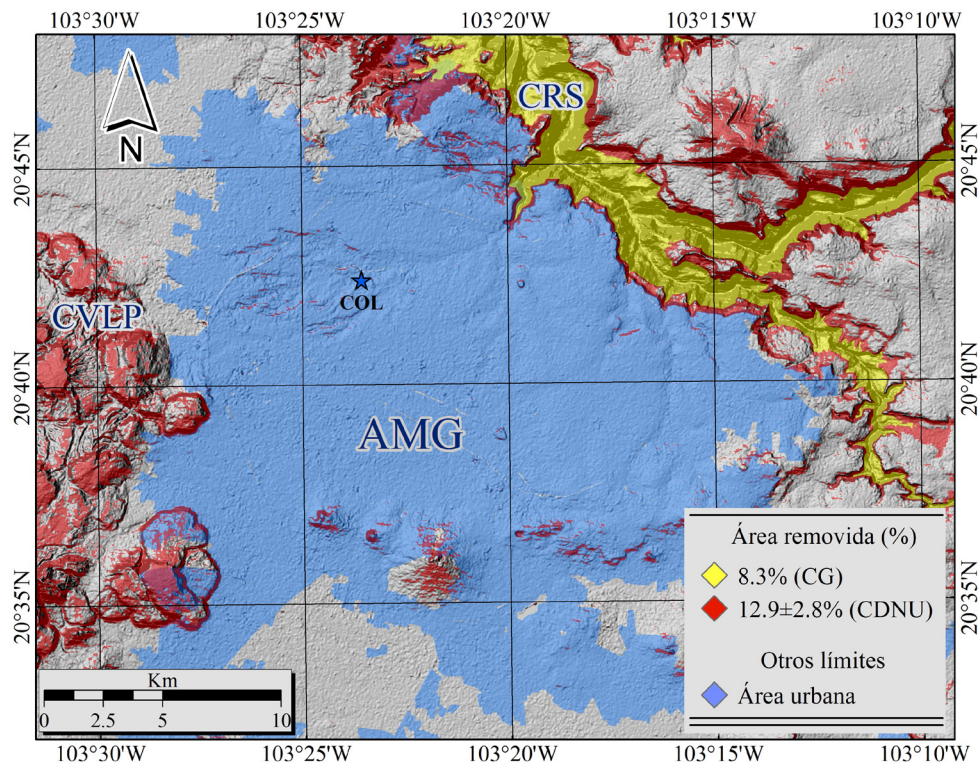


Figura 3. . Mapa con la delimitación de las superficies suprimidas para el análisis de la incertidumbre. Mediante los dos criterios establecidos en este estudio se pudieron remover las superficies que producían grandes incertidumbres en la irradiación diaria media mensual. Sobre el área total se estimó la incertidumbre de Sf-36; el área total menos la superficies en amarillo fueron la base para estimar la incertidumbre de Sf-36(CG); mientras que el área total menos las superficies en rojo permitieron estimar la incertidumbre de Sf-36(CDNU).

SA (91.7%) fue renombrada como Sf-36(CG), y la incertidumbre media mensual para esta superficie se estimó en 4.1%. No obstante estas mejoras, la respuesta Sf-36(CG) conservó un gran número de celdas, entre las cuales predominan valores irradiación con baja frecuencia. Por lo tanto, los criterios de filtrado estadístico basados en la normalización de los datos fueron elegidos para refinar la selección de aquellos valores de irradiación similares a las observaciones de la estación Colomos.

Comúnmente, el 95% de las observaciones de una distribución normal se concentran dentro de $\pm 2\sigma$ alrededor de μ . En nuestro caso, se encontró que los valores de irradiación de la respuesta Sf-36(CG) fueron semejantes a los valores de irradiación diaria media observada en Colomos estuvieron distribuidos en un intervalo menor

que $\pm 2\sigma$ respecto al valor promedio de cada matriz. Por lo tanto, el umbral se redujo a $\pm 1\sigma$ para identificar los valores de irradiación muy cerca a la media. Los valores de la irradiación diaria media mensual de la respuesta Sf-36(CG) fueron transformados mediante la ecuación 6 para establecer un umbral estandarizado. La matriz de correlación de cada superficie (mensual) de irradiación indica que todas las superficies cumplen con los supuestos de la normalización ($\mu=0$, $\sigma=1$) (Tabla 2). Mediante esta delimitación se pudo remover un $12.9\pm 2.8\%$ de la superficie contabilizada en la respuesta Sf-36(CG) (Figura 3). Estos corresponden con valores de baja frecuencia que produjeron grandes incertidumbre sobre la respuesta Sf-36. La superficie computable que se conservó después de este procedimiento se renombró como Sf-36(CDNU).

Tabla 2. Límites estandarizados de los datos de irradiación y parámetros de normalización de las matrices.

Mes	z(Mínimo)	z (Máximo)	m	s
Enero	-11.6	4.6	0.0	1.0
Febrero	-15.2	4.1	0.0	1.0
Marzo	-18.9	3.4	0.0	1.0
Abril	-19.7	2.8	0.0	1.0
Mayo	-15.9	3.3	0.0	1.0
Junio	-16.1	3.2	0.0	1.0
Julio	-15.2	3.4	0.0	1.0
Agosto	-18.3	2.7	0.0	1.0
Septiembre	-19.3	3.3	0.0	1.0
Octubre	-16.5	3.9	0.0	1.0
Noviembre	-12.2	4.3	0.0	1.0
Diciembre	-10.6	4.7	0.0	1.0
z=Valor de la variable aleatoria.				

La aplicación de criterios geomorfológicos y el filtrado estadístico mostró que $78.7 \pm 2.8\%$ del área de estudio presenta valores de irradiación diaria media mensual y características topográficas similares a las que predominan en la zona de la estación Colomos. A este porcentaje de área se le denominó Sf-36(SpA) y la incertidumbre media mensual se estimó en 1.7%.

3. Evaluación estadística

El análisis de histogramas de los valores de irradiación diaria media mensual de la respuesta Sf-36 mostró que la amplitud total (Máximo-Mínimo) fue muy grande en todos los meses del año (Tabla 1). Sin embargo, aproximadamente 80% de los datos más frecuentes se concentraron alrededor del valor medio y dentro de el umbral de $\pm 1\sigma$. También se encontró que el valor de la mediana y la moda están muy cerca de la media, las diferencias entre estos parámetros fueron pequeñas: 1.9% en promedio, es decir del orden de $0.12 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Por otra

parte, el análisis de la distribución de los datos mediante los coeficientes de asimetría y curtosis (Ecuaciones 7 y 8) confirmó que la gran cantidad de los datos cercanos al valor medio produjo una distribución leptocúrtica en todos los casos. Estos coeficientes también indican que un 20% de los datos representan valores de irradiación poco frecuentes, principalmente valores de irradiación diaria media mensual bajos. Esta distribución produjo una distribución asimétrica negativa en los histogramas.

Esta pequeña proporción de valores poco frecuentes causó un alto contraste en la dispersión de los datos de Sf-36, lo que dio como resultado incertidumbres de $0.43 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (5.3%) en el verano y $0.51 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (10.7%) durante el invierno (Tabla 1). La superficie con poco relieve dentro del AMG está limitada abruptamente por barrancos, cañones y montañas; por lo tanto, fue razonable encontrar patrones de distribuciones irregular (no normal) en la irradiación estimada por Sf-36.

Tabla 3. Evaluación de los histogramas de irradiación mediante los coeficientes de Fisher.

(Sección A) Diferencias entre Sf-36 y Sf-36(SpA)

Parámetro	Respuesta	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
γ_1	Sf-36	-2.7	-3.1	-3.4	-3.2	-3.1	-3.1	-3.0	-3.2	-3.3	-3.2	-2.8	-2.6
	Sf-36(SpA)	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.7	-0.5	-0.5	-0.4
γ_2	Sf-36	11.9	13.2	13.4	10.9	9.7	10.5	9.6	10.2	12.6	13.5	12.0	11.6
	Sf-36(SpA)	0.6	0.6	0.6	0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.1	0.4	0.7	0.6	0.6

(Sección B) Ajuste del histograma posterior el análisis espacial (%)

Parámetro	Promedio anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
γ_1	83.0	85.9	87.4	81.3	78.2	83.7	87.6	84.1	78.8	77.6	83.6	83.5	84.3
γ_2	96.2	94.6	95.4	95.6	98.2	96.7	97.3	96.0	99.2	96.8	94.7	94.8	94.9

Los valores porcentuales de la sección B corresponden a la razón de cambio observada en los histogramas como resultado de la implementación del análisis espacial. La estimación de estos valores se llevó a cabo mediante la ecuación 9.

El mismo análisis estadístico se llevó a cabo para Sf-36(SpA). Sus resultados indican que la sustracción de los valores de irradiación poco frecuentes que se encuentran fuera del rango $\pm 1\sigma$, causó que el coeficiente de asimetría disminuyera hasta llegar a una distribución casi simétrica ($\gamma_1 \approx 0.0$) con una forma platicúrtica ($\gamma_2 < 3.0$) (Tabla 3). Estos coeficientes indican que las mejoras obtenidas a partir del análisis espacial ayudaron a suprimir el ruido causado por este tipo de datos poco frecuentes.

la cual se redujo a $0.47 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ((Sf-36) SpA) después del análisis realizado. No obstante esta importante reducción en la amplitud de los datos, sólo un 21% de los datos totales fueron removidos, preservando con esto los mismos valores de referencia (μ) (Figura 4-B). Finalmente después del análisis espacial, la irradiación diaria media anual que potencialmente llega a la superficie del AMG se estimó en $\sim 6.65 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una incertidumbre de 1.7% (Tabla 4, Figura 5).

4. Implicaciones metodológicas

La remoción de los datos de irradiación poco frecuentes permitió recalcular la dispersión de los datos de irradiación en superficies efectivamente validadas mediante los datos de Colomos. La delimitación espacial produjo una gran reducción en la amplitud total de los valores de irradiación (Figura 4-A). Inicialmente los datos de irradiación diaria media mensual tenían una amplitud total de $\sim 6.49 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Sf-36) en promedio para los 12 meses del año,

IV. CONCLUSIONES

Con el objetivo de clasificar y seleccionar los mejores resultados de un modo determinístico fué implementada una sencilla propuesta metodológica. El análisis espacial sustentado en criterios físicos y estadísticos fue fundamental para agrupar y segregar datos de irradiación solar generados por el modelo Solar Analyst. Las observaciones de la única estación meteorológica (Colomos) sobre el Área Metropolitana de Guadalajara se utilizaron para validar la mejor

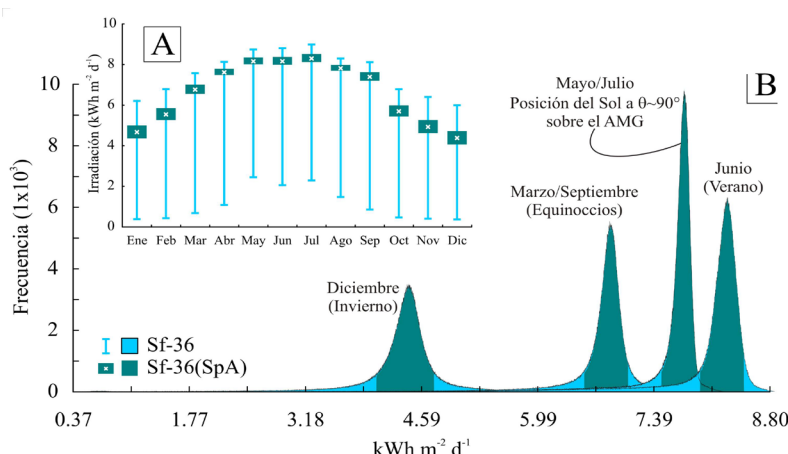


Figura 4. A) Amplitud total de los datos de irradiación diaria media mensual, obtenidos a partir del modelo SA previo (Sf-36) y posterior al análisis espacial (Sf-36(SpA)). B) Histogramas de frecuencia de irradiación diaria media mensual, como ejemplo se tomaron los meses en los que se presenta fechas importantes relacionadas con los cambios estacionales en el AMG. Estos exponen la amplitud de los datos de la respuesta de modelo SA, Sf-36(SpA) corresponde al 79% del total de los datos considerados en Sf-36. La cruz blanca en la figura A corresponde al valor promedio estimado en la matriz mensual, muy semejante al valor de irradiación diaria media mensual observado en Colomos.

Tabla 4. Análisis comparativo de las incertidumbres del modelo antes y después del análisis espacial.

Mes	Media ($\text{kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Desviación estándar ($\text{kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$)			Desviación estándar inicial (%)	Desviación estándar final (%)
	Sf-36	Sf-36	Sf-36 (CG)	Sf-36 (CDNU)	Sf-36	Sf-36(SpA)
Enero	4.621	0.513	0.324	0.141	11.09	3.04
Febrero	5.491	0.504	0.297	0.129	9.18	2.35
Marzo	6.700	0.459	0.227	0.096	6.86	1.44
Abril	7.547	0.404	0.154	0.060	5.35	0.79
Mayo	8.085	0.423	0.172	0.072	5.23	0.88
Junio	8.090	0.430	0.192	0.083	5.32	1.02
Julio	8.224	0.446	0.196	0.087	5.42	1.06
Agosto	7.747	0.401	0.147	0.056	5.18	0.72
Septiembre	7.321	0.465	0.212	0.081	6.35	1.10
Octubre	5.642	0.480	0.273	0.118	8.51	2.09
Noviembre	4.875	0.523	0.326	0.143	10.72	2.92
Diciembre	4.334	0.513	0.330	0.145	11.83	3.34
Promedio	6.556	0.463	0.238	0.101	7.59	1.73

La desviación estándar expresada en porcentaje está referida al valor medio de Sf-36.

Sf-36(CG): Datos de la respuesta después de aplicar los criterios geomorfológicos.

Sf-36(CDNU): Datos de la respuesta después de aplicar los criterios de estandarización.

Sf-36(SpA): Datos de la respuesta después de aplicar el análisis espacial (CG+CDNU)

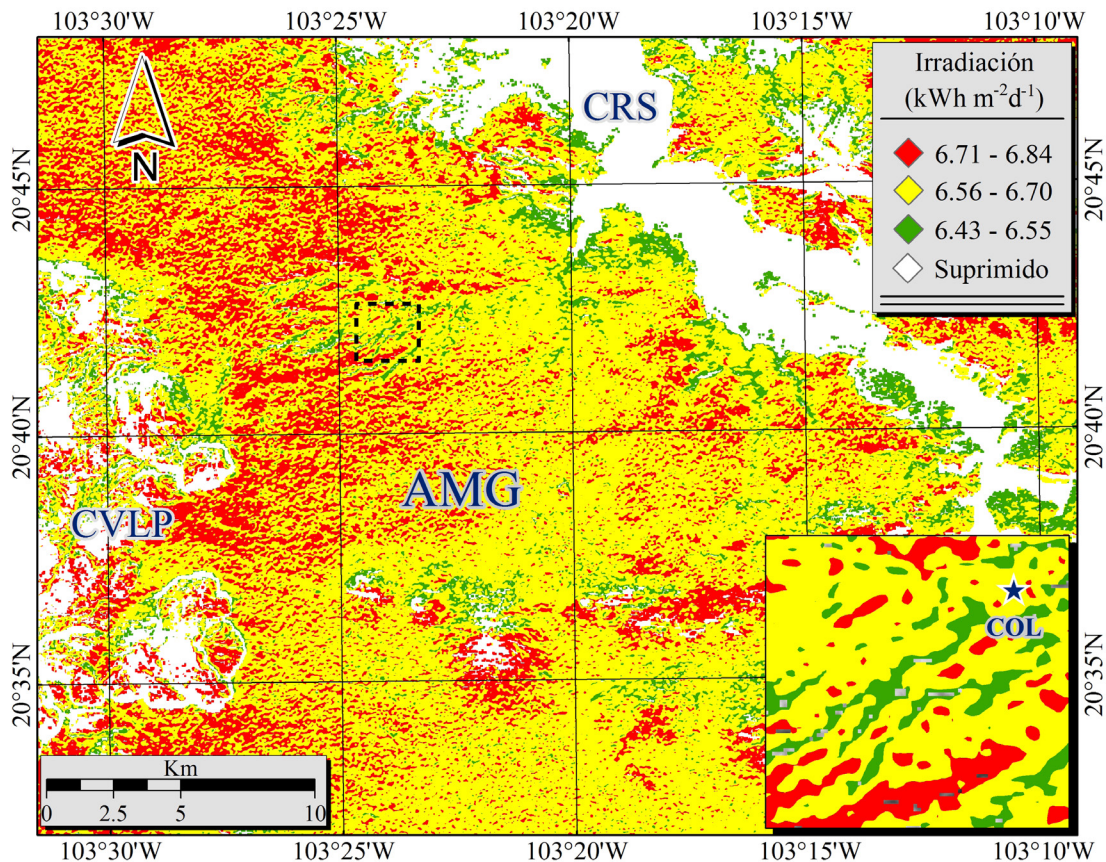


Figura 5. Mapa de la irradiación diaria media anual que potencialmente puede llegar a la superficie estimada con la respuesta (Sf-36(SpA)).

respuesta del modelo: Sf-36. Las observaciones de Colomos también sirvieron de referencia para elegir los datos del modelo que mejor explicaron la irradiación real. Esta metodología ayudó a suprimir superficies del área de estudio que no tenían un soporte de validación (observaciones de campo). El área efectiva del modelo se redujo a superficies con características topográficas semejantes a las que hay en torno al sitio de la estación; consecuentemente, la incertidumbre calculada sobre dicha superficie también fue menor y más consistente con los datos de campo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Olga Sarychikhina y al revisor anónimo por sus valiosas observaciones que contribuyeron a mejorar el contenido de este documento. También agradecemos a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y al Servicio

Meteorológico Nacional (SMN) en México por la disposición de los datos meteorológicos, así como el Servicio Geológico de los Estados Unidos de America (USGS) por los datos del programa Shuttle Radar Topography Mission. Este trabajo fue financiado por el Fondo de Ciencia Básica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México (Clave de registro: CB-2012/183444).

Referencias

- Adams, J., 2009. Vegetation-climate interaction: How plants make the global environment. Springer Science & Business Media, 263 p.
- Davydova, B, V., Skiba, Y. N., 1999. Climate of Guadalajara City (México), its variation and change within latest 120 Years. World Resource Review, 11(2), 258-270.

- Dubayah, R., Rich, P. M., 1995. Topographic Solar Analysts for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 405-419.
- Díaz-Torres, J. J., Hernández-Mena, L., Murillo-Tovar, M. A., León-Becerril, E., López-López, A., Suárez-Plascencia, C., Aviña-Rodriguez, E., Barradas-Gimate, A., Ojeda-Castillo, V., 2017. Assessment of the modulation effect of rainfall on the solar radiation availability at the earth's surface. *Meteorological Applications*, 24(2):180-190.
- Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N., 2000. *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. Academic press. 969 p.
- Fischer, H., 2011. *A history of the central limit theorem: From classical to modern probability theory*. Springer Science & Business Media. 402 p.
- Fu, P., Rich, P. M., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In *Proceedings of the 19th annual ESRI user conference* (pp. 1-33). San Diego, USA.
- Fu, P., Rich, P. M., 2000. A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. 1-357-364
- García, E., 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México: México.
- Gates, D. M., 1980. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, 611 p.
- Guevara-Vázquez, S., 2003. *Estimación de la radiación solar*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente/Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima, Peru.
- Hetrick, W. A., Rich, P. M., Barnes, F. J., Weiss, S. B., 1993. GIS-based solar radiation flux models. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 3. Photogrammetry and Modeling. pp. 132-143.
- Hofierka, J., Šúri, M., 2002. The Solar Analyst for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*, pp. 1-19.
- Jones, H. G., 2013. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge university press., 423 p.
- Kumar, L., Skidmore, A. K., Knowles, E., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 475-497.
- Mckenney, D. W., Mackey, B. G., Zavitz, B. L., 1999. Calibration and sensitivity analysis of a spatially-distributed Solar Analyst. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(1), 49-65.
- Miklánék, P., 1993, The estimation of energy income in grid points over the basin using simple digital elevation model. In *Annales Geophysicae, European Geophysical Society, Springer, Suppl. II*, 11: 296.

- Pons, X., 2002. MiraMon. Geographical Information System and Remote Sensing Software. Version 4.4.
- Pons, X., Ninyerola, M., 2008. Mapping a topographic global Solar Analyst implemented in a GIS and refined with ground data. *International Journal of Climatology*, 28(13), 1821-1834.
- Rich, P. M., Weiss, S. B., Debinski, D. A., McLaughlin, J. F., 1992. Physiographic inventory of a tropical reserve. In *Proceedings of the Twelfth Annual ESRI User Conference* (pp. 197-208).
- Rich, P. M., Hetrick, W. A., Saving, S. C., Dubayah, R., 1994. Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*.
- Ríos-Insua, S., Mateos-Caballero, A., Bielza-Lozoya, M. A. y Jiménez-Martín, A., 2004. *Investigación Operativa. Modelos determinísticos y estocásticos*. Editorial Universitaria Ramón Areces. Madrid, España, 552 p.
- Ruiz-Arias, J. A., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Alsamamra, H., 2009. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8), 1049-1076.
- Strahler, A. H., 2010. *Introducing Physical Geography*. 5Th Edition. John Wiley & Sons. 656 p.
- Tereshchenko, I. E., y Filonov, A. E., 1997. A cerca de las causas de las elevadas concentraciones de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de Guadalajara, en octubre de 1996. *GEOS*, 17, 54-59.
- Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Batlles, J., López, G., Bosch, J. L., 2006. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Meteorological Applications*, 13(3), 279-287.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C., 2000. *Secondary topographic attributes. Terrain analysis: Principles and applications*, 87-131.
- Yamane, T., 1973. *Statistics: An introduction analysis*. 2nd Edition, Harper & Row. 1,130 p.

Recibido: 26 de mayo de 2017

Recibido corregido por el autor: 7 de septiembre de 2017

Aceptación: 12 de septiembre de 2017