

METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA DISTINTOS USOS Y CASOS DE APLICACIÓN

Carra E. ^{*}, Ballestrín J. ^{*}, Fernández Reche J. ^{*}, Marzo A. ^{}, Polo J. ^{***}, Barbero J. ^{****}, Monterreal R. ^{*}, Enrique R. ^{*}, Alonso-Montesinos J. ^{*****}**

^{*}CIEMAT-Plataforma Solar de Almería. Ctra. de Senés km. 4,5. Tabernas (04200) (Almería), Spain. ecarra@psa.es

^{**}Universidad de Antofagasta, Centro de Desarrollo Energético Antofagasta, Chile

^{***}Unidad de Energía Solar Fotovoltaica (CIEMAT), Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, Spain

^{****}Dpto. Física Aplicada, Universidad Almería, Ctra. Sacramento, s/n, 04120 La Cañada, Almería, Spain

^{*****}CIESOL, Centro conjunto Universidad de Almería-CIEMAT, 04120 Almería, Spain

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6100>

RESUMEN

La extinción atmosférica de la radiación solar es un fenómeno de gran importancia en las plantas solares de concentración de torre. Es necesario medir y controlar este parámetro para el correcto funcionamiento y rendimiento de este tipo de plantas. En este trabajo se desarrollan metodologías para determinar la extinción para distintos usos y casos de aplicación. Por un lado, es necesario conocer los niveles de extinción medios, máximos y mínimos anuales en la búsqueda de localizaciones óptimas para nuevas plantas. Para ello se ha desarrollado la metodología AOT que determina los niveles de extinción característicos de cualquier emplazamiento. Por otro lado, es necesario monitorizar los niveles de extinción en tiempo real para la operación diaria de una planta, junto con el resto de parámetros meteorológicos críticos. Con ese fin se ha desarrollado el sistema de medida CIEMAT que mide la extinción instantánea heliostato-torre con un error del 2% absoluto. Las metodologías han sido validadas en la PSA y pueden ser aplicadas en cualquier localización de interés para la energía solar de concentración.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Extinción atmosférica, Atenuación atmosférica, Plantas solares

ABSTRACT

The atmospheric extinction of solar radiation is a phenomenon of great importance in concentrating solar tower plants. It is necessary to measure and control this parameter for the correct operation and performance of this type of plants. In this work, some methodologies are developed to determine the extinction for different uses and cases of application. On the one hand, it is necessary to know the average, maximum and minimum annual extinction levels in the search for optimal locations for new plants. For this purpose, the AOT methodology has been developed to determine the characteristic extinction levels of any site. On the other hand, it is necessary to monitor the extinction levels in real time for the daily operation of a plant, together with the rest of the critical meteorological parameters. For this purpose, the CIEMAT measurement system has been developed, which measures instantaneous heliostat-tower extinction with an error of 2% absolute. The methodologies have been validated at the PSA and can be applied at any location of interest for CSP.

KEYWORDS: Solar Energy, Atmospheric Extinction, Atmospheric Attenuation, CSP plants

INTRODUCCIÓN

En el Acuerdo de París del 2015 hubo consenso mundial para limitar la subida de la temperatura del Planeta por debajo de 2°C (Willis et al., 2014). Además, en la última reunión del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático éstos alertaron sobre la necesidad de limitar la subida por debajo de 1.5°C, ya que sobrepasar este límite tendría consecuencias catastróficas, desencadenando cambios y procesos naturales sobre los que no se tendría control alguno. Para conseguir estos objetivos es de gran importancia el uso cada vez más intensivo de las energías renovables. Para aumentar la cuota de participación de las energías renovables y conseguir una mayor integración dentro de los sistemas de suministro eléctrico de un país, es necesario solventar en un futuro inmediato los retos e hitos que presentan este tipo de energías para su completo desarrollo tecnológico.

En los próximos años habrá un aumento en la construcción de plantas de energía solar de concentración (CSP) de torre de mayores potencias. Esta tecnología energética renovable consiste en un campo de colectores solares o heliostatos que reflejan la energía solar incidente en ellos, concentrándola en el receptor central de una torre. La energía concentrada se usa para generar vapor que moverá una turbina produciendo electricidad, o bien para almacenarla en un tanque de sales u otro tipo de almacenaje para producir electricidad posteriormente.

Plantas de mayores potencias implican mayor superficie del campo de heliostatos y, por lo tanto, mayor distancia entre los heliostatos más alejados y el receptor central. En este escenario el fenómeno de la extinción atmosférica de la radiación solar cobra gran importancia al producir pérdidas de radiación entre los heliostatos más alejados y el receptor central, disminuyendo la eficiencia en la producción de energía eléctrica. La extinción atmosférica es un fenómeno por el cual la radiación solar es atenuada en su camino óptico desde el heliostato al receptor central debido a los atenuadores atmosféricos presentes en la atmósfera (vapor de agua, CO₂, aerosoles), los cuales absorben la radiación o la dispersan de su trayectoria, provocando la pérdida de radiación concentrada en el receptor. Algunos cálculos paramétricos estiman unas pérdidas de potencia de hasta el 20% para días turbios en distancias heliostato-torre de 1 km (Ballestrín y Marzo, 2011). Estas pérdidas traducidas en términos económicos y energéticos pueden ser elevadas si este parámetro no es considerado. Por lo tanto, es necesario conocer los niveles de extinción existentes en tiempo real en este tipo de plantas para poder operar con la máxima eficiencia posible y poder garantizar el suministro de energía al sistema. De esta forma se aumentaría la cuota e integración de la producción de este tipo de plantas en el sistema de producción eléctrica. Además de ser necesario el conocimiento de la extinción en tiempo real para el funcionamiento de las plantas solares de concentración de torre, también será necesario conocer los niveles de extinción que se pueden encontrar en cualquier localización dentro del cinturón solar para ser considerada óptima para la construcción de futuras plantas de este tipo.

Hasta ahora la extinción se había tratado normalmente con modelos paramétricos los cuales se introducen en los códigos de diseño de plantas, pero no han sido validados con medidas reales. Los modelos paramétricos calculan la extinción usando parámetros y atmósferas estándar, en condiciones extremas, desde ambientes limpios a sucios o nublados (Vittitoe y Biggs, 1978; Pitman y Vant-Hull, 1982; Ballestrín y Marzo, 2011). La mayoría de estos modelos no son espectrales, siendo la energía solar de naturaleza espectral. Algunos de ellos combinan parámetros estándar con medidas en emplazamientos determinados (Polo et al., 2016; Carra et al., 2018) pero sin ser contrastadas con la realidad debido a las dificultades de medir la extinción en condiciones realistas. En el trabajo de (Ballestrín y Marzo, 2011) se pone de manifiesto la necesidad de obtener medidas reales en los emplazamientos debido al carácter local de la extinción, mostrando para ello discrepancias entre los distintos modelos paramétricos aplicados a un mismo lugar.

En otros trabajos algunos autores caracterizan la extinción con instrumentación meteorológica para medir visibilidad e irradiancia normal directa (DNI). En el trabajo de (Sengupta y Wagner, 2012) se propone el estudio del impacto de los aerosoles en la atenuación de la atmósfera basándose en la comparación de las medidas de DNI, y las estimaciones de un modelo de DNI para una atmósfera libre de aerosoles. Otro de los trabajos que utiliza medidas de DNI es el trabajo de (Tahboub et al., 2014). Los autores utilizan cuatro pirheliómetros a diferentes alturas para obtener la extinción. La desventaja de este método es la diferencia horizontal de los sensores, situados a distintas alturas en una montaña. Por otro lado, en el trabajo de (Hanrieder et al., 2016) se presenta una mejora a la metodología de (Sengupta y Wagner, 2012). Para ello utilizan las medidas de DNI y el modelo propuesto por Sengupta para obtener tres modelos de transmitancia para las pérdidas de atenuación heliostato-receptor de una planta CSP de torre. Paralelamente, (Hanrieder et al., 2015) han desarrollado una metodología usando transmisómetros y dispersómetros para obtener la extinción. La metodología estima las transmitancias espectrales atmosféricas a partir de las medidas de ambos instrumentos, aplicando correcciones espectrales usando códigos de transferencia radiativa, y correcciones de absorción para el caso del dispersómetro que sólo mide dispersión.

En la Plataforma Solar de Almería (PSA), en base a los avances que se necesitaban en este tema, CIEMAT ha desarrollado metodologías (metodologías CIEMAT-PSA) para determinar la extinción tanto en tiempo real para la operación diaria de una planta, como para determinar los niveles de extinción que se pueden encontrar en una localización para futuros emplazamientos. Una de las metodologías CIEMAT-PSA es el sistema de medida directa de extinción llamado CIEMAT system (Ballestrín et al., 2016; Ballestrín et al., 2018; Ballestrín et al., 2019). Este

sistema de medida de extinción ha permitido monitorizar por primera vez en tiempo real la extinción cada minuto en la sala de control de una planta de torre junto con el resto de variables meteorológicas necesarias para la operación de este tipo de plantas. El CIEMAT system consiste en dos cámaras digitales idénticas ubicadas a diferentes distancias de una diana lambertiana a lo largo de la línea Norte-Sur de la PSA. Ambas cámaras toman imágenes simultáneas de la diana, detectando así cada cámara la radiación proveniente de ésta. Los niveles de intensidad o de gris obtenidos de las imágenes digitales de ambas cámaras son proporcionales a la cantidad de radiación de la diana. A partir de estos niveles de intensidad puede obtenerse, mediante un algoritmo sencillo (Ballestrín et al., 2018), la extinción de la radiación a la distancia entre cámaras. El CIEMAT system ha permitido obtener casi tres años de medidas completos en la PSA y sigue midiendo en la actualidad con un mantenimiento mínimo (Ballestrín et al., 2019). Han sido comparados los dos primeros años de medidas, siendo los niveles medios de extinción obtenidos coincidentes, teniendo en cuenta los márgenes de error (Carra et al., In Press).

Por otro lado, se han desarrollado otras metodologías CIEMAT-PSA para estimar los niveles generales de extinción que se pueden encontrar en un emplazamiento, obteniendo la extinción de manera indirecta con variables como el Aerosol Optical Thickness (AOT). El método desarrollado con este fin ha sido aplicado en la PSA para obtener la extinción utilizando un año típico de aerosoles (TAY) y variables atmosféricas realistas características de la atmósfera representativa de la PSA. Este método es llamado AOT extinction method (Carra et al., 2018) y utiliza datos de AERONET (Holben et al., 1998), recurso que proporciona medidas diarias de AOT a distintas longitudes de onda en alrededor de 1000 emplazamientos en todo el mundo. Con los datos de AOT se elabora un TAY de donde se obtienen los parámetros de Ångström medios característicos del emplazamiento. Con estos parámetros y otras variables representativas de la localización se obtienen las transmitancias espectrales a distintas distancias con un código de transferencia radiativa. Finalmente se obtiene una ecuación para la extinción anual en función de la distancia heliostato-torre, para los niveles medios, máximos y mínimos característicos del emplazamiento.

Como no existen estaciones AERONET en todos los emplazamientos de interés, se han usado también datos de AOT de los satélites MODIS (AQUA y TERRA) y de MERRA2, en lugar de los de AERONET para obtener los niveles de extinción en la PSA, con el AOT extinction method. De esta forma se puede utilizar esta metodología para obtener los niveles de extinción característicos para un emplazamiento en cualquier localización del planeta (Carra et al., 2020). Las extinciones anuales medias, máximas y mínimas obtenidas por el AOT extinction method, tanto con datos de AERONET como de satélite, para la localización de la PSA son coincidentes con las obtenidas con el sistema de medida de dos cámaras (CIEMAT system) teniendo en cuenta los márgenes de error (Carra et al., 2020; Carra et al., In Press). Por lo tanto, el sistema de medida valida las otras metodologías CIEMAT-PSA ratificando que son válidas para predecir los niveles de extinción que se pueden encontrar en un emplazamiento de interés del cinturón solar, aunque los niveles diarios necesarios para la operativa de una planta de torre solo pueden ser obtenidos midiendo diariamente con el CIEMAT system, único sistema desarrollado en el mundo que mide extinción solar directamente y en tiempo real.

NIVELES DE EXTINCIÓN Y EXTINCIÓN DIARIA DE UN EMPLAZAMIENTO

Existen dos tipos de valoraciones de interés de la extinción en un emplazamiento. Por un lado están los niveles de extinción anuales para una localización, que serán los niveles medios, máximos y mínimos característicos del lugar. Estos niveles dan una idea de la extinción que nos vamos a encontrar en un emplazamiento y los máximos y mínimos que se van a registrar a lo largo de un año. Esta información es necesaria para buscar sitios óptimos para la construcción de nuevas plantas solares de concentración (al igual que se tienen en cuenta los niveles medios, máximos y mínimos de otras variables como DNI, temperatura, ...), para estimar el tipo de pérdidas que se pueden obtener en base a los máximos esperados, o bien para seleccionar o diseñar un sistema de medida de extinción que vaya a ser capaz de medir estos niveles característicos del emplazamiento (sensor con la sensibilidad adecuada). Por otro lado, es necesario medir extinción instantánea diaria para la operación continua de una planta CSP de torre. Para ello será necesario un sistema de medida con la sensibilidad suficiente para que sea capaz de detectar los niveles medios, máximos y mínimos que se registrarán en un emplazamiento. Teniendo en cuenta estos dos tipos de escenarios donde la extinción es necesaria, se han desarrollado metodologías CIEMAT-PSA para obtener los niveles de extinción en un emplazamiento (AOT extinction method) y para obtener la extinción medida diaria de una planta CSP (CIEMAT system).

MÉTODOS CIEMAT-PSA: AOT EXTINCTION METHODS

Las metodologías CIEMAT-PSA llamadas AOT Extinction Methods han sido desarrolladas para estimar los niveles generales de extinción que se pueden encontrar en un emplazamiento. La extinción se obtiene de manera indirecta con variables como el AOT y variables atmosféricas realistas características de la atmósfera representativa de la localización. Para ello se utilizan datos del recurso AERONET, donde se pueden obtener medidas diarias de AOT a distintas longitudes de onda en unos 1000 emplazamientos en todo el mundo (Carra et al. 2018). Como no existen estaciones AERONET en todos los emplazamientos de interés, se ha usado la metodología AOT extinction method

con datos de AOT de los satélites MODIS (AQUA y TERRA) y de MERRA2, en lugar de los de AERONET para obtener los niveles de extinción en cualquier emplazamiento donde no existan estaciones AERONET (Carra et al., 2020).

CIEMAT AOT Extinction Methods: AERONET

La metodología CIEMAT AOT extinction method ha sido aplicada para el emplazamiento de la Plataforma Solar de Almería. Consiste en la obtención de 5 años de datos de AOT a ocho longitudes de onda distintas (1640 nm, 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm, 340 nm) de la estación AERONET *PSA Tabernas AERONET* (NASA, 2018). Con estos datos se realiza un año típico de aerosoles (TAY) usando la metodología de NREL para crear años típicos meteorológicos (TMY) (Wilcox y Marion, 2008). Según esta metodología, los TMY tienen que ser generados con al menos 15 o 30 años de datos. Algunos autores aseguran, en base a sus estudios, que sólo cinco años de datos son suficientemente representativos de la climatología de un lugar (Vignola y McDaniels, 1993; Festa y Ratto, 1993). Por lo tanto se han utilizado 5 años para generar el TAY para la PSA. Los TMY están formados por varias variables meteorológicas como DNI, temperatura, etc... Es un año conformado por la concatenación de 12 meses diferentes seleccionados de la muestra de años de acuerdo con los valores del estadístico Finkelstein-Schafer (FS) (Finkelstein y Schafer, 1971), que se utiliza para determinar el valor de las variables meteorológicas de un periodo de tiempo amplio que serán lo más característicos posible para un emplazamiento. A partir del TAY generado para la localización se calculan los valores medios, máximos y mínimos de AOT para cada longitud de onda de la misma forma que se calculan los valores medios y extremos en climatología. La media se calcula sumando las medias mensuales y dividiendo por el número de meses. El máximo se calcula como la suma del máximo de cada mes que compone el TAY dividido por el número de meses, y el mínimo se determinará de la misma manera que el máximo. De esta forma se obtienen los niveles típicos de aerosoles para el emplazamiento de la PSA (AOT_{mean}, AOT_{max}, AOT_{min}). Con ellos y aplicando la Ley de Ångström se obtienen los parámetros de Ångström característicos de la PSA ($\alpha_{\lambda_{mean}}$, $\beta_{\lambda_{mean}}$, $\alpha_{\lambda_{max}}$, $\beta_{\lambda_{max}}$, $\alpha_{\lambda_{min}}$, $\beta_{\lambda_{min}}$). Estos parámetros son introducidos en el código de transferencia radiativa LibRadtran (Mayer y Kylling, 2015), junto con otros parámetros característicos de la atmósfera de la PSA, y se obtienen las transmitancias espectrales ($\tau_{\lambda}(SR)$) a distintos slant ranges (SR) o distancias heliostatos-receptor. Las transmitancias espectrales obtenidas con el código de transferencia radiativa son usadas en la Ec. (1) para obtener la transmitancia para cada slant range.

$$\tau(SR) = \frac{\int_{250}^{2500} \tau_{\lambda} \rho_{\lambda} G_{b\lambda} d\lambda}{\int_{250}^{2500} \rho_{\lambda} G_{b\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

Siendo ρ_{λ} , la reflectancia espectral obtenida a partir de una muestra de espejo de heliostato del campo CESA1 de la PSA, evaluada con un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda-UV-Vis-NIR, con un rango espectral de 250-2500 nm, y ponderada con la irradiancia solar estándar ASTM G173, masa de aire 1.5 (Ballestrín y Marzo, 2011). La irradiancia espectral directa utilizada, $G_{b\lambda}$, ha sido calculada para las condiciones atmosféricas de la PSA utilizando el software SMARTS (Gueymard, 1995) aplicando los resultados generados en el TAY.

Los niveles de transmitancia característicos obtenidos en la PSA se convierten en términos de extinción con la Ec. (2), obtenida de la Ley de Beer-Lambert-Bouguer.

$$Ext(\%) = 100(1 - \tau) \quad (2)$$

Con las extinciones se calcula un modelo para los niveles de extinción característicos de la PSA en función del slant range de la forma de la Ec. (3), que es la forma en que la mayoría de los códigos de diseño y funcionamiento de plantas de CSP de torre permiten introducir la extinción en su modelo (Blanco et al., 2005; Dobos et al., 2013; Blair et al., 2014).

$$Ext(\%) = d_1 SR^3 + d_2 SR^2 + d_3 SR + d_4 \quad (3)$$

CIEMAT AOT Extinction Methods: Satélite

Con el propósito de aplicar el AOT extinction method para determinar la extinción en cualquier lugar donde no haya una estación AERONET, se han calculado los niveles de extinción en la PSA utilizando datos de AOT de satélite en lugar de datos de AERONET. Los resultados de aplicar el AOT extinction method con datos de AOT de satélite se compararon con los resultados usando datos AOT de AERONET para validar la nueva metodología usando datos de satélite y saber si es posible aplicar la metodología para determinar los niveles de extinción en cualquier lugar con los datos de los satélites.

Los datos AOT de MERRA2 y MODIS se han recuperado utilizando la herramienta Giovanni data service (NASA,

2017). Giovanni es una web promovida por la NASA que proporciona una forma sencilla de visualizar, descargar y acceder a los datos de teledetección, en particular a los de satélites. Se han recuperado los mismos años de AOT de los satélites que los descargados de AERONET para realizar el TAY usado en el *AOT extinction method* (enero 2011-diciembre 2015). De esta forma se pueden comparar ambos métodos. Los datos descargados desde los tres satélites (MERRA 2, MODIS TERRA Y MODIS AQUA) han sido el AOT a 550 nm y el parámetro Ångström (470-870 nm para MERRA2 y 412-470 nm para MODIS), con un promedio horario diario, una resolución espacial de 0.5×0.6250 (1° para MODIS) y un área cuadrada correspondiente a la ubicación de la PSA (-2.45, 36.95, -2.26, 37.12). En el caso de MODIS, para ambos satélites, se han usado datos con el Deep Blue algorithm, Land only. Deep Blue es un algoritmo aplicado a las zonas brillantes. Para ello se han seleccionado los datos obtenidos donde sólo se aplica este algoritmo y sólo sobre tierra, ya que algunos estudios han demostrado que da mejores resultados (Remer et al., 2005). MERRA2 y MODIS sólo proporcionan AOT a una longitud de onda (550 nm). Para hacer el TAY como el generado con datos de AERONET, es necesario AOT a ocho longitudes de onda diferentes (1640 nm, 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm, 340 nm). Por ello se utiliza el parámetro Ångström (470-870 nm) de MERRA2 y (412-470 nm) de MODIS, siendo el AOT a las ocho diferentes longitudes de onda obtenidas por la Ec. (4), a partir de la ley de Ångström.

$$\frac{AOT_{\lambda}}{AOT_{\lambda_0}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\alpha} \quad (4)$$

Se obtiene un nuevo TAY con los datos de AOT obtenidos de los satélites, para los mismos años y las mismas longitudes de onda utilizadas en el TAY de los años de AERONET. A partir de este paso, se aplica el AOT extinction method de la misma forma que se ha explicado en el párrafo anterior hasta obtener un modelo de la extinción en función del slant range como el de la Ec. (3), para los niveles medios, máximos y mínimos de extinción para la PSA.

MÉTODOS CIEMAT-PSA: SISTEMA DE MEDIDA DE CÁMARAS (CIEMAT SYSTEM)

Tras conocer los niveles de extinción medios, máximos y mínimos característicos de la PSA, aplicando el AOT extinction method, se desarrolló un sistema de medida de extinción en la PSA. El sistema usa como sensores cámaras digitales con sensores CMOS, con un rango espectral de 400 a 1000 nm, con una incertidumbre de medida del 2% absoluto. El sistema mide en continuo extinción en la PSA cada minuto desde junio del 2017 hasta la actualidad (Ballestrín et al., 2018). El sistema de medida consiste en dos cámaras digitales a distintas distancias apuntando a una diana lambertiana pintada la mitad de blanco y la otra mitad de negro. Estos tres elementos del sistema están alineados a lo largo de la línea norte-sur de la PSA. Las cámaras digitales toman imágenes simultáneas de la diana a diferentes distancias utilizando dos sistemas ópticos idénticos (sensor, lente y filtro de la cámara digital). Los filtros de ambas cámaras se utilizan para evitar la saturación del sensor de la cámara, dejando pasar el 6% de la irradiancia. La distancia entre las cámaras es de 741.63 ± 0.01 metros, lo que es suficiente para detectar la extinción, según las simulaciones anteriores, (Ballestrín y Marzo, 2001; Carra et al., 2018). Las distancias entre las cámaras y el centro del objetivo son 82.88 ± 0.01 m y 824.51 ± 0.01 m respectivamente. Cada cámara cuenta con una lente de focal adecuada para que el área de diana proyectada por píxel sea similar en ambas cámaras (10 mm de diámetro aproximadamente), por lo que la matriz de valores generados para la imagen en ambas cámaras tienen la misma resolución espacial. Los niveles de intensidad de las imágenes digitales son proporcionales a la radiación solar proveniente de la diana, y la diferencia de intensidad entre las imágenes se debe a la extinción de la radiación solar en la trayectoria entre ambas cámaras, ya que la contaminación lumínica ambiente se elimina con la parte negra de la diana. La diana es lambertiana debido a que la posición de las cámaras y los ángulos relativos respecto a la diana nunca pueden ser conocidos con seguridad a tan grandes distancias. De esta manera, con una superficie difusora perfecta, una imagen del objetivo tomada desde cualquier ángulo de visión representará con precisión el mismo brillo o luminosidad (Ballestrín et al., 2018).

Tras dos años de medidas analizadas (Ballestrín et al., 2019; Carra et al., In Press), se ha observado que el CIEMAT system detecta episodios tales como días de calima elevada, proveniente del Norte de África y días de mucha humedad, registrando extinciones elevadas. Además, en días posteriores a lluvia, cuando la atmósfera queda limpia, se registran extinciones bajas. También se han observado patrones de extinción por estaciones en ambos años de medidas. En las estaciones cálidas como primavera y verano se registran mayores rangos de extinción que en el caso del invierno y la primavera. Esto es debido a que en la Cuenca del Mediterráneo, en las estaciones cálidas existe más cantidad de aerosoles marinos así como de aerosoles rurales (Benkhelifa et al., 2017). Que el CIEMAT system detecte todos estos episodios significa que el sistema da confianza en su medida, siendo capaz de detectar la extinción correctamente. Las medidas realizadas con el CIEMAT system son monitorizadas instantáneamente por primera vez en una sala de control de una planta CSP de torre, junto con el resto de variables meteorológicas de control.

RESULTADOS

Se ha utilizado un año de medidas de extinción realizadas con el CIEMAT system y se han calculado las extinciones media, máxima y mínima anuales de la misma forma que se calculan las medias y máximas en climatología. Estos valores de extinción han sido utilizados para compararlos con los obtenidos con el AOT extinction method, tanto con datos de AERONET como con datos de satélite aplicados al emplazamiento de la PSA. Esta comparación sirve para validar estas metodologías paramétricas con medidas reales realizadas por el sistema de cámaras (CIEMAT system). Para ello se han determinado las extinciones obtenidas con el AOT extinction method para la distancia a la que las cámaras miden extinción 741.63 m. Los resultados de las extinciones calculadas por las distintas metodologías CIEMAT-PSA se encuentran en la Fig. 1. En ella se puede observar que teniendo en cuenta las barras de error del sistema de medida, se verifica que los valores de extinción obtenidos por las distintas metodologías son coincidentes. Por lo tanto, de esta forma se valida el AOT extinction method para determinar los niveles medios, máximos y mínimos de extinción en cualquier emplazamiento, ya que los niveles determinados por esta metodología coinciden con las medidas realizadas por el sistema de dos cámaras CIEMAT system.

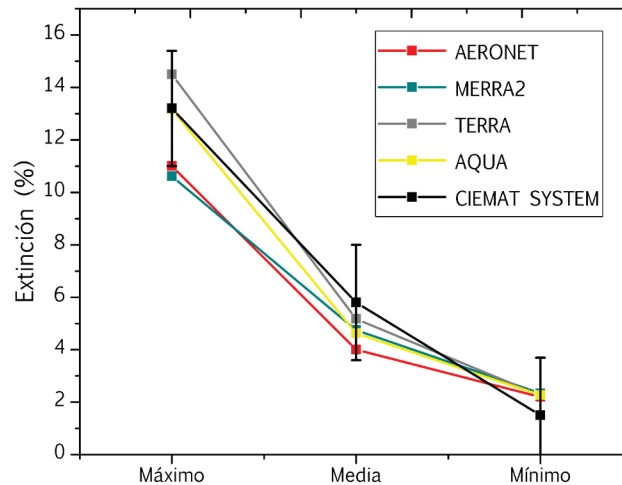


Fig. 1. Extinciones obtenidas por las distintas Metodologías CIEMAT. Validación del AOT Extinction Method con las medidas realizadas por el CIEMAT System (dos cámaras) (Carra et al., 2020).

Los niveles de extinción calculados para una distancia de 741.63 ± 0.01 m (distancia entre cámaras) con el AOT extinction method es de 4.0% del nivel medio. El valor medio de un año de extinción medido con el dispositivo experimental (CIEMAT system) a la misma distancia es de $5.8 \pm 2.2\%$ (Ballestrín et al., 2019), lo que valida el AOT extinction method (Carra et al., 2018), ya que los valores de extinción son coincidentes dentro de los márgenes de error. Los máximos medidos en la PSA son, 13.2% y 11.0% utilizando el AOT extinction method, refiriéndose este máximo al máximo más usual que se puede encontrar, no al máximo registrado. Por lo tanto, teniendo en cuenta el margen de error estadístico (2.2%), los valores máximos calculados en la PSA con el AOT extinction method y los medidos con el dispositivo experimental (CIEMAT system), ambos son coincidentes teniendo en cuenta los márgenes de error. Los valores mínimos calculados con el AOT extinction method dan un valor de extinción del 2.2%, y el obtenido con el CIEMAT system es un 1.5%, teniendo en cuenta el margen de error. Así pues, los datos obtenidos validan la metodología nuevamente.

Por otro lado, las extinciones a una distancia de 741.63 m calculadas con el modelo de MERRA2, TERRA y AQUA se expresan en la Tabla 1, donde se muestran las similitudes en los niveles obtenidos con las diferentes metodologías CIEMAT-PSA.

Tabla 1. Niveles de Extinción en la PSA obtenidos con las metodologías CIEMAT-PSA

	CIEMAT SYSTEM	AERONET	MERRA2	TERRA	AQUA
Media	5.80%	4.00%	4.75%	5.17%	4.63%
Máxima	13.20%	11.00%	10.61%	14.50%	13.17%
Mínima	1.50%	2.20%	2.34%	2.26%	2.27%

Además, en la Fig. 1 se muestran los valores medios, máximos y mínimos de extinción obtenidos en la PSA con las distintas metodologías CIEMAT-PSA donde se ven las diferencias entre el AOT extinction method y el CIEMAT system con sus márgenes de error. Se verifica que los niveles de extinción obtenidos de MERRA2, TERRA y AQUA están en línea con las medidas del CIEMAT system, teniendo en cuenta los márgenes de error. Por lo tanto, el AOT

extinction method utilizando datos AOT de estos satélites serían validados también, pudiendo ser utilizados para estimar los niveles de extinción en cualquier lugar, con la misma confianza que los niveles que se obtienen con el AOT extinction method usando datos de AERONET. Los datos de extinción obtenidos con MERRA2 son los que más se asemejan a los resultados de AERONET, ya que TERRA y el AQUA sobreestiman ligeramente los niveles de extinción, pero también han sido validados para ser utilizados para los fines descritos anteriormente, ya que las diferencias pueden ser despreciables.

CONCLUSIONES

La extinción atmosférica de la radiación solar es un problema que influye en el rendimiento de las plantas CSP de torre si no se tiene controlado. Existen dos tipos de valores de extinción necesarios, por un lado los niveles de extinción medios, máximos y mínimos anuales de un emplazamiento, necesarios para la búsqueda de emplazamientos óptimos para plantas CSP de torre. Por otro lado, es necesario medir extinción diaria y monitorizarla junto con el resto de variables meteorológicas de control para el correcto funcionamiento y rendimiento de las plantas CSP de torre, aumentando su eficiencia.

Con el objetivo de mitigar este problema, se han desarrollado las metodologías CIEMAT-PSA. El AOT extinction method se ha desarrollado para obtener los niveles de extinción solar que se pueden encontrar en un emplazamiento y para desarrollar posteriormente un sistema de medida adecuado que sea capaz de detectar estos niveles, así como para analizar nuevos emplazamientos óptimos. Basándose en los niveles de extinción de la PSA obtenidos tras aplicar el AOT extinction method, se desarrolló el sistema de medida de extinción en tiempo real en la PSA (CIEMAT system), seleccionando para ello un sensor capaz de detectar estos niveles esperados. A partir de los datos obtenidos en un año de medidas con el CIEMAT system se ha validado el AOT extinction method, ya que en la PSA se han obtenido los mismos resultados de extinción que los medidos por el sistema de cámaras CIEMAT. Por lo tanto, el AOT extinction method es válido para determinar la extinción en cualquier lugar donde haya una estación AERONET con suficientes datos de AOT.

A lo largo del Cinturón Solar hay sitios de interés para la CSP donde no se dispone de datos de AOT de ninguna estación AERONET. Por lo tanto, se ha desarrollado AOT extinction method, pero utilizando datos de AOT de MERRA2 y de los satélites MODIS AQUA y TERRA, que están disponibles para cualquier localización terrestre, en lugar de los de AERONET. Los resultados de la extinción obtenidos en PSA aplicando esta metodología con los datos de los satélites se han validado al compararlos con los resultados del AOT extinction method con datos de AERONET y también con la extinción obtenida con el CIEMAT system. Aunque existen diferencias en los datos AOT de las diferentes fuentes, las diferencias con la extinción calculada con ellas son reducidas. La extinción obtenida en la PSA con el método de medida de dos cámaras (CIEMAT system) es de $5.8 \pm 2.2\%$ a 741.63 ± 0.01 m. Con el AOT extinction method con datos de AERONET es del 4% a la misma distancia y con el AOT extinction method con datos de MERRA2, TERRA y AQUA a la misma distancia la extinción es de 4.75%, 5.17% y 4.63% respectivamente. Por lo tanto, los resultados coinciden con los del CIEMAT system dentro de los márgenes de error. Estos niveles de extinción indican que la PSA es un ambiente limpio con niveles bajos de contaminación de partículas, aunque con ciertos episodios puntuales detectados de polvo sahariano y con algunos cambios estacionales en los patrones de extinción.

Por todo ello, se puede concluir que las metodologías paramétricas propuestas para determinar los niveles de extinción en cualquier localización, utilizando datos de satélite y de AERONET han sido validadas en la PSA con el sistema de medida de cámaras (CIEMAT system). Aunque el AOT extinction method se ha aplicado en la PSA, los resultados de la validación indican que metodología podría aplicarse en cualquier lugar del mundo de interés para la CSP o con fines meteorológicos o climáticos. Las metodologías CIEMAT-PSA, permiten por tanto, obtener los niveles de extinción previstos con exactitud a nivel global de un emplazamiento por un lado, y obtener la extinción diaria en una planta CSP de torre con un error menor al 2% absoluto por otro, siendo la metodología de cámaras la mejor metodología de medida de extinción diaria que existe ahora mismo en el mercado y la de mayor fiabilidad. El AOT extinction method se aplicará a corto plazo en el desierto de Atacama (Chile) para el desarrollo de futuros trabajos, como por ejemplo la realización de un mapa de extinción del país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está incluido dentro del proyecto PRESOL (Predicción de la radiación solar en el receptor de una planta de energía solar) financiado por el Gobierno de España con fondos ERDF (ENE2014-59454-C3-1,2,3-R).

Los autores agradecen el generoso apoyo financiero de Innova Chile-CORFO, Código de Proyecto: 17BPE3-83761, y a CONICYT/FONDAP/ 15110019 “Solar Energy Research Center” SERC-Chile. También el trabajo ha sido financiado por el proyecto MINEDUC-UA, código ANT 1855.

Los autores también desean agradecer al principal investigador de la estación AERONET (Tabernas_PSA-DLR), PhD. Stefan Wilbert (DLR) por proporcionar datos de gran utilidad para la comunidad científica.

REFERENCIAS

- Ballestrín J., Marzo A. (2011). Solar radiation attenuation in solar tower plants. *Sol. Energy*, 388-392.
- Ballestrín J., Carra E., Monterreal R., Enrique R., Polo J., Fernández-Reche J., . . . Batlles F. (2019). One year of solar extinction measurements at PSA. Application to solar tower plant. *Renew. Energy*, (136), 1002-1011.
- Ballestrín J., Carra M. E., Enrique R., Monterreal R., Fernández-Reche J., Polo J., . . . Marzo A. (2018). Diagnosis of a Lambertian target in solar context. *Measurement*, 119, 265-269.
- Ballestrín J., Monterreal R., Carra E. (2016). Measurement of solar extinction in tower plants with digital cameras. *AIP Conference Proceedings*. 1734, 130002.
- Ballestrín J., Monterreal R., Carra M. E., Fernández-Reche J., Polo J., Enrique R., Marzo A. (2018). Solar extinction measurement system based on digital cameras. Application to solar tower plants. *Renew. Energy*, 125, 648-654.
- Benkhalifa J., Léon J. F., Chaabane M. (2017). Aerosol optical properties of Western Mediterranean basin from multi-year AERONET data. *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.*, 164, 222-228.
- Blair N., Dobos A., Freeman J., Neises T., Wagner M., Ferguson T., . . . Janzou S. (2014). System Advisor Model, SAM, 2014.1.14: General Description. Technical Report. Golden, USA: NREL/TP-6A20-61019.
- Blanco M., Amieva J., Mancilla A. (2005). The Tonatiuh software development project: AN open source approach to the simulation of solar concentrating systems. American Society of Mechanical Engineers.
- Carra, E., Ballestrín, J., Monterreal, R., Enrique, R., Polo, J., . . . Díaz, B. (In Press). Interannual variability analysis of atmospheric extinction levels of solar radiation at PSA. *Remote Sens. Environ.*
- Carra, E., Ballestrín, J., Polo, J., Barbero, J., Fernández-Reche, J. (2018). Atmospheric extinction levels of solar radiation at Plataforma Solar de Almería. Application to solar thermal electric plants. *Energy*, 145, 400-407.
- Carra E., Marzo A., Ballestrín J., Polo J., Barbero J., . . . Fernández-Reche J. (2020). Atmospheric extinction levels of solar radiation using AOT satellite data. Validation methodology with measurement system. *Renew. Energy*, 149, 1120-1132.
- Dobos A., Neises T., Wagner M. (2013). Advances in CSP Simulation Technology in the System Advisor Model. *Energy Procedia*, 49, págs. 2482–2489.
- Festa R., Ratto C. (1993). Proposal of a numerical procedure to select reference years. *Sol. Energy*, 50(1), 9-17.
- Finkelstein J., Schafer R. (1971). Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*, 58, 641–645.
- Gueymard C. (1995). SMARTS2, A simple model of the atmospheric Radiative Transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Clearlake Road, Cocoa, PL: Research Institute University of Central Florida.
- Hanrieder N., Sengupta M., Xie Y., Wilbert S., Pitz-Paal R. (2016). Modelling beam attenuation in solar tower plants using common DNI measurements. *Sol Energy*, 129, 244-255.
- Hanrieder N., Wilbert S., Pitz-Paal R., Emde C., Gasteiger J., Mayer B., Polo J. (2015). Atmospheric extinction in solar tower plants: absorption and broadband correction for MOR measurements. *AMT*, 8, 3467-3480.
- Holben B., Eck E., Slutsker I., Tanre D., Buis J., Setzer A., . . . Smirnov A. (1998). AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.*, 66, 1-16.
- NASA. (2017). <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/doc/UsersManualworkingdocument.docx.html>
- NASA. (01-08-2018) AERONET Tabernas_PSA-DLR. https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3
- Pitman C., Vant-Hull L. (1982). Atmospheric transmittance model for a solar beam propagating between an heliostat and a receiver. ASES progress in *Sol. Energy*, 1247-1251.

Polo J., Ballestrín J., Carra E. (2016). Sensitivity study for modelling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production. *Sol. Energy*, 134, 219-227.

Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanré D., Mattoo S., Chu D. A., Martins J. V., Holben B. N. (2005). The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, 62(4), 947-973.

Sengupta M., Wagner M. (2012). Atmospheric attenuation in central receiver systems from DNI measurements. *SolarPACES*. Marrakech.

Tahboub Z., Oumbe Z., Hassar Z., Obaidli A. (2014). Modelling of irradiance attenuation from a heliostat to the receiver of a solar central tower. *Energy Procedia*, 49, 2405-2413.

Vignola F., McDaniels K. (1993). Value of long-term solar radiation data. *Proceedings of the Solar '93 Conference*, American Solar Energy Society. Boulder, CO: American Solar Energy Society (ASES).

Vittitoe C., Biggs G. (1978). *Terrestrial propagation loss*. Denver: Sandia Release.

Wilcox S., Marion W. (2008). *User's manual for TMY3 Data Sets*. Technical Report NREL/TP-581-43156.

Willis R., Aid C., Green, A., Greenpeace, RSPB, WWF. (2014). *Paris 2015: getting a global agreement on climate change*. London: Green Alliance.