

VERIFICACIÓN de PREDICCIONES a CORTO PLAZO de ENERGÍA SOLAR mediante DATOS de PIRANÓMETROS y OBSERVACIONES de SATÉLITE

Carlos Geijo Guerrero⁽¹⁾, Bartolomé Orfila Estrada⁽²⁾.

⁽¹⁾ Instituto Nacional Meteorología, Leonardo Prieto Castro, 28071 Madrid, cgeijo@inm.es

⁽²⁾ Instituto Nacional Meteorología, Leonardo Prieto Castro, 28071 Madrid, orfila@inm.es

RESUMEN

La predicción de mapas de energía solar es compleja debido a la dificultad de simular con suficiente precisión y exactitud los diferentes procesos físicos que modulan la cantidad de irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre (e.g., nubosidad). En este trabajo se lleva a cabo una primera evaluación del potencial predictivo a corto plazo (+72 horas) y resolución espacial de 0.2 grados de esta irradiancia mediante el modelo HIRLAM⁽¹⁾ (High Resolution Limited Area Model) de predicción del estado atmosférico utilizado actualmente con carácter operativo por el INM⁽²⁾ (Instituto Nacional de Meteorología). El ejercicio de verificación ha comprendido varios meses con climatología claramente dispar (Agosto, Octubre 2005 y Diciembre - Enero 2006) y ha utilizado dos fuentes diferentes y complementarias de datos de irradiancia solar: mediciones de piranómetros de estaciones de la red radiométrica del INM y estimaciones derivadas de imágenes de satélite generadas por el consorcio europeo CM-SAF⁽³⁾ (Climate Monitoring Satellite Applications Facility) para la explotación de datos satelitales en el ámbito de la observación del clima. Los resultados obtenidos muestran que el sistema HIRLAM ofrece un nivel cierto de predecibilidad, con valores típicos para el coeficiente de correlación entre valores previstos y medidas de piranómetro de irradiancia acumulada en 48 horas entre 0.8 y 0.9. El ECM es del orden del 20 % sobre el valor medio mensual. Los resultados para Enero 2006 son sensiblemente peores (0.7-0.8 y 30 % respectivamente). El análisis de estos resultados muestra así mismo la existencia de errores sistemáticos y efectos generados por el ruido del sistema que deben tenerse en cuenta a la hora de hacer un uso óptimo de esta información.

MOTIVACIÓN

Desde hace ya tiempo las posibilidades de aprovechar la energía procedente del Sol que llega a la superficie terrestre en forma de radiación han suscitado gran interés y expectativas. Venciendo importantes problemas tecnológicos y económicos,

esta forma de energía va encontrando un lugar en el panel de fuentes de suministro energético utilizadas actualmente por la Humanidad. Cabe esperar que a lo largo de los próximos años la Energía Solar adquiera más relevancia y en este contexto cabe esperar igualmente que una predicción de la cantidad disponible de esta energía prevista a un plazo de varios días resulte igualmente de valor.

Esta comunicación describe algunos ejercicios de verificación llevados a cabo recientemente en el INM con objeto de estimar objetivamente la calidad de la predicción de mapas de irradiancia solar (IS) mediante el modelo de simulación por ordenador de la evolución del estado atmosférico HIRLAM, el cual forma parte del sistema de predicción operativa actualmente utilizado por el INM. Es bien sabido que una descripción correcta de los procesos físicos de transferencia de radiación en la atmósfera es esencial para poder realizar simulaciones meteorológicas y climatológicas útiles (por ejemplo desde el punto de vista de la predicción meteorológica), y por ello la verificación de estos cálculos numéricos tiene igualmente un gran interés para el desarrollo y perfeccionamiento de los algoritmos que los generan.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Para esta verificación se han empleado datos IS procedentes de la red de piranómetros del INM y también estimaciones indirectas de este parámetro a partir de datos de satélite, en concreto, estimaciones derivadas a partir de datos MSG (Meteosat Second Generation). Los piranómetros utilizados están catalogados y son calibrados y operados de acuerdo al "secondary standard" especificado por la OMM (el mejor de los tres estándares recogidos en su clasificación de piranómetros operativos). Debido a la multitud de efectos a considerar al analizar su funcionamiento, resulta ciertamente difícil determinar con precisión la exactitud de sus medidas. Es habitual asumir un margen de error relativo del 5%. Las estimaciones generadas a partir de datos MSG se basan en la relación inversa que existe entre reflectancia y transmitancia atmosférica

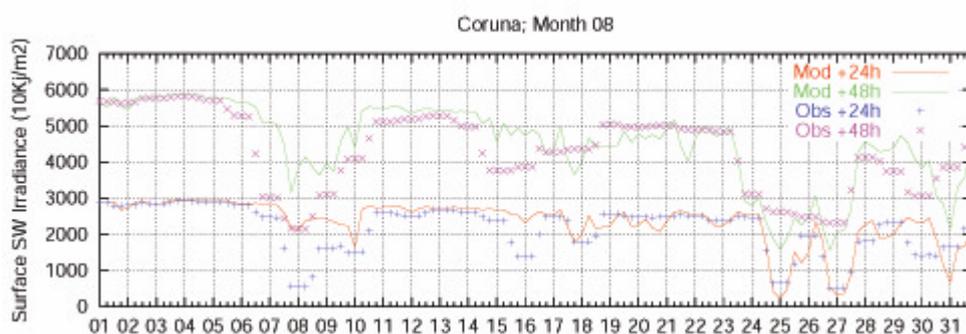


Figura 1. Serie temporal de predicciones (líneas) y datos verificantes (puntos) para La Coruña Agosto 2005

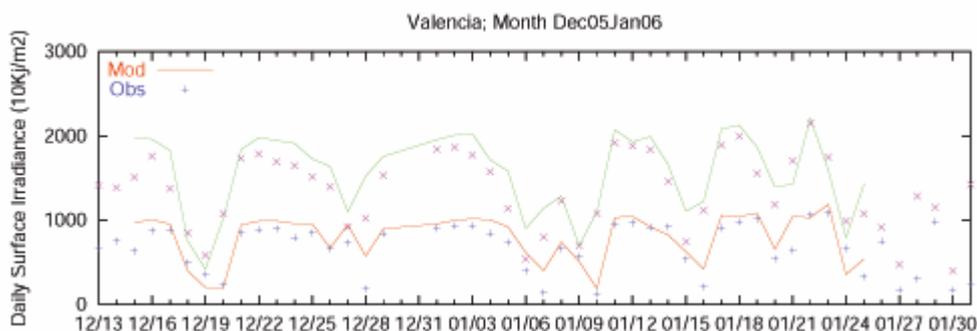


Figura 2. Igual que la figura 1 pero para Valencia durante Diciembre 2005 - Enero 2006.

en el rango espectral de la radiación solar. Numerosas verificaciones llevadas a cabo mediante comparación con datos de piranómetro indican una dispersión aleatoria entre ambos del orden 10 W/m² en la media mensual (e.g. CM-SAF web site).

La verificación del modelo HIRLAM ha cubierto un periodo de aproximadamente tres periodos (Agosto 05, Octubre 05 y Diciembre-Enero 06) lo cual ha hecho posible llevar a cabo un primer análisis de la modulación estacional en la calidad de las predicciones de IS. Los datos procedentes de los piranómetros fueron sometidos a algunos controles de calidad. Solo estaciones sin lagunas durante el mes relevante se consideraron. Se analizaron las series temporales de medidas de IS y de irradiancia en el limite superior de la atmósfera para cada caso y cuando se detectaron inconsistencias obvias se descartó la totalidad de la serie. Con objeto de minimizar errores aleatorios, tanto los datos recogidos por los piranómetros como las estimaciones satelitales se convirtieron a sumas diarias que es el parámetro básico de estas comparaciones (estas sumas se dan en decenas de KJ/m², aunque frecuentemente se dan promedios temporales en W/m², donde el intervalo temporal sobre el que se promedia comprende tanto horas diurnas como nocturnas). La resolución espacial nominal de los mapas satelitales empleados en la verificación es del orden de 15 km., comparable a

los 0.2 grados de resolución de las simulaciones. Los mapas que se presentan más abajo han sido interpolados a un grid común de 0.1 grados de resolución.

La configuración del sistema HIRLAM empleada en este trabajo difiere de la utilizada en el “dia-a-dia” en algunos aspectos importantes (esencialmente condiciones de contorno y análisis) por lo cual cabe esperar que los resultados correspondientes a la información que eventualmente pudiera ser suministrada en “tiempo real” sean algo diferentes a los presentados en esta comunicación. En cualquier caso, la configuración aquí empleada tiene la ventaja de enfocar la atención sobre el aspecto central a este estudio, es decir, la calidad de la parametrización en el modelo de los procesos de transferencia de radiación en onda corta y también la ventaja de permitir integraciones largas (de hasta 7 días) que hacen posible explorar aspectos de predecibilidad que no son accesibles con las integraciones más cortas (hasta 3 días) de la configuración operativa.

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las series temporales que muestran las figuras 1 y 2 dan una primera impresión de la calidad de la información que estamos manejando. Corresponden a dos estaciones y dos épocas del año claramente distintos (salvo quizá .

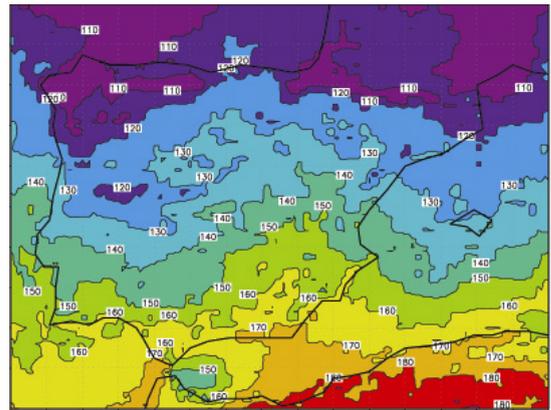
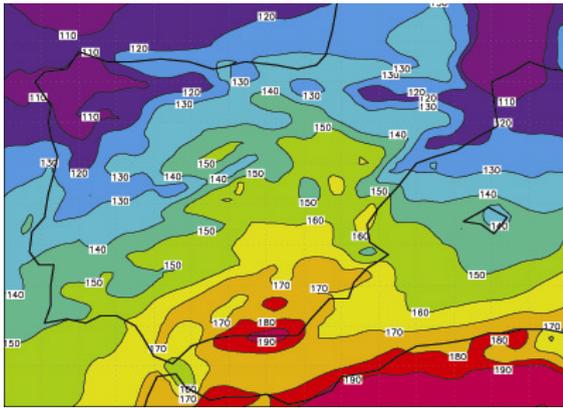


Figura 3. Mapas de IS en promedio para Octubre 2005 generados a partir de predicciones D+2 (izda) y el mapa verificante obtenido de datos de satélite (dcha).

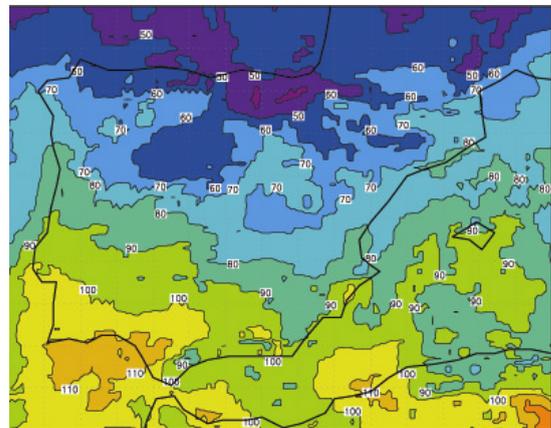
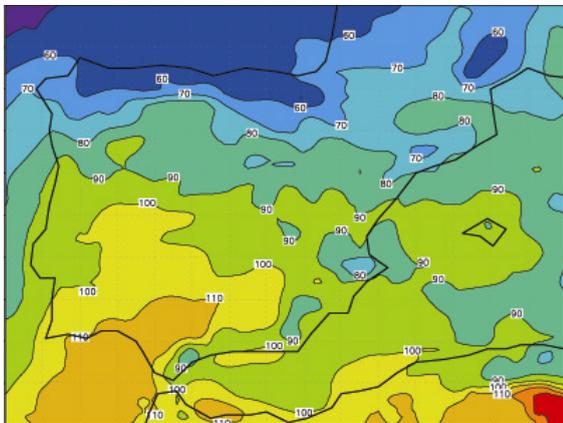


Figura 4 Igual que la figura 3 pero para Enero 2006.

por el hecho de ser dos estaciones costeras: Coruña Agosto 2005 y Valencia Diciembre-Enero 2006. Los gráficos muestran los valores (simulados y reales) de energía recibida en 24 horas sobre una superficie horizontal durante las primeras 24 horas (curva y puntos inferiores, respectivamente) y las primeras 48 horas (curva y puntos superiores, respectivamente) de cada integración. Aunque se advierte ya la existencia de algunos casos dispares, la marcha de líneas y puntos indica claramente la existencia de correlación entre predicciones y observaciones.

También es posible efectuar una primera valoración sobre la capacidad del modelo para reproducir la estructura espacial de los campos de IS mediante su comparación con los campos estimados de IS a partir de datos de satélite. Las figuras 3 y 4 muestran la distribución sobre la Península Ibérica y zonas próximas del valor medio mensual para los meses de Octubre 2005 y Enero 2006 respectivamente (izquierda predicción a 48 horas, derecha satélite). En el caso de Octubre las predicciones sobrestiman en unos 10-20 W/m² este valor medio en prácticamente la totalidad del área

de interés, sin embargo, está claro que el modelo ha sido capaz de reproducir la estructura espacial del campo de IS (bastante compleja) con notable fidelidad. En el caso de Enero la diferencia más notoria corresponde a las zonas de la Meseta del Duero y Valle del Ebro donde la persistencia de nieblas no reproducidas por el modelo induce discrepancias del orden de 30-40 W/m² en el valor medio mensual. En el resto de las zonas la correspondencia (tanto en términos de valores absolutos como de su distribución espacial) entre predicciones y valores verificantes es bastante mejor. Estas primeras valoraciones permiten pues claramente extraer algunas conclusiones en lo que respecta al impacto de la climatología característica de zonas específicas en la verificación de estos mapas de IS.

Podemos elaborar algo más estas conclusiones mediante un análisis más detallado de los datos generados durante el ejercicio de verificación. La siguiente figura (número 5) muestra los histogramas para la predicción de irradiancia en 24 horas a D+2 y para las correspondientes observaciones piranométricas, para los meses

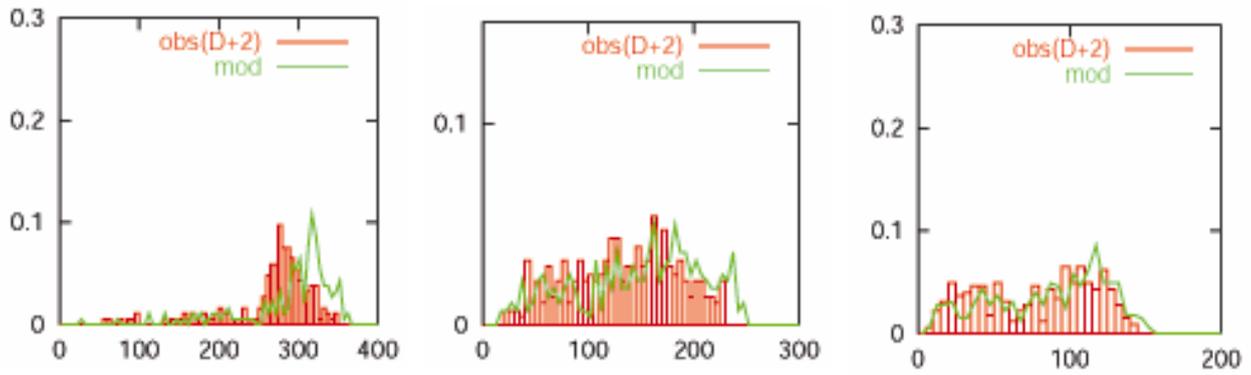


Figura 5. Histogramas de valores IS simulados (verde) y medidos(rojo) correspondientes a Agosto 05 (izda), Octubre 05 (centro) y Enero 06 (derecha).

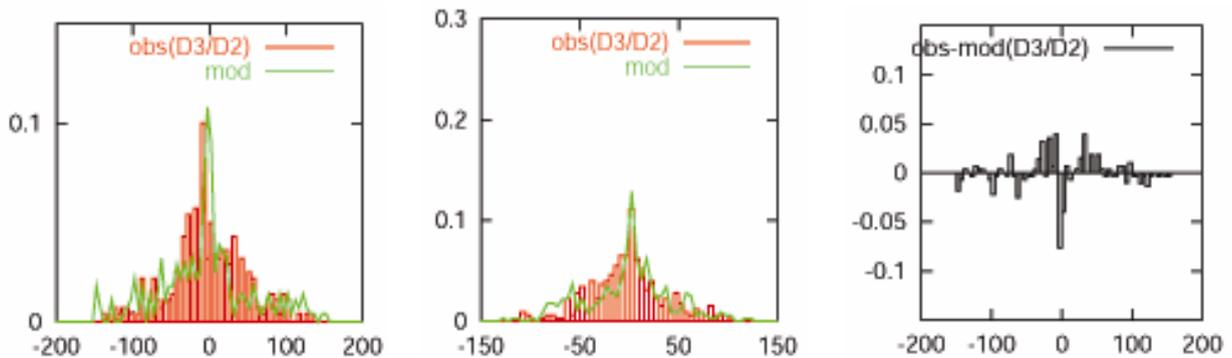


Figura 6 Histogramas de diferencias $D+3/D+2$ (ver texto) de IS simulados (verde) y medidas (rojo) correspondientes a Octubre 05 (izda) y Enero 06 (centro). A la derecha aparece la diferencia de histogramas para Octubre 05.

de Agosto 05, Octubre05 y Enero06. El rango de valores calculados compara bien con el rango de valores medidos, sin embargo, el exceso de frecuencias en el extremo derecho del histograma (Octubre05 y sobre todo Agosto 05), es decir, para las situaciones correspondientes a cielos despejados o con poca nubosidad, indica sin lugar a dudas que la transmisividad en cielo despejado calculada por el modelo es demasiado alta y esto origina la aparición de un error sistemático que presenta a su vez una componente estacional. El sesgo en irradiancia es del orden de +25 W/m² en Agosto 05, +15 W/m² en Octubre 05, y +10 W/m² para Diciembre 05 y Enero 06, e independiente del alcance de la predicción (no mostrado), es decir, estos resultados no indican presencia de “deriva” en el modelo.

También puede ser interesante verificar la capacidad del modelo para reproducir los cambios observados en IS diaria entre días consecutivos, es decir, verificar las “diferencias a primer orden”. La variabilidad entre días dada por el modelo es comparable e incluso algo mayor que la constatada por las observaciones. Este punto es ilustrado por la siguiente figura (número 6) que muestra los histogramas de las mencionadas diferencias (entre

los alcances D+3 y D+2) para los meses de Octubre 05 y Enero 06 (los resultados para Agosto 05 no están disponibles porque para este mes solo se hicieron integraciones hasta D+2). El cociente s_{obs} / s_{mod} es 49 / 59 y 38 / 43 respectivamente. Haciendo las comprobaciones hasta diferencias entre D+7 y D+6 se llega al mismo resultado (49/62, 50/63, 50/58 y 50/58 para Octubre 05 y 40/39, 42/43 , 43/42 y 42/41 para Enero 06 respectivamente). La inspección de los histogramas de la figura indica cual es la razón de esta sobreestimación de la varianza. La distribución de los valores calculados (en verde) tiene más peso en los extremos que en el centro en comparación con la distribución de los valores observados (en rojo). Es decir, en el modelo parece estar operando algún mecanismo de “umbral” que amortigua pequeñas tendencias y en cambio amplifica aquellas que sobrepasan un cierto valor límite. Con todo, este efecto es moderado, particularmente en el caso de Enero 06. Esto sugiere que el sesgo observado anteriormente para situaciones de cielo despejado puede ser en parte también responsable de esta inflación de varianza al extender artificialmente, como puede verse en la figura 5, el rango de valores generados por el modelo y de este

modo hacer mayor el “momento de inercia” del histograma.

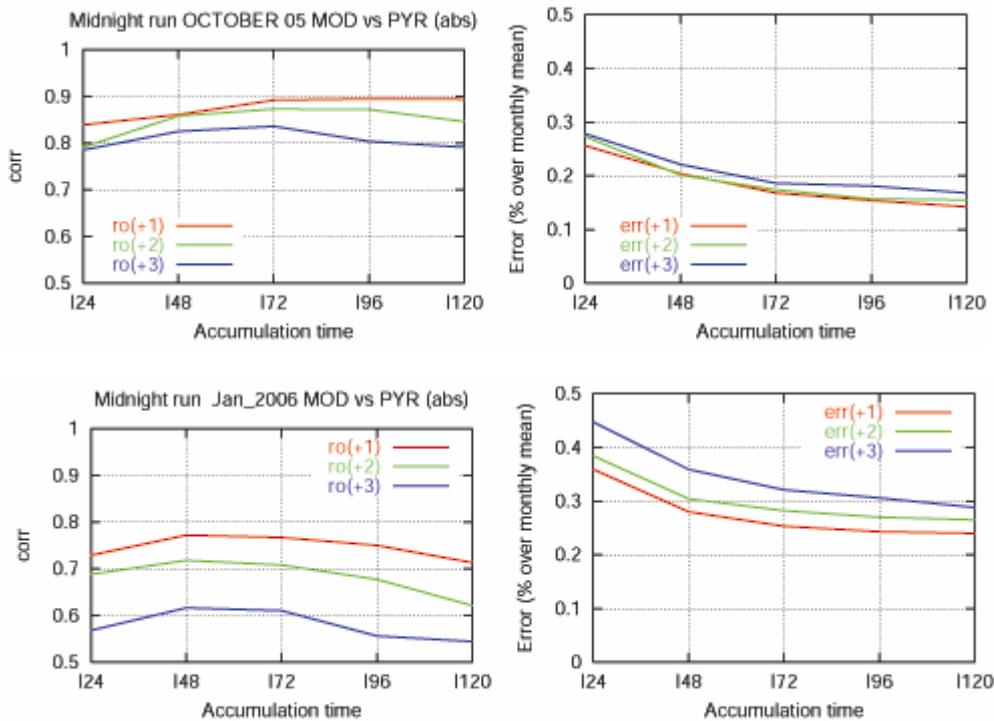


Figura 7. Curvas de parámetros de verificación (coeficiente de correlación lineal a la izda y error aleatorio a la dcha) como función del intervalo de acumulación (ver texto). Las curvas de diferentes colores corresponden a diferentes alcances de la predicción. El panel superior es para Octubre 05 y el inferior para Enero 06.

Habiendo discutido las diferencias entre las distribuciones de valores generados por la computadora y aquellos generados por el piranómetro, podemos pasar a analizar como comparan estos valores cuando se ordenan según su secuencia temporal, es decir, cuando los agrupamos por pares. El cálculo de estadísticos bien conocidos que nos permiten medir el “error” aleatorio y la correlación lineal entre predicciones y verificaciones es entonces inmediato. Al hablar de “error” no debe olvidarse que las observaciones están también sujetas a error, y que un piranómetro y un valor de rejilla en un modelo no se supone que representan exactamente el mismo parámetro. La figura 7 muestra en la parte superior los resultados correspondientes a Octubre 05 y en la inferior los correspondientes a Enero 06. En la izquierda tenemos las curvas que dan el coeficiente de correlación para diferentes alcances de la predicción (D+1 rojo, D+2 verde, D+3 azul) como función del periodo de acumulación de irradiancia (eje x), es decir, estas gráficas muestran los parámetros de verificación no sólo para la irradiancia diaria (I24) sino también para irradiancia acumulada en dos días (I48), tres días (I72), etc... A la derecha tenemos, en el mismo formato, las curvas de verificación para el ECM expresado como porcentaje del valor medio mensual medido. Vemos que en el caso de Octubre el coeficiente de correlación para la irradiancia diaria (I24) está alrededor o ligeramente por encima

de 0.8 para predicciones de hasta D+3 con errores en torno al 25% (35 W/m²). Si consideramos las predicciones para valores medios en dos días (I48) vemos que los parámetros de verificación arrojan mejores resultados, con correlación claramente por encima de 0.8 hasta D+3 y errores entorno al 20%. De hecho, las curvas de correlación a D+1 y D+2 (rojo y verde respectivamente) crecen monótonamente con el periodo de acumulación. La razón de que esto ocurra puede entenderse expresando el valor del coeficiente de correlación de una suma en términos de los valores de los coeficientes de correlación entre los sumandos. Aparecen unos términos cruzados que darán contribución positiva cuando las predicciones y las observaciones desfasadas (lag +1 para I48) presenten covarianza positiva y contribución negativa en caso contrario. En otras palabras, que esas curvas sean monótonamente crecientes indica que la serie de irradiancia diaria medida por los piranómetros durante este mes de Octubre muestra una significativa correlación entre valores de un día y los correspondientes a días inmediatamente anteriores y posteriores (es decir, presenta autocorrelación). Esta situación se da también al considerar otros parámetros que pueden expresarse como sumas sobre un intervalo de tiempo dado, por ejemplo, precipitaciones. La verificación de precipitación para situaciones sinópticas que producen lluvias “a gran escala” da mejores resultados al considerar cantidades.

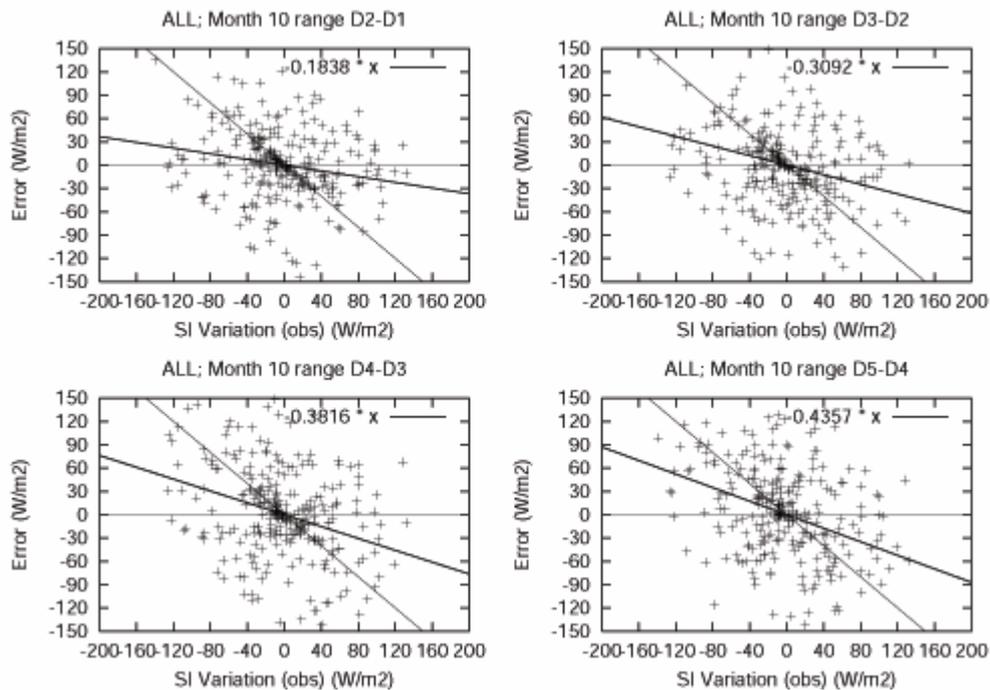


Figura 8. Distribución del error en la diferencia prevista de IS para días consecutivos para diferentes alcances de la predicción (D2/D1 arriba a la izda, D3/D2 arriba a la dcha, D4/D3 abajo a la izda y D5/D4 abajo a la dcha) como función del valor observado. El panel corresponde al mes de Octubre 05.

acumuladas. Por supuesto, el precio a pagar es el de predicciones menos precisas. Digamos pues que el aspecto de las curvas de correlación mostradas en la figura que se comenta nos da una idea de lo “fácil” que puede ser la predicción. En cuanto a las curvas de errores de la derecha, el aspecto decreciente que muestran es una consecuencia de la cancelación de errores aleatorios que tiene lugar al promediar. Debido a la existencia de esta auto-correlación en los parámetros meteorológicos que se acaban de mencionar, el ritmo de decrecimiento del error aleatorio con el periodo de promediado es menor que el que daría la ley $1/\sqrt{n}$, como efectivamente puede comprobarse. La discusión de las curvas correspondientes al mes de Enero (panel inferior) puede seguir los mismos pasos. El coeficiente de correlación lineal para irradiancia diaria resulta ser en este caso 0.73 (D+1) y cae hasta 0.6 para D+3. El error aleatorio supone un 35% del valor mensual medido (27 W/m²) y se incrementa hasta algo más del 40 % para D+3. El aspecto de las curvas de correlación ya no es el mismo (máximo para I48) lo cual sugiere que la predicción en meses de invierno es intrínsecamente más “difícil”.

Un test de verificación más exigente que el que compara pares de valores previstos y observados es aquél que compara parejas de “tendencias” o “diferencias de primer orden” previstas y observadas. Una serie de diferencias tiene, en relación con la serie de valores que la origina, una estructura espectral con mayor peso relativo de

frecuencias altas, es decir, su función de auto-covarianza cae más pronunciadamente al incrementar el “lag” que la función de auto-covarianza de la serie originaria (digamos de “diferencias a orden cero”). Agrupemos entonces, igual que hicimos para los valores absolutos, las tendencias observadas y simuladas en pares y analicemos los resultados. Las dos últimas figuras de esta comunicación (números 8 y 9) presentan la distribución de errores como función del valor observado para las diferencias en irradiancia diaria D+2-D+1, D+3-D+2, D+4-D+3 y D+5-D+4 para los meses de Octubre 05 y Enero 06. Sobre las nubes de puntos se han dibujado las curvas de regresión. Vemos que estas rectas pasan por el origen lo cual indica la no presencia de errores sistemáticos, resultado consistente con la no existencia de deriva ya apuntada más arriba. Vemos igualmente que esta recta gira en sentido de las agujas del reloj al incrementar el alcance de la predicción, lo cual tiene una sencilla interpretación. La recta de pendiente -1 en estos gráficos corresponde al lugar donde se agruparían los puntos en el supuesto de un modelo “demasiado persistente”, es decir, un modelo incapaz de prever situaciones de cambio. La recta de pendiente 0 (eje horizontal) correspondería a la situación óptima y la recta de pendiente +1 correspondería a un modelo que amplificase (en un factor 2) los cambios efectivamente ocurridos. Si denominamos por “índice de error de persistencia” el valor de la

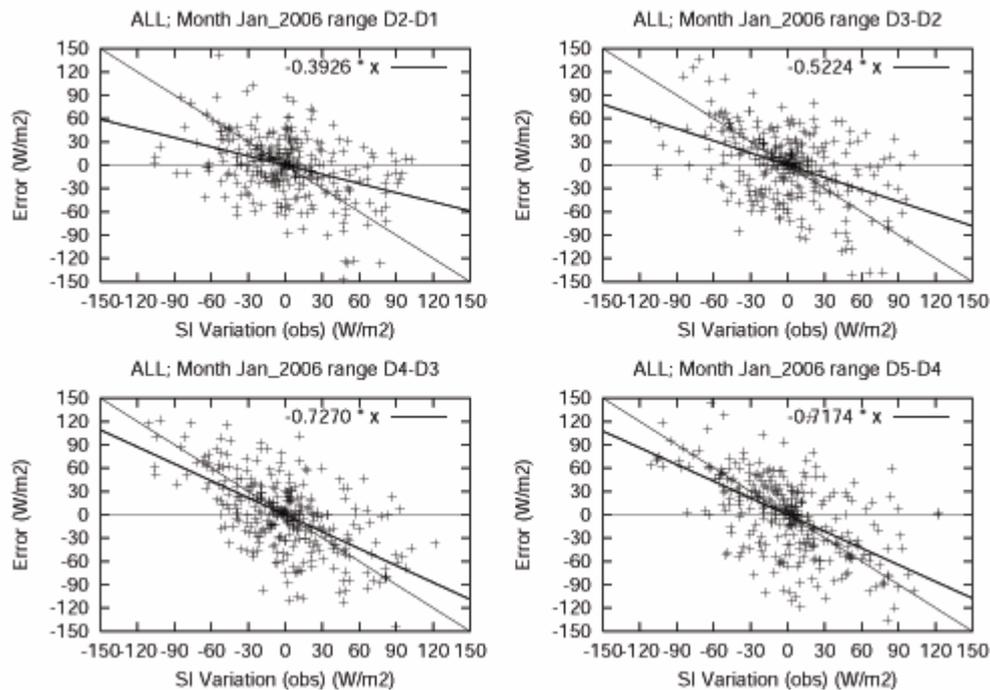


Figura 9. Igual que la figura 8 pero para el mes de Enero 2006.

de variación [0- óptimo, 1-muy persistente] podemos decir que para el mes de Octubre este error crece con el alcance de la predicción según la secuencia 0.18, 0.31, 0.38, y 0.43; mientras que para el caso de Enero estudiado tenemos 0.39, 0.52, 0.72 y 0.71.

CONCLUSIONES

El sistema de predicción del estado atmosférico HIRLAM, que actualmente forma parte del sistema de predicción operativa del INM, posee capacidad

predictiva de campos de irradiancia solar (IS). El ejercicio de verificación llevado a cabo utilizando datos de la Red Radiométrica Nacional operada por el INM y productos derivados de datos de satélite, ha permitido una primera caracterización cuantitativa y cualitativa de la calidad de estas predicciones. Los resultados de este ejercicio pueden resumirse en la siguiente tabla que presenta los valores de una serie de estadísticos básicos para las diferencias entre predicciones y medidas piranométricas de irradiancia en 24 horas.

	<i>Agosto 05</i>			<i>Octubre 05</i>			<i>Diciembre 05</i>			<i>Enero 06</i>		
	Sesgo	Corr.	Stde	Sesgo	Corr.	Stde	Sesgo	Corr.	Stde	Sesgo	Corr.	Stde
	W/m2		W/m2	W/m		W/m2	W/m2		W/m2	W/m2		W/m2
D+1	+29	0.76	40	+16	0.83	34	+8	0.81	20	+9	0.73	27
D+2	+25	0.75	40	+15	0.79	37	+8	0.75	22	+8	0.68	29
D+3				+13	0.78	37	+9	0.66	26	+8	0.56	34

Los valores correspondientes a predicciones de irradiancia en 48 horas comparan mejor con las observaciones que las correspondientes predicciones para irradiancia en 24 horas a expensas de una pérdida de precisión. La ocurrencia de fenómenos meteorológicos característicos de determinadas zonas geográficas en determinadas épocas del año con un importante efecto modulador sobre el campo de IS (e.g., nieblas invernales en el interior de la Península), y que resultan difíciles de

reproducir con exactitud por los modelos, pueden originar importantes errores en las predicciones.

Los resultados hechos públicos en esta comunicación no corresponden a una configuración de HIRLAM operativa, por lo cual cabe esperar que la calidad de la información eventualmente disponible en “tiempo real” difiera algo de la aquí presentada.

Este trabajo también ha servido para conocer mejor la manera en la cual el modelo representa los fenómenos de transferencia radiativa y algunas conclusiones son:

a) Existencia de un claro sesgo en la transmitancia en cielo despejado de onda corta. Este problema, de hecho, ya ha sido identificado anteriormente en otros algoritmos similares a los empleados por HIRLAM en el contexto del estudio del comportamiento de otros modelos y parece ser debido a inexactitudes en la especificación de la absorción de onda corta en el infra-rojo cercano por vapor de agua.

b) Existencia de un significativo efecto de “spin-up” (no discutido en el texto) originado por el tiempo que necesita el modelo para desarrollar un campo de nubosidad a partir de un análisis donde la nubosidad no forma parte del conjunto de las variables de control. Este efecto es más pronunciado en condiciones de fuerte insolación (meses estivales, pasadas de mediodía) y también sobre superficies oceánicas. Esta última característica parece estar relacionada con la parametrización de la convección somera en la PBL oceánica.

c) Se ha detectado igualmente un desacuerdo entre las distribuciones de valores simulados y reales de diferencias de IS para días consecutivos. El modelo tiende a generar más valores extremos que los que de hecho constatan las observaciones. Se supone que este comportamiento debe estar relacionado con la manera en la cual el modelo genera nubes, un mecanismo de umbral que inhibe incrementos de nubosidad progresivos y favorece en cambio transiciones abruptas.

REFERENCIAS

- (1) <http://hirlam.knmi.nl>
- (2) <http://www.inm.es>
- (3) <http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/int/CM-SAF/index.htm>