

METODOS DE OBTENCION DE LA RADIACION SOLAR
MEDIANTE TELEDETECCION:
ORBITA POLAR vs ORBITA GEOESTACIONARIA.

Pablo J. Zarco¹, Fco. Ariza², Rafael López³

¹ Ingeniero Agrónomo. *Grupo de Investigación en Energías y Recursos Renovables (GIERR)*-Universidad de Córdoba (España). Estudiante de Postgrado en el '*MSc in Remote Sensing, Image Processing and Applications*', APEME, University of Dundee, Escocia (Gran Bretaña). E-mail: st2zatep@lucano.uco.es

² Dr. Ingeniero Agrónomo. Profesor Titular Departamento de Cartografía, Fotogrametría y Geodesia, Escuela Técnica Superior Ingeniería Cartográfica - Universidad de Jaén (España). *Grupo de Investigación en Energías y Recursos Renovables (GIERR)*-Universidad de Córdoba (España).

³ Dr. Ingeniero Agrónomo. Profesor Titular Departamento de Física Aplicada - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. *Grupo de Investigación en Energías y Recursos Renovables (GIERR)*-Universidad de Córdoba (España).

1. INTRODUCCION

El método de obtención de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre se ha basado tradicionalmente en la utilización de piranómetros distribuidos sobre la misma. Pese a que la estructura de la red piranométrica se está viendo sensiblemente aumentada en países desarrollados, en Europa la distancia media entre estaciones no suele ser menor de 100 km. En países en vías de desarrollo su existencia es prácticamente nula.

La utilización de la teledetección para dicho fin aporta ventajas imposibles de alcanzar por el método tradicional, al obtenerse valores de radiación uniforme y espacialmente distribuidos por la superficie de estudio.

Los primeros trabajos relacionados con la obtención de la radiación solar incidente mediante teledetección se basan en satélites geoestacionarios, gracias a la gran cantidad de imágenes obtenidas por día, del orden de una imagen integrada cada 30 minutos en el caso del satélite europeo METEOSAT, o cada 60 minutos en el caso del satélite americano GOES. Dichos sensores, sin embargo, plantean problemas de detalle para determinados estudios debido a su baja resolución espacial, del orden de 2.5-5 km. en el nadir.

Los satélites de órbita polar, por ejemplo TIROS-NOAA, han sido hasta la fecha desestimados para tal fin debido a su baja resolución temporal, dos imágenes por día aproximadamente. Sin embargo aportan excelentes características de resolución espacial (1.1 km), espectral (5 bandas) y radiométrica (1024 niveles).

El presente trabajo estudia la influencia de la resolución temporal de TIROS-NOAA para el objetivo comentado de obtener la radiación global incidente diaria, determinando si dicha distribución de eventos, variable a lo largo del año, hace inviable dicho fin.

La utilización de TIROS-NOAA, dadas sus magníficas características espaciales y espectrales, permitiría su uso en multitud de aplicaciones con un grado de precisión y nivel de detalle mayor que el obtenido hasta la fecha mediante METEOSAT o GOES. La distribución uniforme de la radiación solar sobre la superficie terrestre es un dato básico para multitud de aplicaciones agronómicas, como la estimación de la evapotranspiración en cultivos, con el consiguiente cálculo de las necesidades hídricas a aportar mediante el riego, estimación del crecimiento del cultivo, estimación de rendimientos de cosechas, etc, mediante combinación con otras variables e introducción en Sistemas de Información Geográfica.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la viabilidad de utilizar la serie de satélite TIROS-NOAA para obtener la radiación global incidente diaria. En concreto, conocer si la baja resolución temporal de dicha serie de satélites es suficiente para tal caracterización diaria o, por el contrario, influye de forma determinante haciendo inviable su uso para tal fin.

Los objetivos específicos necesarios para abordar tal fin son los siguientes:

1. Obtener un modelo orbital que permita estudiar la resolución temporal de TIROS-NOAA para largos períodos de tiempo y bajo diferentes restricciones de uso.
2. Estudiar el error del modelo orbital en predicciones de largo período, con objeto de conocer la fiabilidad y precisión de los datos obtenidos.
3. Estudiar la resolución temporal de cada uno de los satélites de la serie, y de todos juntos, mediante determinación del número de eventos por día y horario de pasada a lo largo del año.
4. Seleccionar aquellos eventos que pertenezcan al intervalo diario visible con objeto de eliminar todas aquellas pasadas no útiles para el estudio.
5. Estudiar estadísticamente el error inducido por la resolución temporal al estimar la radiación global diaria a partir de los valores instantáneos.

3. ANTECEDENTES

3.1. *Obtención de la Radiación mediante Teledetección*

Dentro de los usos de la teledetección espacial, la realización de modelos de radiación es una de las aplicaciones que primero tuvieron lugar (Fritz, 1964). Su uso, fuera ya de los ambientes de experimentación militar, no se inició hasta la década de los setenta (Quinn, 1971; Hiser, 1975). La etapa de madurez corresponde a la década de los ochenta (Hiser, 1980; Cano, 1986). El interés del uso de la teledetección espacial en los temas de radiación solar tiene dos razones fundamentales:

1. Las características propias de las redes de toma de datos de radiación
2. La comodidad y aptitud de los datos provenientes del satélite.

Como indica Cano (1986), si bien las estaciones con toma de datos de radiación están densificándose en los países desarrollados, en Europa la distancia media entre estaciones no suele ser menor de 100 km. Esto indica una cierta escasez espacial de datos de radiación. Los motivos pueden ser directos (complejidad del sensor y coste) o indirectos (no percibir el dato como importante), (Ariza, 1993).

Por otra parte, la disponibilidad en formato digital de los datos provenientes de satélite, así como su resolución –temporal, espectral y espacial– hacen de dichos datos unos elementos fundamentales para la planificación de los sistemas futuros de toma de datos de radiación solar (Ariza, 1993).

Los primeros intentos de utilizar datos de satélites para estimar la radiación solar incidente parten de trabajos realizados por el Departamento de Comercio de Estados Unidos (1971), Vonder Haar (1973) y Vonder Haar y Ellis (1975, 1979). Con tal objeto se desarrollaron dos grandes metodologías de estudio (Illera, 1989):

1. Métodos estadísticos
2. Métodos físicos

El primer método, formado por distintos modelos desarrollados entre 1978 y 1986, está basado en regresiones estadísticas entre el valor digital medido por el sensor del satélite, radiómetro, en un punto determinado, y los valores medidos en campo, mediante piranómetro, para ese mismo punto e instante (Noia, 1993).

Es el denominado método estadístico, y es el modelaje típico de caja negra (Ariza, 1994).

El segundo método está formado por distintos modelos fundamentalmente publicados entre 1980 y 1987, basados en modelos de transferencia de radiación (Noia, 1993). En ellos quedan descritos explícitamente los procesos que operan en el sistema atmosférico (absorción, dispersión, etc.). Son los denominados métodos físicos.

Los modelos estadísticos presentan gran simplicidad y facilidad de uso. Sin embargo, su relativa eficiencia operativa se ve penalizada por su falta de generalidad, ya que no hay garantías de que los coeficientes calculados mediante regresión para una zona concreta sean válidos para otra.

Por otro lado, los modelos físicos tienen la ventaja de que describen conceptualmente el estado de la atmósfera y, por lo tanto, no dependen de una zona concreta para poder ser usados. En cualquier caso, la consideración más importante debe ser que el mejor método a utilizar depende en gran medida del estado de la atmósfera y de las características de la zona estudiada (Noia, 1993). La Tabla 3.1 realiza un resumen comparativo de las características de ambos métodos.

Tabla 3.1
Comparación entre los métodos físicos y estadísticos

	ESTADÍSTICOS	FÍSICOS
VENTAJAS ⇒	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia operativa • No necesidad de datos meteorológicos • No necesidad de calibración 	<ul style="list-style-type: none"> • Generalidad • No necesidad de datos de radiación a nivel de superficie
DESVENTAJAS ⇒	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de datos de radiación a nivel de superficie • Falta de generalidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de datos meteorológicos • Necesidad de calibración

Fuente: Noia, 1993.

3.1.1 Base Física

La radiación solar extraterrestre incidente interacciona con gases, aerosoles y demás componentes de la atmósfera al penetrar en ella. Una parte de dicha radiación es reflejada al espacio exterior, otra parte es absorbida y el resto alcanza la superficie terrestre.

La radiación que alcanza la superficie terrestre interacciona con el suelo, de forma que una parte es absorbida mientras que el resto es reflejada hacia el espacio exterior. Por lo tanto, la radiación solar emergente desde la atmósfera está compuesta por la radiación solar reflejada por ella antes de llegar a la superficie terrestre, y por la reflejada por dicha superficie, tal y como se puede observar en la Figura 3.1.

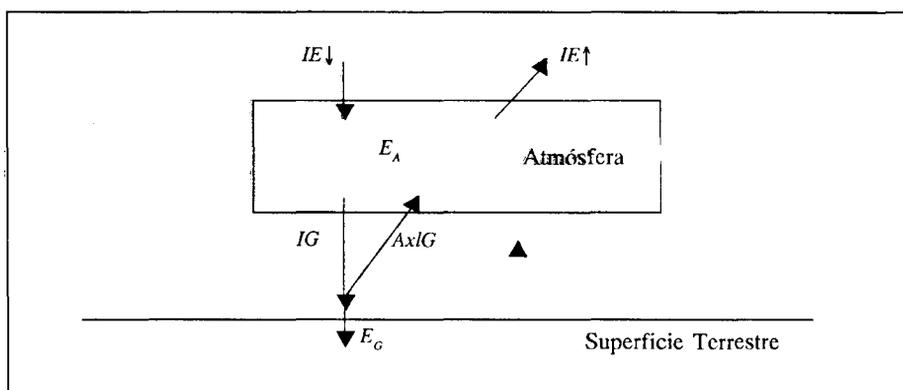


Fig. 3.1. Interacción de la radiación solar con la atmósfera y superficie terrestre.
Fuente: Noia, 1993

Considerando la ecuación de conservación de la energía en una columna superficie terrestre-atmósfera, se puede decir:

$$IE \downarrow = IE \uparrow + E_A + E_G \quad [1]$$

donde,

- $IE \downarrow$ Densidad de flujo de la radiación solar incidente sobre la atmósfera;
- $IE \uparrow$ Densidad de flujo de la radiación solar que emerge desde la atmósfera hacia el espacio exterior y que, por lo tanto, es la radiación medida por el satélite;
- E_A Fracción de $IE \downarrow$ absorbida por la atmósfera;
- E_G Fracción de $IE \downarrow$ absorbida por la superficie terrestre.

La radiación solar absorbida por la superficie terrestre puede ser expresada en función del albedo y de la radiación incidente sobre la superficie (IG):

$$E_G = IG(1 - A) \quad [1]$$

Sustituyendo la ecuación [2] en [1] y despejando IG , se obtiene:

$$IG = \frac{1}{1 - A} [IE\downarrow - IE\uparrow - E_A] \quad [3]$$

$IE\downarrow$ es función del ángulo cenital solar y de la distancia tierra-sol, y puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$IE = F_o \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \cdot \cos\theta \quad [4]$$

donde,

$$F_o \approx 1367 \text{ W/m}^2 \quad \text{Constante solar;}$$

r_o y r Respectivamente, la media y la actual distancia tierra-sol;

θ Angulo cenital solar.

Si fuera posible estimar E_A y conocer, a priori, el albedo A , la ecuación [3] podría ser utilizada para estimar IG a partir de valores de $IE\uparrow$ medidos por el radiómetro del satélite. Pero desafortunadamente el problema es más complejo ya que, por un lado, no es posible conocer el valor del albedo A para cada punto de la superficie estudiada y, por el otro, el valor de E_A es muy variable y dependiente de las condiciones atmosféricas.

Uno de los factores más importantes que afecta a la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre y a la radiación solar emergente desde la atmósfera, es la variación del ángulo cenital solar, y el correspondiente cambio de la masa de aire a través de la que la radiación solar se desplaza.

El segundo factor más importante es la presencia de nubes. La presencia de vapor de agua y partículas de hielo en las nubes incrementa fuertemente la absorción y reflexión de la radiación solar. Las variaciones de la concentración de vapor de agua y aerosoles en la atmósfera pueden ser consideradas como efectos de segundo orden sobre la insolación (Noia, 1993).

3.1.2 Métodos Estadísticos

Los métodos estadísticos están basados en regresiones entre los valores digitales medidos por el sensor del satélite en puntos determinados, y los valores medidos en campo para esos mismos puntos e instantes. Esta relación obtenida se considera válida y posteriormente es utilizada para estimar la irradiación solar a nivel de superficie terrestre en toda la región de estudio a partir de los datos del satélite.

Existen numerosos métodos estadísticos, con diversos grados de complejidad y multitud de variables independientes o explicativas, algunas de las más características son:

- $\cos \theta$, coseno del ángulo cenital solar, que da información del flujo de radiación incidente sobre la superficie de la atmósfera.
- n , índice de nubosidad, que indica la cobertura nubosa sobre el área de estudio.
- $T(0) = IG/IE\downarrow$, que tiene en cuenta la atenuación de la radiación solar producida por los componentes atmosféricos.
- B , brillo, medido por el satélite, que indica la radiación solar emergente desde la atmósfera hacia el exterior.
- B_{ρ} , que indica el brillo para un cielo despejado.
- B_{max} , que indica el brillo para un cielo cubierto.

La principal ventaja de los métodos estadísticos es su simplicidad y, consecuentemente, su eficiencia y facilidad de uso. Utilizan los valores medidos directamente por el satélite, y no es necesario transformar dichos valores en densidad de flujo de radiación emergente desde la atmósfera hacia el exterior. Además, normalmente, estos métodos no necesitan de datos meteorológicos complementarios, como temperatura, humedad o agua precipitable.

Las principales limitaciones de los métodos estadísticos radican en la necesidad de la obtención de datos de radiación a nivel de superficie medidos por piranómetros y, por otro lado, la falta de generalidad de los métodos.

Los principales modelos estadísticos son:

- EL MODELO *HH* (Hay y Hanson, 1978)
- EL MODELO *T* (Tarpley, 1979)
- EL MODELO *JPT* (Justus, Paris y Tarpley, 1986)
- EL MODELO *C* (Cano, 1986)

3.1.3 Métodos Físicos

Estos métodos están basados exclusivamente por los procesos físicos que operan en el sistema atmosférico, siendo los factores más importantes: dispersión y absorción, albedo de la cobertura nubosa y albedo de la superficie terrestre.

La principal ventaja de los métodos físicos, en comparación con los estadísticos, es su generalidad, ya que no dependen de una región particular y, por lo tanto, pueden ser aplicados en cualquier punto de la superficie terrestre. Adicionalmente, estos métodos no requieren de datos medidos en superficie por piranómetros.

Las desventajas también son variadas. Se necesitan datos meteorológicos complementarios para estimar la interacción de la radiación solar con la atmósfera, lo que a veces es complicado de obtener. Otro factor de desventaja es que los valores digitales de radiación obtenidos por el satélite necesitan ser transformados a su correspondiente valor de flujo de densidad de radiación emergente desde la atmósfera. Como consecuencia, es necesario buena calibración y ajuste de la instrumentación.

Los principales modelos físicos son:

- EL MODELO *GDM* (Gautier, Diak y Masse, 1980)
- EL MODELO *MR* (Möser y Raschke, 1984)
- EL MODELO *MDV* (Marullo, Dalu y Viola, 1987)
- EL MODELO *DDK* (Dedieu, Deschamps y Kerr, 1987)

3.2 Órbitas Elípticas

Gran parte de los satélites que orbitan alrededor de la tierra lo hacen con órbita *elíptica*, como por ejemplo la serie TIROS-NOAA, siendo por lo tanto no válidos los fundamentos físicos de las órbitas geoestacionarias, definidas únicamente por la altura orbital, como en el caso de METEOSAT. En el primer caso, el satélite describe una órbita cónica, aproximada a la elipse, uno de cuyos focos es la tierra. Para determinarla es necesario definir la cónica, orientarla respecto a la tierra, y situar el satélite en ella en un lugar determinado en función del tiempo

(Kelso, 1992). Para ello son necesarios una serie de parámetros que definan de forma unívoca dicha elipse; son los denominados *parámetros orbitales*, *elementos keplerianos* o, simplemente, *elementos*.

Los parámetros orbitales que describen la elipse son seis (siete en el caso de tener en cuenta la resistencia atmosférica): *Época*, *Inclinación de la órbita (I)*, *Longitud del Nodo Ascendente (Ω)*, *Argumento del Perigeo (ω)*, *Excentricidad (e)*, *Media del Período Orbital* y *Resistencia Atmosférica*

3.3 Resolución: NOAA vs METEOSAT

Según diversos autores, *resolución de un sistema sensor* se define como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle (Estes y Simonett, 1975). Engloba, al menos, cuatro manifestaciones: resolución espacial, espectral, radiométrica y espectral.

Las resoluciones temporal y espacial son función del tipo de órbita del satélite, y determinan, a modo de primer método de decisión, todos aquellos satélites que no son aptos para su utilización en estudios de radiación solar. Sin querer hacer una profusa descripción de cada satélite operativo –por no ser el objetivo del presente trabajo– se puede deducir que satélites como Landsat o Spot, cuya resolución temporal es de 17 y 26 días, respectivamente, no son válidos para obtener la caracterización de la radiación global incidente diaria o quincenal.

Los satélites que presentan mejor resolución temporal y espacial para dicho tipo de estudios y, cuya cobertura incluye la geografía española, son METEOSAT –de órbita geoestacionaria– y TIROS-NOAA –de órbita polar–. En el caso del continente americano el satélite GOES es el tradicionalmente utilizado entre los satélites de órbita geoestacionaria. Los referidos satélites se describen seguidamente, indicando sus características principales.

La influencia de cada tipo de resolución en los estudios de radiación solar son los siguientes:

1. *Resolución temporal*. NOAA presenta una desventaja clara en estudios de radiación solar frente a sensores de órbita geoestacionaria, como METEOSAT o GOES. Sin embargo, esta desventaja respecto a METEOSAT o GOES puede verse favorecida por la utilización simultánea de todos los satélites operativos de la serie TIROS-NOAA, que en estos momentos son NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14, consiguiendo un incremento importante de la resolución temporal.

El conocimiento exacto de la resolución temporal, esto es, de los tiempos de llegada del satélite, es de vital importancia para determinar la viabilidad de su utilización en estudios de radiación, en los que la dependencia de la frecuencia de pasada es elevada. Dada su importancia, dicho estudio se realiza en un apartado posterior.

2. *Resolución espacial.* La resolución espacial de AVHRR, 1.1 km. en el nadir, es claramente superior a METEOSAT, de 2.5 km en el visible y 5 km en los canales 2 y 3. Además, debido a la altura de la órbita de METEOSAT o GOES, la pérdida de resolución fuera del nadir induce errores geométricos elevados y tamaños de pixel muy superiores a los 2.5-5 km señalados. Esta es una de las razones principales por las que se pretende utilizar NOAA en estudios de radiación solar, ya que la resolución de 1.1 km. le confiere un grado importante de mejora en estudios a nivel regional que METEOSAT o GOES son incapaces de proporcionar.
3. *Resolución espectral.* La resolución espectral de AVHRR-NOAA y METEOSAT es similar en ambos debido a que los dos tienen una función meteorológica. Sin embargo el canal 3 de AVHRR (3.55-3.93 μm) no se encuentra en METEOSAT y, a su vez, el canal 2 de METEOSAT (5.7-7.1 μm) no lo dispone AVHRR. El mayor número de canales de AVHRR (5) frente a METEOSAT (3) también supone una ventaja de manejo de la información, con posibilidad de realizar operaciones y modelizaciones basándonos en la información de los distintos canales. La distribución espectral de las bandas de ambos sensores se puede observar en la Figura 3.2.
4. *Resolución radiométrica.* La resolución radiométrica de AVHRR-NOAA también es claramente superior a la de METEOSAT, ya que un mayor número de niveles digitales para representar la radiancia espectral recibida implica mayor grado de exactitud en los datos. Los 1024 niveles de AVHRR suponen una notable excepción frente a los demás sensores (Chuvieco, 1990), sin embargo algunos autores han demostrado que el aumento de 64 a 256 niveles no implica una mejora significativa en la clasificación de cubiertas vegetales (Tucker, 1979).

3.4 Modelos Orbitales

Si no existieran perturbaciones externas que afectaran a la órbita del satélite, el conocimiento de la resolución temporal sería inmediato. En el modelo kepleriano definido por sus *elementos*, los satélites orbitan en una elipse de área y orientación constante, que sin embargo, no se cumple debido a las perturbaciones sobre dicha órbita (Arnsatt, 1995).

DISTRIBUCION ESPECTRAL DE LOS CANALES DE LOS SENSORES AVHRR (NOAA) Y MR (METEOSAT)

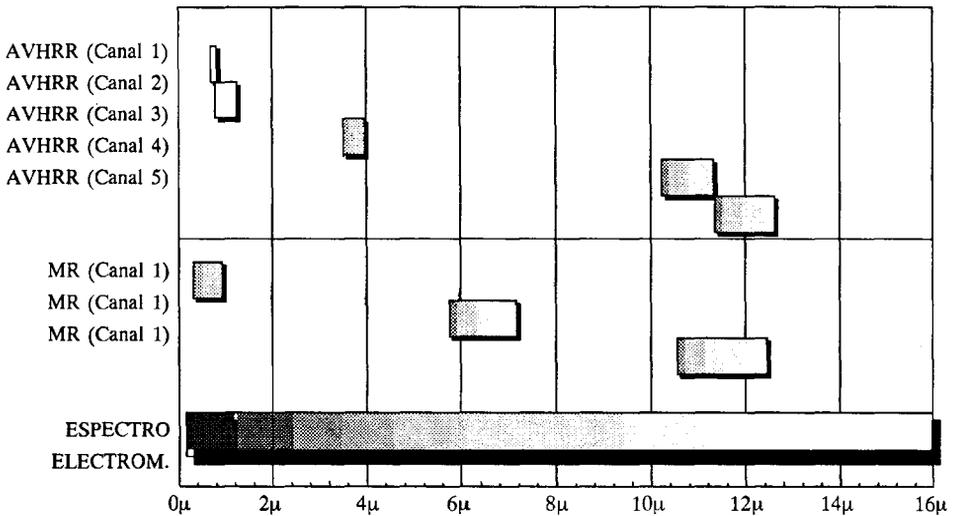


Fig. 3.2. Distribución espectral de AVHRR-NOAA y MR-METEOSAT.
Fuente: Elaboración propia

El modelo orbital tiene por objeto determinar la posición exacta del satélite en un instante dado (Kelso, 1992). El conocimiento de las coordenadas del satélite en función del tiempo permite determinar su resolución temporal y, por lo tanto, conocer los intervalos de tiempo existentes entre consecutivos eventos o pasadas sobre un mismo punto de la superficie terrestre.

Los satélites de órbita geoestacionaria, cuya velocidad angular coincide con la de la tierra, se sitúan permanentemente sobre el mismo punto de la superficie. Su resolución temporal, por tanto, no depende de la llegada de dicho satélite sobre el área de interés de estudio, sino del tiempo transcurrido entre dos captaciones consecutivas (Noia, 1993).

Caso opuesto es el de aquellos satélites con órbita elíptica, en que la resolución temporal viene determinada por los parámetros orbitales o keplerianos que determinan su órbita (Kelso, 1992). El tiempo transcurrido entre dos pasadas consecutivas sobre el mismo punto dependerá en este caso del tipo de órbita, siendo dicho intervalo variable. El modelo orbital tiene, pues, la función de determinar con antelación las sucesivas posiciones respecto al tiempo a lo largo de su trayectoria.

Las perturbaciones más importantes que ocasionan una variación de la trayectoria inicialmente supuesta son la *resistencia atmosférica*, que gradualmente mueve la posición del satélite a una órbita más baja, incrementando, por lo tanto, su velocidad (Lambert, 1993): *efectos de la gravitación solar y lunar* sobre la órbita del satélite, *efectos de resonancia orbital* (Lambert *et al.*, 1993) e *irregularidades del campo gravitacional terrestre* (Kelso, 1992), entre otros.

Algunos de los modelos orbitales actuales tienen en cuenta dichas perturbaciones, por lo que se presentan como herramientas básicas en la realización de predicciones y, por lo tanto, en el estudio de la resolución temporal de cualquier satélite.

En el caso que nos ocupa de la serie de satélites de órbita polar TIROS-NOAA, su resolución temporal es variable a lo largo del año, y no muestra una periodicidad diaria intuitiva ni previsible más allá de cortos períodos de tiempo. Durante el tiempo comprendido por NOAA en completar una órbita, la tierra rota a 0.25° por minuto, lo que origina que el satélite vaya barriendo sucesivamente zonas de este a oeste de la superficie terrestre.

Este tipo de órbita no presenta sucesivos eventos sobre el mismo punto de la superficie terrestre y el ángulo comprendido entre el plano que contiene la zona de interés de la superficie terrestre y la línea que une el sensor con dicha zona de estudio, es variable. A ese ángulo se le denomina *elevación* y, teóricamente, está comprendida entre 0° y 90° . En la práctica, datos con ángulos de elevación inferiores a 30° son desechados por inducir errores asociados a la geometría de la imagen.

La *elevación* induce modificaciones en la resolución espacial de los datos obtenidos y, por lo tanto, la señalada resolución espacial de NOAA de 1.1 km se presenta solamente para ángulos de elevación de 90° (en el nadir).

Todo lo comentado implica, a priori, no sólo el desconocimiento de la hora de cada pasada, sino también, y no menos importante, de la *elevación* de cada evento. Se plantea, por lo tanto, la necesidad de disponer de un método fiable, preciso y operativo que permita estudiar dicha resolución temporal para períodos de tiempo suficientemente largos y con elevada antelación: el modelo orbital.

3.4.1 *Funcionamiento de un Modelo Orbital*

El funcionamiento general de todos los modelos orbitales existentes se basa en la realización de los cálculos de predicción a partir de una posición conocida y determinada dentro de la órbita. Esto se realiza mediante la introducción de

la posición exacta del satélite en un instante dado a partir de los elementos orbitales, que definirán de forma unívoca la órbita del satélite y la posición del satélite en ella.

Debido a los factores externos que influyen sobre la órbita, el modelo precisa de la actualización periódica de la posición real del satélite, con objeto de anular los errores de predicción. El tiempo existente entre la fecha de los elementos orbitales que alimentan el modelo y la fecha de predicción determinan el grado de error con el que el modelo trabaja. Así pues, su actualización periódica permite que se minimice el error existente entre la predicción de la posición del satélite en un instante dado respecto a la posición real que ocupa en la órbita.

Las estaciones receptoras de satélites precisan de la utilización de modelos orbitales con objeto de predecir las sucesivas llegadas de cada satélite. La predicción del azimut, elevación, longitud y latitud del satélite mediante dicho modelo permite que la antena receptora se dirija hacia el punto desde el cual el satélite transmite y, por lo tanto, tenga éxito la captura de datos.

Debido a la alta precisión necesaria, el proceso de captación de la estación requiere de la actualización de los elementos de forma periódica, en concreto cada 10 o 15 días aproximadamente. La no actualización de los elementos ocasiona una pérdida de exactitud y, por lo tanto, un aumento del error existente entre la predicción y la posición real del satélite. Como consecuencia, la antena podría señalar a una posición errónea y, por lo tanto, la adquisición de datos del satélite no se realizaría con éxito.

En la práctica se realiza la actualización cada dos semanas aproximadamente, aunque, por ejemplo, las predicciones de NOAA-12 se degradan solamente 2 segundos en una semana (Pat *et al.*, 1993). Dicho error, aparentemente irrelevante, induce el error suficiente para ocasionar el desajuste de la antena y, por lo tanto, la pérdida de la información enviada por el satélite.

4. METODOLOGÍA

En este apartado se explica el método propuesto para el estudio del error del modelo orbital a lo largo del tiempo para predicciones de largo período, en concreto hasta 360 días de antelación. Posteriormente se presenta la metodología utilizada para la caracterización de la resolución temporal de TIROS-NOAA a partir de dicho modelo orbital, con objeto de conocer su distribución y el número de eventos por día para una serie temporal anual. Finalmente, se expondrá la metodología de estudio de la influencia de dicha distribución temporal de TIROS-

NOAA en la obtención de la radiación global diaria y períodos decenales, quincenales y mensuales.

4.1 Metodología de Estudio del Error del Modelo

El modelo orbital elegido, SGP4, ha sido intensamente comprobado en predicciones de corto período de tiempo (Kelso, 1990), dando excelentes resultados en todas las estaciones receptoras distribuidas por la superficie terrestre. Sin embargo, nuestras necesidades van más allá de predicciones de corto período, siendo necesario conocer los eventos futuros –hora de pasada y elevación– hasta con un año de antelación, con objeto de estudiar la resolución temporal anual de la serie TIROS-NOAA. La inexistencia de series temporales de pasadas de dicha serie de satélites para la situación geográfica de la estación receptora del *Servicio Centralizado de Información del Territorio (SCIT)*, situada en la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes (Universidad de Córdoba, España)*, justifica la necesidad de utilizar el modelo orbital para el estudio de la resolución temporal. Para dichas necesidades de predicciones a largo plazo, el modelo orbital elegido no ha sido comprobado y, por lo tanto, se desconoce el grado de error que dicho modelo afecta a predicciones con tanto tiempo de antelación.

Se tratará, por lo tanto, de estudiar la evolución del error del modelo a lo largo del tiempo para cada uno de los satélites de la serie TIROS-NOAA, basándonos en la comparación sistemática de las pasadas reales –hora y elevación real, a la que se capta la imagen del satélite– con las pasadas pronosticadas por el modelo.

Los objetivos del estudio del error del modelo son las siguientes:

1. Obtener las curvas de error-tiempo y error-elevación para cada satélite de la serie TIROS-NOAA para un período de estudio de hasta 360 días.
2. Maximizar las pruebas realizadas para cada día de predicción con objeto de eliminar las variaciones locales de tiempo y elevación de cada satélite.
3. Caracterizar el error de un modo atemporal, esto es, obtener el error como función del tiempo transcurrido desde la fecha de los *elementos orbitales* hasta la fecha de predicción, y no dependiente de fechas concretas.

Para obtener las curvas error-tiempo y error-elevación para cada satélite de la serie TIROS-NOAA se plantea la metodología siguiente:

1. Obtención de la hora de pasada y elevación reales de cada satélite diariamente durante un año.
2. Obtener los *elementos orbitales* de un año entero para cada satélite.
3. Realización de los cálculos de comparación entre las predicciones del modelo y las pasadas reales.
4. Obtención de las curvas error-tiempo y error-elevación para cada satélite.

4.2 Metodología de Estudio de la Resolución Temporal

Una vez estudiado el modelo orbital SGP4 y determinado su error, se procede a utilizarlo para estudiar la resolución temporal de TIROS-NOAA. Se ha elegido el año 1995 para el estudio debido a que NOAA 14 empezó a ser operativo a principios de dicho año, por lo que se dispone de elementos orbitales de los tres satélites para ese período, NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14, los tres que hoy en día están operativos.

La metodología consiste en conseguir los elementos orbitales de cada satélite una vez por mes durante el año 1995, y solicitarle al modelo una predicción de un mes desde la fecha de cada fichero de elementos. La razón de realizar sucesivas predicciones mensuales para cada elemento orbital se debe a una mejora en la precisión de los datos obtenidos por el modelo, así como facilidad en el manejo de las predicciones con objeto de introducir las posteriormente en programas que transformen dichos cálculos en gráficos.

La caracterización de la resolución temporal se obtuvo finalmente mediante la obtención anual de:

1. Número de eventos por día.
2. Distribución horaria de eventos.
3. Elevación de cada evento.

siendo las combinaciones estudiadas:

1. Intervalo horario total/visible
2. Elevación > 30°, 50° y 70°
3. Intervalos anuales y mensuales
4. Satélites NOAA 10, 12, 14 y todos juntos.

Dado que nuestros objetivos se centran en la aplicación de TIROS-NOAA en radiación solar, el aspecto de la eliminación de pasadas fuera del intervalo diurno merece especial detenimiento por su importancia. Como es sabido, el número de horas de sol es variable a lo largo del año y, por lo tanto, la variación de la hora de salida y puesta de sol anual determinará una variación en el número de eventos disponibles por día para cada satélite de la serie. Además, la claridad, o período de penumbra, al inicio y final de cada día, iniciado para ángulos solares menores de 0° respecto al plano horizontal, son insuficientes para la obtención de datos de calidad por los sensores espaciales (Kelso, 1992). Es necesaria una elevación del sol superior a 10° con objeto de que el sensor del satélite reciba la radiación reflejada por la superficie terrestre (Kelso, 1992).

Por esta razón, se calcularon las horas de salida y puesta de sol para cada día del año, así como el tiempo en alcanzarse un ángulo horario de 10° sobre el plano horizontal. La distribución temporal anual de dicho ángulo horario permite realizar un filtrado de todos los eventos obtenidos mediante el modelo orbital, quedándonos solamente con aquellos válidos para el estudio de la radiación solar. Por lo tanto, a partir de la resolución temporal para el intervalo horario total y mediante filtrado de los datos, se obtiene la resolución temporal *viable*, esto es, para el intervalo horario visible. Los cálculos para la obtención del límite visible anual se realizaron como se describe seguidamente.

Siendo α el ángulo de elevación solar, tal y como se ve en la Figura 4.1,

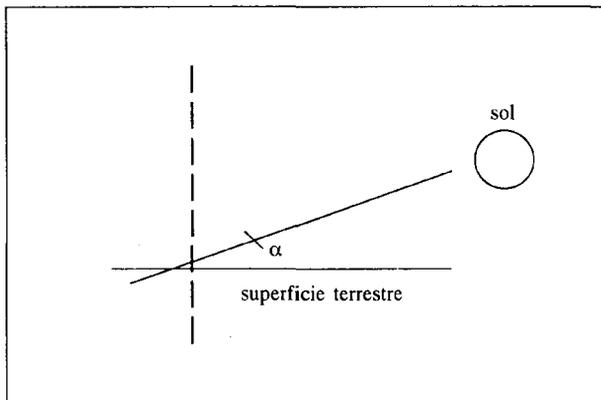


Fig. 4.1. Ángulo α de elevación solar.

según la ecuación,

$$\text{sen } \alpha = \text{cos} \delta \cdot \text{cos} \lambda \cdot \text{cos} (\Omega \cdot t) + \text{sen} \lambda \cdot \text{sen} \delta \quad [5]$$

siendo,

- δ Declinación solar;
- λ Latitud;
- t Tiempo;
- Ω Velocidad angular (rad/h), $\Omega = \frac{2\pi}{24}$

El valor de la declinación δ viene definido por,

$$\sin \delta = -0.3979 \cdot \sin \gamma \quad [6]$$

siendo,

- δ Declinación solar;

El cálculo de las variables intermedias y se realiza mediante,

$$\gamma \approx \gamma_0 = \frac{2\pi \cdot (n + 284)}{365.24} \quad [7]$$

siendo,

- n Día del año en formato Juliano (1-366).

Para mayor exactitud, el valor de γ viene determinado por:

$$\gamma [\text{rad}] = \gamma_0 + 0.007133 \cdot \sin \gamma_0 + 0.032680 \cdot \cos \gamma_0 - 0.00318 \cdot \sin 2\gamma_0 + 0.000145 \cdot \cos 2\gamma_0 \quad [8]$$

Despejando,

$$\cos (\Omega \cdot t) = \frac{\sin \alpha - (\sin \lambda \cdot \sin \delta)}{\cos \delta \cdot \cos \delta} \quad [9]$$

de donde la hora t en que el sol alcanza la elevación en su recorrido ascendente y descendente queda determinada por,

$$t = \pm \frac{1}{\Omega} \cdot \arccos \left[\frac{\sin \alpha - (\sin \lambda \cdot \sin \delta)}{\cos \delta \cdot \cos \delta} \right] \quad [10]$$

La gráfica obtenida representa dicha distribución horaria a lo largo del año para salida y puesta de sol, $\alpha = 0^\circ$, y para $\alpha = 10^\circ$ sobre el plano horizontal (Figura 4.2). En ella se observa que el tiempo transcurrido entre los sucesivos ángulos horarios es prácticamente constante a lo largo del año, existiendo un pequeño aumento del tiempo en meses de invierno. El tiempo transcurrido entre $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 10^\circ$, aproximadamente de 1 hora, ocasiona la pérdida de eventos ocurridos en dichos períodos de amanecida o anochecida en que el sensor del satélite no capta datos. La distribución horaria de $\alpha = 10^\circ$ es, pues, el filtro que determina aquellas pasadas que serán utilizadas para obtener la radiación global diaria, eliminando el resto.

DISTRIBUCION HORARIA ANUAL DE SALIDA Y PUESTA DE SOL EN RELACION AL LIMITE HORARIO DE CAPTACION DE DATOS (SALIDA/PUESTA: 0° . LIMITE DE CAPTACION: 10°)

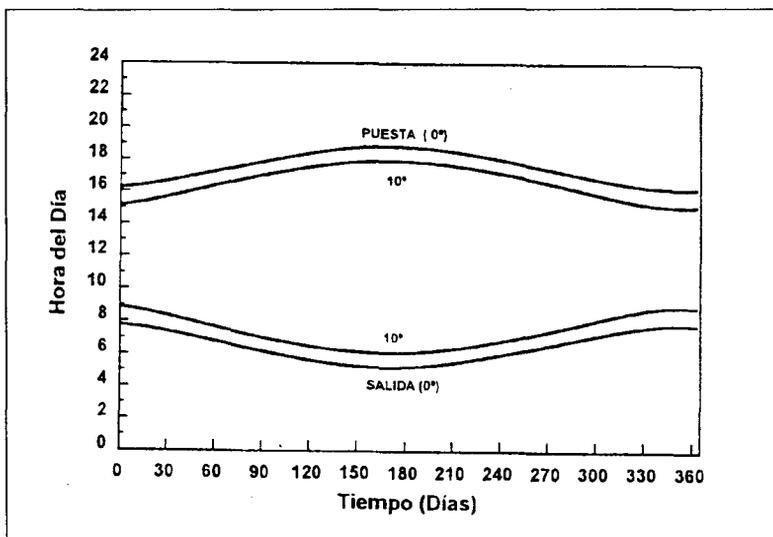


Fig. 4.2. Variación horaria de salida y puesta de sol para ángulos de elevación 0° y 10° .

4.3 Metodología de Estudio de la Influencia de la Resolución Temporal en el Cálculo de la Radiación Global Incidente Diaria

Una vez estudiada la resolución temporal de NOAA, se abarca el estudio de la influencia de dicha resolución temporal sobre la estimación de la radiación global diaria a partir de los datos instantáneos obtenidos por el satélite. Para ello se utiliza el método de Collares-Pereira et al. (1978) que establece la relación

entre radiación instantánea y global diaria, al que se le añade una ponderación con objeto de mejorar su precisión. El objetivo es estudiar la influencia de la resolución temporal exclusivamente, es decir, independientemente de los errores inherentes al método de transformación del valor digital obtenido por el satélite en el correspondiente valor de radiación instantánea. Para determinar si la baja resolución temporal de NOAA ocasiona errores de estimación de la radiación global más allá de lo admisible, el estudio se basará en los datos de radiación instantánea diarios cada 5 minutos, para un período de un año de duración, tomados en la estación meteorológica perteneciente al Grupo de Investigación en Energía y Recursos Renovables (GIERR) de la Universidad de Córdoba. Dichos datos serán filtrados, escogiendo aquellos que coincidan, para cada día, con la hora de pasada de cada satélite que, como se ha determinado, es variable a lo largo del año. De esta forma se aislará el efecto deseado de la influencia de la resolución temporal en la estimación de la radiación global diaria, y se determinará si el error es superior a lo deseado o, por el contrario, su influencia es admisible. El método de Collares-Pereira *et al.* establece una relación entre la radiación instantánea y la global mediante un factor de conversión:

$$r_h = \frac{I_h}{H_h} \quad [11]$$

siendo,

- I_h Radiación instantánea;
- H_h Radiación global diaria;
- r_h Factor de conversión.

Los trabajos de Hottel y Whillier (1955) y Liu y Jordan (1960) establecen que el factor r_h depende solamente de dos variables: la hora del día t , expresada como ángulo horario, $\omega = 2\pi t / T$, y de la hora de puesta de sol, t_s , expresada como ángulo horario de puesta de sol, ω_s . La expresión del factor de conversión $r_h(\omega, \omega_s)$ es:

$$r_h(\omega, \omega_s) = \frac{\pi}{T} \cdot (a + b \cdot \cos\omega) \cdot \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s \cdot \cos\omega_s} \quad [12]$$

donde los coeficientes a y b :

$$\begin{aligned} a &= 0.409 + 0.5016 \cdot \sin(\omega_s - 1.047) \\ b &= 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin(\omega_s - 1.047) \end{aligned} \quad [13]$$

siendo,

T Longitud del día, 24 horas;
 ω Angulo horario, $\omega = 2\pi t / T$;
 ω_s Angulo horario de puesta de sol, $\omega_s = 2\pi t_s / T$;
 Angulos en radianes.

Con objeto de estudiar el grado de ajuste del comentado método Collares-Pereira, se realizó la estimación de la radiación global diaria a partir de los valores instantáneos medidos por el piranómetro, durante un año entero y cada cinco minutos. Mediante comparación entre la global estimada cada cinco minutos a partir del correspondiente valor instantáneo, y la global real obtenida por el piranómetro para ese día, se obtienen las curvas de error del citado modelo para cada día ($e = H_{-real} - H_{estimada}$).

Se demuestra la existencia de un aumento del error para estimaciones realizadas fuera de las horas centrales del día. Del estudio anual se demuestra que:

1. El método de Collares-Pereira *et al.* introduce un error de tipo sistemático, con errores elevados en los extremos del día y buen ajuste en las horas centrales del día.
2. El error sistemático es superior en meses centrales del año que durante el invierno.

Dichas consideraciones permiten realizar la propuesta de que los valores instantáneos correspondientes a las horas de pasada de los satélites se ponderen en función de la hora de cada uno de ellos. De esta forma se pretende dar mayor peso a los valores instantáneos correspondientes a las horas centrales del día, que son los que menor error inducen al estimar la radiación global.

Así pues, las opciones existentes para obtener la radiación global diaria estimada a partir de los datos de radiación instantánea coincidentes con las horas de pasada de los satélites son dos:

1. *Sin ponderar.* La obtención de la radiación global estimada para cada día sin ponderar se realiza mediante la media aritmética de las globales estimadas a partir de su correspondiente valor instantáneo, esto es:

$$H_{d.est} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{i.est}}{n} \quad [14]$$

siendo

i Evento considerado;

n Número de eventos del día;

$H_{i,est}$ Radiación global estimada mediante Collares-Pereira a partir del valor instantáneo I_i ;

$H_{d,est}$ Radiación global diaria estimada.

2. *Mediante ponderación.* La ponderación de los datos instantáneos en función de su hora permite la eliminación del error sistemático antes caracterizado dando mayor importancia a los valores obtenidos en horas centrales del día. Se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, definiendo la función de ponderación:

$$P(\omega, \omega_s) = a + b \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 + \dots \quad [15]$$

siendo a, b, c, \dots los coeficientes de la función de ponderación P .

Se define una función de ponderación distinta dependiendo del número de eventos por día, de forma que la radiación global diaria estimada se calculará utilizando la función de ponderación correspondiente dependiendo del día. La expresión es del tipo:

$$H_{d,est} = a \cdot \left[\sum_{i=1}^n H_{i,est} \right] + b \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\omega_s}{\omega_i}\right)^2 \cdot H_{i,est} \right) \right] + c \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\omega_i}{\omega_s}\right)^4 \cdot H_{i,est} \right) \right] + \dots \quad [16]$$

Los coeficientes a, b, c, \dots se obtienen mediante mínimos cuadrados, definiendo la función,

$$Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3 + \dots \quad [17]$$

siendo $Y = H_{d,est} = X_1 = \sum_{i=1}^n H_{i,est}$; $X_2 = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\omega_s}{\omega_i}\right)^2 \cdot H_{i,est} \right)$; $X_3 = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\omega_i}{\omega_s}\right)^4 \cdot H_{i,est} \right)$;

La función de ponderación se obtiene para grados 4 y 6, con objeto de conocer el comportamiento de cada una de ellas. El sistema de ecuaciones planteado para calcular los coeficientes en una función de grado 4, es decir, para una función de ponderación del tipo $P(\omega, \omega_s) = a + b \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$ fue

el siguiente,

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \sum_{\forall i} X_{1i}^2 + b \cdot \sum_{\forall i} X_{1i} \cdot X_{2i} + c \cdot \sum_{\forall i} X_{1i} \cdot X_{3i} &= \sum_{\forall i} Y_i \cdot X_{1i} \\ a \cdot \sum_{\forall i} X_{1i} + X_{2i} + b \cdot \sum_{\forall i} X_{2i}^2 + c \cdot \sum_{\forall i} X_{2i} \cdot X_{3i} &= \sum_{\forall i} Y_i \cdot X_{2i} \\ a \cdot \sum_{\forall i} X_{1i} \cdot X_{3i} + b \cdot \sum_{\forall i} X_{2i} \cdot X_{3i} + c \cdot \sum_{\forall i} X_{3i}^2 &= \sum_{\forall i} Y_i \cdot X_{3i} \end{aligned} \right\} [18]$$

Para períodos decenales, quincenales y mensuales, la obtención de la radiación global decenal, quincenal y mensual respectivamente, se realiza mediante la utilización de una función de ponderación P_n distinta para cada día en función de la variación del número de eventos n por día a lo largo del período considerado.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Obtención y Análisis de las Curvas de Error del Modelo

Se obtuvieron las curvas de error del modelo para NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14. Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran, a modo de ejemplo, las curvas de la media del error y de la desviación típica frente a la media –en cuanto al tiempo y elevación de NOAA 14, así como las curvas de regresión para las gráficas de error-tiempo.

Como puede observarse en dichas curvas, el error-tiempo es prácticamente despreciable –para nuestros objetivos de estudiar la resolución temporal– incluso para predicciones de largo período, como el caso estudiado de 360 días. En todas las curvas error-tiempo se diferencian dos zonas claramente. La primera, desde 0 hasta 180 días aproximadamente, en que el error máximo no sobrepasa los 4 minutos de diferencia entre la pasada real y la predicción realizada por el modelo.

La segunda zona, desde 180 hasta 360 días, las curvas experimentan un aumento del error y, sobre todo, una mayor desviación típica, lo que origina menor precisión en la predicción de eventos en dicho período de tiempo.

No obstante, el error de predicción del modelo es en todo momento admisible para nuestros objetivos inicialmente planteados, permitiendo mediante un *elemento orbital* de una fecha concreta hacer predicciones fiables, rápidas y precisas de hasta 360 días de tiempo. Esto es así porque cuando el objetivo es realizar estudios de frecuencia de pasadas de la serie TIROS-NOAA, con objeto de conocer las disponibilidad futura de datos, la llegada del satélite de unos 15 minutos antes o después de la fecha prevista no es determinante. Este es el error

máximo para un período de 360 días, siendo el error de predicción para 270 días de unos 6 minutos, lo cual demuestra la exactitud del modelo para largos períodos ya comentada anteriormente.

Las curvas error-elevación, como se puede observar, parten de 0° de error y su aumento se produce de forma alternativamente positiva y negativa. En estas curvas se podrían sacar las mismas conclusiones de diferenciación de zonas dependiendo del período considerado. Hasta 180 días el error es casi despreciable, aumentando en mayor proporción desde 180 hasta 360 días de predicción.

Para 360 días el error-elevación máximo se produce para NOAA 9 y NOAA 10, con $\pm 6^\circ$ de error, lo cual demuestra el grado de precisión alcanzado. El aspecto negativo a tener en cuenta es que, dadas las variaciones alternativas de signo en la predicción de la elevación, se produce una incertidumbre al desconocer si la predicción realizada por el modelo será aumentada o disminuida por el valor error-elevación correspondiente al tiempo entre fecha de los elementos y fecha de predicción.

5.1.1 Ajuste mediante regresión de las curvas Error-Tiempo

Con objeto de mejorar localmente el modelo SGP4 para la estación del *Servicio Centralizado de Información del Territorio de la Universidad de Córdoba*, se realizan los ajustes de las curvas error-tiempo para cada satélite. Las curvas error-elevación plantean serios problemas de ajuste debido al corto período de tiempo en que pasan de signo positivo a negativo y viceversa. Por tal razón, y sabiendo además que el error máximo de predicción es de 6° para 360 días, se puede considerar que dicho ajuste no traería mejoras sustanciales al modelo.

Las curvas error-tiempo se ajustan mediante regresión polinomial de grado 10, siendo sus coeficientes de ajuste los que se presentan en la Tabla 5.1.

Mediante la integración de dichos ajustes en el modelo orbital, se obtiene el modelo *SGP4-ajustado*, reduciendo aun más los errores de predicción de largo período para los satélites operativos NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14.

5.2 Obtención y análisis de las gráficas de la resolución temporal de tiros-NOAA

La incidencia del ángulo de elevación de pasada en la resolución espacial de la imagen y, por lo tanto, en errores geométricos asociados, se abordó

ERROR (TIEMPO) - NOAA 14

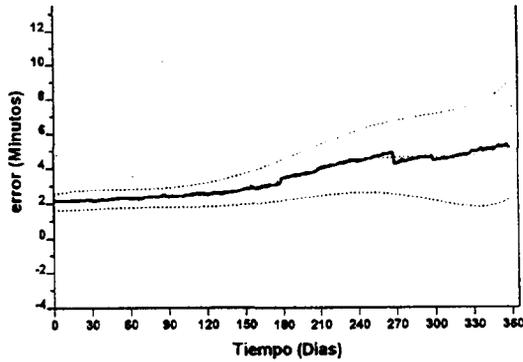


Fig. 5.1

ERROR (ELEVACION) - NOAA 14

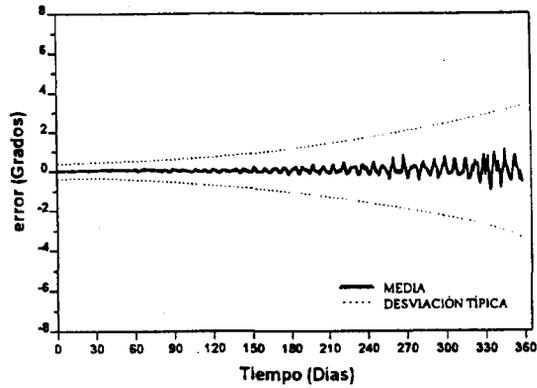


Fig. 5.2

Tabla 5.1

Coefficientes de regresión de las gráficas Error-Tiempo para cada satélite.

COEFICIENTES DE REGRESION DE LAS GRAFICAS ERROR (TIEMPO)				
$e(\text{minutos}) = P^i (X = \text{días})$				
GRADO	NOAA9	NOAA10	NOAA12	NOAA14
T. Indep.	1.98646	2.871946	2.34522	2.15587
X	0.0140467	-0.0362783	-0.008013	0.0048086
X ²	-0.0002239	0.0005027	0.000115	-0.000115
X ³	1.57E-6	-2.16014E-6	-1.95E-7	1.8848E-6
X ⁴	-2.59E-9	3.01222E-9	-1.59E-10	-4.79E-9
r ²	0.93	0.84	0.93	0.92

mediante el estudio de la resolución temporal para las tres categorías siguientes: elevaciones de pasada mayores de 30° , 50° y 70° , tanto para el intervalo horario total como para el visible solamente.

5.2.1 Intervalo horario total

Los resultados obtenidos para el intervalo horario total, esto es, para eventos en condiciones de noche y día, se han representado en las figuras del número de eventos por día y de la distribución horaria anual de eventos. El primer grupo, número de eventos por día, tiene por objeto conocer la distribución anual del número de pasadas con el fin de determinar el número de datos instantáneos de que se dispondrá para obtener la radiación global incidente diaria. El segundo grupo, la distribución horaria anual de eventos, tiene por objeto determinar la hora de pasada de cada evento, con el fin de conocer los instantes de tiempo de obtención de los valores radiación instantánea captados por el satélite.

5.2.1.1 Número de eventos por día

Las gráficas correspondientes al número de eventos por día para el intervalo horario total, para $E > 30^\circ$, y para los satélites NOAA 10, NOAA 12 Y NOAA 14, así como la distribución para todos juntos, se muestran en la Figura 5.3. Como podrá observarse, el número de eventos por día a lo largo del año es de 2 de forma mayoritaria, pasando a 3 por día cada cierto período. La figura del número de eventos por día para todos los satélites juntos determina la existencia de 6 datos por día a lo largo del año de forma mayoritaria, 7 imágenes por día cada cierto tiempo y 8 solamente tres días al año.

5.2.1.2 Distribución horaria anual de eventos

Las gráficas correspondientes a la distribución horaria anual de eventos para el intervalo horario total, para $E > 30^\circ$, y para los satélites NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14, así como la distribución para todos juntos, se recogen en la figura 5.4. En ellas se puede observar una uniformidad temporal constante a lo largo del año pero diferente para cada tipo de satélite, función de los desfases orbitales existentes entre cada satélite de la serie.

5.2.2 Intervalo horario visible

La metodología llevada a cabo de filtrado de los resultados obtenidos de la resolución temporal para el intervalo total de día y noche se recoge en los apartados siguientes. La eliminación de todos los eventos producidos anterior o posteriormente a la hora en que el sol alcanza 10° de elevación, a su salida y

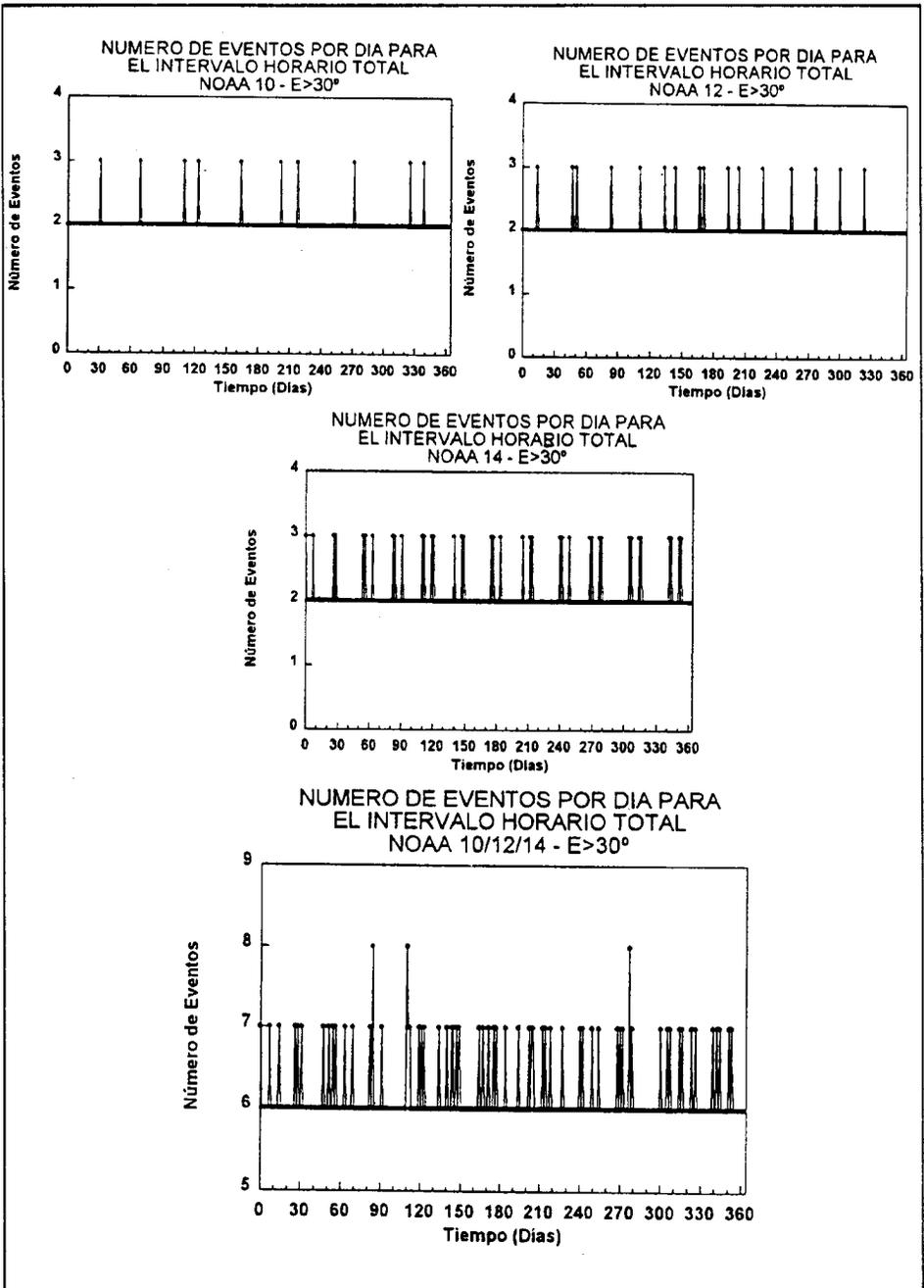


Fig. 5.3. Número de eventos por día para el intervalo horario total.

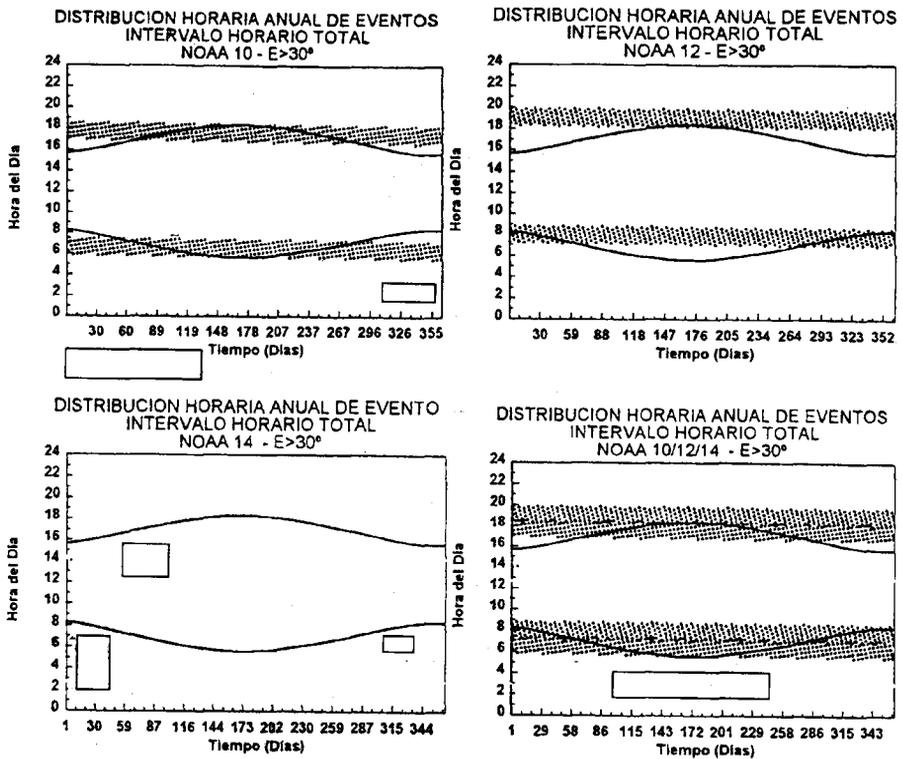


Fig. 5.4. Distribución horaria anual de eventos para el intervalo horario total.

puesta, permite obtener los datos viables para la estimación de la radiación global diaria. Como se podrá observar, dicho filtrado de eventos ocasiona una sensible reducción del número de eventos disponibles para tal fin.

5.2.2.1 Número de eventos por día

Las gráficas correspondientes al número de eventos por día para el intervalo horario visible, para $E > 30^\circ$, y para los satélites NOAA 10, NOAA 12 y NOAA 14, así como la distribución para todos juntos, se muestra en la Figura 5.5.

El resultado más importante a que se llega es la gran variación del número de eventos por día disponibles en meses de invierno en comparación a los de verano. En los primeros, correspondiente a los extremos de la figura, el número de eventos disponibles es 1, aumentando sucesivamente dicha disponibilidad hasta llegar a 5 eventos por día en los meses centrales del año. Evidentemente, estos resultados concuerdan con la variación del número de horas de sol a lo largo del año, y restringen notablemente la disponibilidad de datos en meses de invierno.

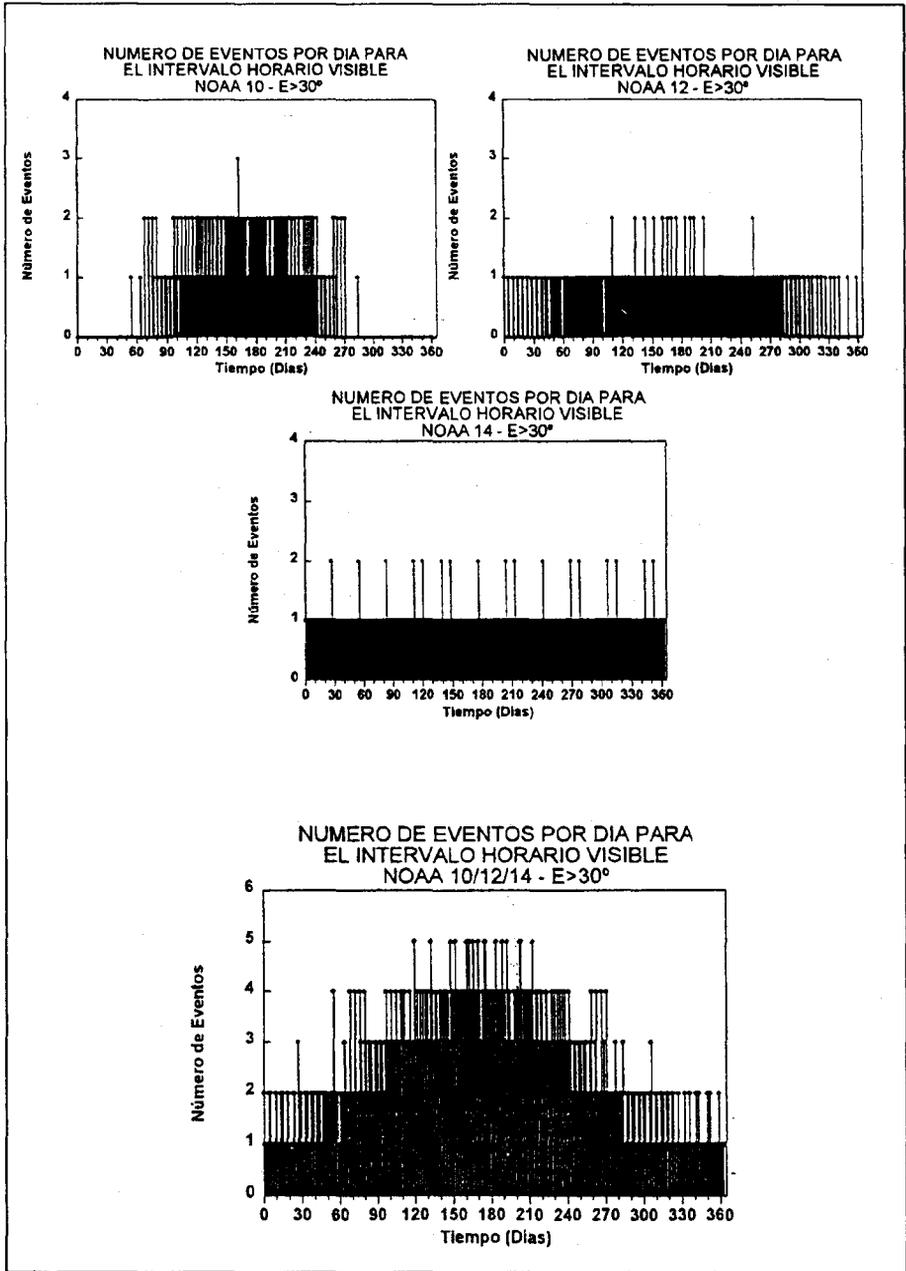


Fig. 5.5. Número de eventos por día para el intervalo horario visible

5.2.2.2 Distribución horaria anual de eventos

El resultado obtenido correspondiente a la distribución horaria anual de eventos para el intervalo horario visible, para $E > 30^\circ$ y para todos los satélites juntos se muestra en la Figura 5.6. En ella se han eliminado todos los eventos que quedan fuera del límite visible de captación de datos, observándose cómo el número de horas de sol influye notablemente en invierno, en que, prácticamente, solo la banda central de NOAA 14 es viable para la obtención de datos.

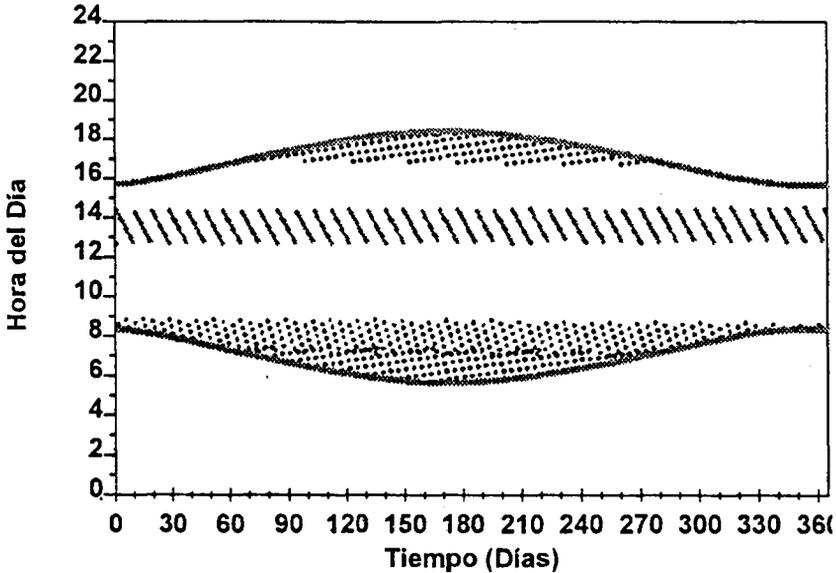


Fig. 5.6. Distribución horaria anual de eventos intervalo horario visible NOAA 10/12/14 - $E > 30^\circ$

5.3 Resultados del estudio estadístico de la influencia de la resolución temporal de Tiros-NOAA en el cálculo de la radiación global incidente diaria

Los coeficientes de las funciones de ponderación de grado 4, $P(\omega, \omega_s) = a + b \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$, obtenidas mediante el método de mínimos cuadrados

a partir del sistema de ecuaciones [18], se muestran en la Tabla 5.2. La función de ponderación a utilizar (Tabla 5.3) dependerá del número de eventos del día objeto del estudio.

Tabla 5.2
Coeficientes de Ponderación (grado 4)

Nº eventos/día	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
2	0.5191	-0.2426	0.429
3	0.4357	-0.648	0.72
4	0.3885	-0.7738	0.8765
5	0.1879	0.0333	0.754

Tabla 5.3
Funciones de ponderación de grado 4

Número de Eventos/día	Función de Ponderación a Utilizar <i>Grado 4</i>
Caso 2	$P_2(\omega, \omega_s) = 0.5191 - 0.2426 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 0.429 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$
Caso 3	$P_3(\omega, \omega_s) = 0.4357 - 0.648 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 0.72 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$
Caso 4	$P_4(\omega, \omega_s) = 0.3885 - 0.7738 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 0.8765 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$
Caso 5	$P_5(\omega, \omega_s) = 0.1879 - 0.0333 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 0.0754 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4$

Los coeficientes de las funciones de ponderación de grado 6, $P(\omega, \omega_s) = a + b \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + c \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 + d \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^6$, obtenidas mediante el mismo método a partir del sistema de ecuaciones análogo, se muestran en la Tabla 5.4. Las funciones de ponderación a utilizar dependiendo del caso se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.4
Coeficientes de Ponderación (grado 6)

Nº eventos/día	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
2	0.487	0.848	-4.24	4.823
3	0.446	-0.884	1.517	-0.697
4	0.395	-0.932	1.406	-0.455
5	0.186	0.062	-0.02	-0.8

Tabla 5.5
Funciones de ponderación de grado 6

Número de Eventos/día	Función de Ponderación a Utilizar <i>Grado 4</i>
Caso 2	$P_2 (\omega, \omega_s) = 0.487 + 0.848 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 - 4.24 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 + 4.823 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^6$
Caso 3	$P_3 (\omega, \omega_s) = 0.446 - 0.884 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 1.517 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 - 0.697 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^6$
Caso 4	$P_4 (\omega, \omega_s) = 0.395 - 0.932 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + 1.406 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 - 0.455 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^6$
Caso 5	$P_5 (\omega, \omega_s) = 0.186 + 0.062 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 - 0.02 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^4 + 0.08 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^6$

La representación gráfica de las funciones de ponderación obtenidas $P(\omega/\omega_s)$ de grado 4 y 6 se recogen en la Figura 5.7.

Los resultados obtenidos tras aplicar las funciones de ponderación para estimar la radiación global diaria a partir de valores instantáneos, demuestran que se mejoran las estimaciones realizadas por Collares-Pereira sin ponderar. Los 6 grupos en que se clasificaron todos los días del año en función de su número de eventos –de 1 a 5 eventos/día y otro grupo para todos juntos–, experimentan una mejora en la estimación de la radiación global diaria a partir de la utilización de la función de ponderación P_n determinada por el número de eventos del día.

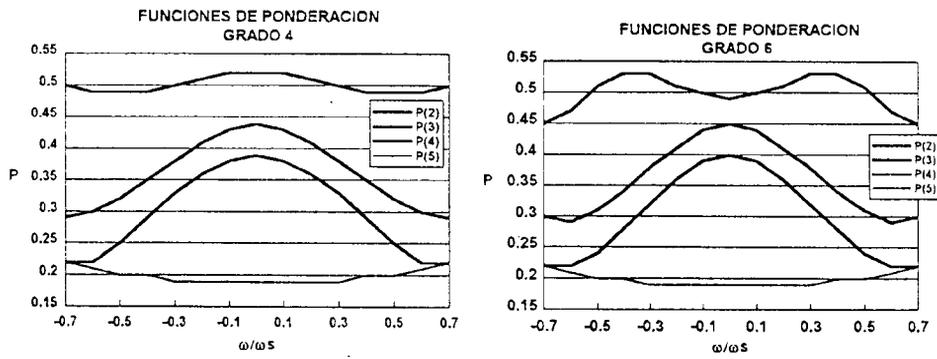


Fig. 5.7: Funciones de ponderación de grado 4 y 6 obtenidas.

No existe mejora, sin embargo, cuando se trata de utilizar la función de ponderación de grado 6 frente a la de grado 4, por lo que se decide la utilización de la primera debido a su mayor facilidad de uso: $r^2 = 0.9404$ (todos los casos, grado 4), $r^2 = 0.9413$ (todos los casos, grado 6).

El estudio estadístico arroja los coeficientes de correlación r^2 para cada caso recogidos en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6

Coeficientes de Correlación r^2 y Error Típico para Períodos de Estimación Diarios						
	Nº Eventos/día					
	1	2	3	4	5	Todos
r^2 (sin ponderar)	0.7945	0.8990	0.8156	0.8107	0.8997	0.9179
r^2 (ponderado, grado 4)	No	0.90010	0.8186	0.8363	0.9319	0.9404
Error típico (ponderado) - J/m ²	1392058.5	1635917.1	2283680	2199081	1067759.6	1959431.3
Porcentaje de error	16.94%	13.3%	10%	9.25%	4.07%	11.5%
Nº de Observ. (días)	68	112	71	98	16	365

Estos resultados demuestran la viabilidad de utilizar NOAA para obtener la radiación global diaria a partir de los valores instantáneos, pese a su baja resolución temporal. Además, la ponderación realizada mejora el ajuste en todos los casos, especialmente cuando el número de eventos/día es 4 y 5.

A partir de estos resultados se obtiene, mediante la misma metodología de ponderación, la radiación global decenal, quincenal y mensual. La diferencia

respecto a lo realizado hasta el momento reside en que, por ejemplo, dentro de una quincena, existe variación del número de eventos por día. Por lo tanto, para dicho período será necesario utilizar distintas funciones de ponderación, dependiendo del número de eventos por día.

Los resultados obtenidos, aún mejores, se muestran en la Tabla 5.7, demostrándose que la influencia de la resolución temporal de NOAA es prácticamente despreciable en períodos decenales, quincenales o mensuales.

Tabla 5.7

Coeficientes de Correlación r^2 y Error Típico para distintos Períodos de Estimación			
Tipo de Período			
	Decenal	Quincenal	Mensual
r^2	0.9916	0.9929	0.9961
Error Típico (J/m^2)	6688225.1	9198042.8	14362114.5
Porcentaje de error	3.89%	3.57%	2.77%
Nº de observaciones	36	24	12

Los resultados obtenidos por los tres ajustes se muestran en la Figura 5.8 a 5.10, en que se representan los valores de radiación global estimada decenal, quincenal y mensual respectivamente, frente a los valores reales de radiación para los mismos períodos.

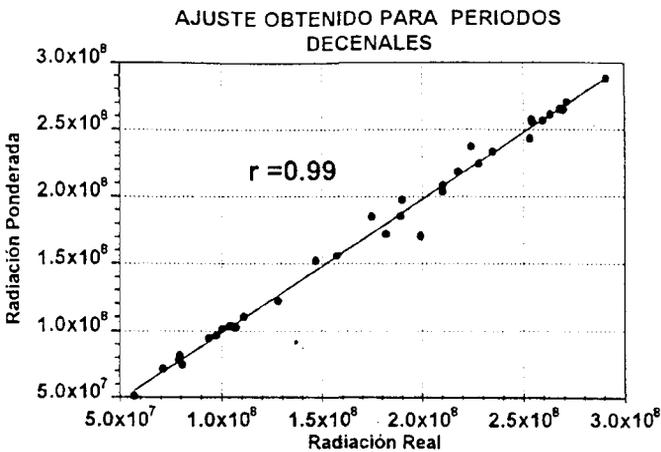


Fig. 5.8

Tabla 5.9

AJUSTE OBTENIDO PARA PERIODOS QUINCENALES

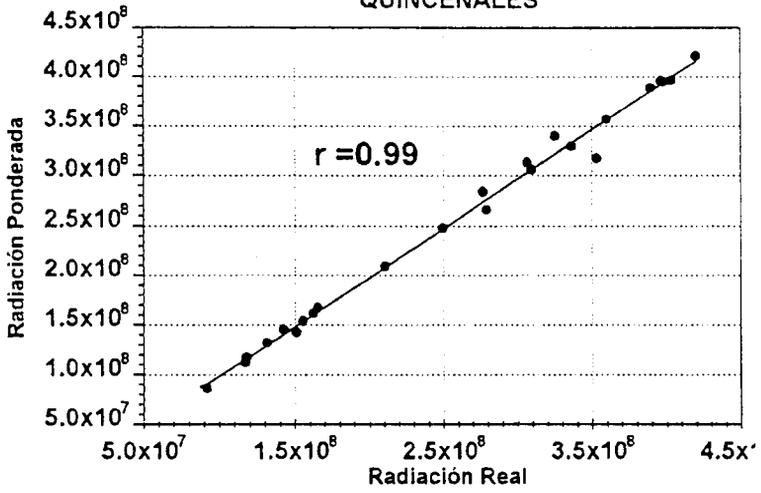
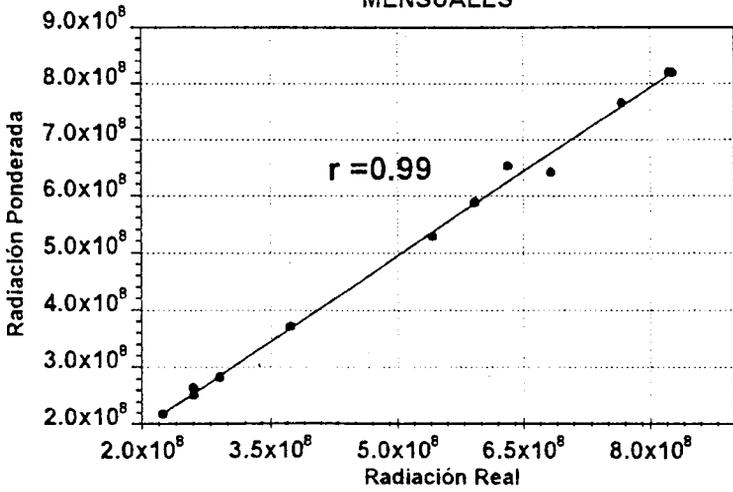


Tabla 5.10

AJUSTE OBTENIDO PARA PERIODOS MENSUALES



6. CONCLUSIONES

Las conclusiones a la que se llega son las siguientes:

1. La serie de satélites TIROS-NOAA es viable para obtener la radiación global incidente diaria. Su baja resolución temporal no impide dicho objetivo pese a que el número de imágenes dentro del intervalo visible fluctúa a lo largo del año desde 1 imagen/día en meses de invierno a 5 imágenes/día en verano.
2. La ponderación de grado cuarto realizada al método de Collares-Pereira *et al.* supone una mejora de la estimación de la radiación global diaria a partir de datos instantáneos, pasando de $r^2=0.91$ a $r^2=0.94$ para la muestra formada por todos los días, es decir, por todos los grupos con distinto número de eventos.
3. La obtención de la radiación global diaria mediante ponderación presenta un ajuste de $r^2=0.9$ para días con dos eventos (13.3% de error), $r^2=0.81$ en días con tres eventos (10%), $r^2=0.83$ en días con cuatro eventos (9.25%), $r^2=0.93$ en días con cinco eventos (4.07%), y $r^2=0.94$ cuando se considera todo tipo de días (11.5%), lo que demuestra su viabilidad.
4. La obtención de la radiación global decenal, quincenal y mensual presenta ajustes de $r^2=0.99$ en los tres casos, con errores de 3.89% para períodos decenales, 3.57% para quincenales y 2.77% para mensuales, lo que demuestra la validez del método empleado.
5. La utilización de TIROS-NOAA para obtener la radiación global diaria supone una mejora importante frente a los métodos tradicionales de utilización de satélites geostacionarios, como METEOSAT o GOES. Dicha afirmación se justifica por la mejora de la resolución espacial (de 2.5-5 km. en METEOSAT a 1.1 km en TIROS-NOAA), espectral (de 3 bandas en METEOSAT a 5 bandas en TIROS-NOAA) y radiométrica (de 256 niveles en METEOSAT a 1024 en TIROS-NOAA).
6. La baja resolución temporal de TIROS-NOAA requiere de la utilización de métodos de obtención de la radiación de tipo estadístico. Esto es debido a que los métodos físicos exigen para su correcto funcionamiento gran cantidad de imágenes por día, no así los estadísticos.
7. El modelo orbital SGP4, una vez caracterizado su error para períodos largos de tiempo, y determinada su alta precisión, se presenta como una potente herramienta de predicción de largo período para satélites de órbita polar bajo diferentes restricciones de trabajo. Los errores máximos de 8-12 minutos en

tiempo y de ± 6 grados en elevación para una predicción de 360 días demuestra su validez para dicho fin.

BIBLIOGRAFÍA

ARIZA LOPEZ, F. J.

1994 *Electrificación Fotovoltaica versus Electrificación Convencional. Fragmentación del Territorio Según Viabilidad Económica Mediante Sistemas de Información Geográfica*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

CANO, D. et al.

1986 "A Method for the Determination of the Global Solar Radiation from Meteorological Satellite Data". *Solar Energy* Vol. 37. Pergamon Press Ltd, Nueva York.

COLLARES-PEREIRA, M. et al.

1979 "The Average Distribution of Solar Radiation - Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values". *Solar Energy* Vol. 22. Pergamon Press Ltd, Nueva York.

CZEPLAK, G. et al.

1992 "An Assessment of a Statistical Method to Estimate Solar Irradiance at the Earth's Surface from Geostationary Satellite Data". *Renewable Energy* 1.

CHUVIECO, E.

1990 *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones RIALP, S.A. Madrid.

DAVIES, J.A. et al.

1975 *Estimating Global Solar Radiation*. *Boundary Layer Meteorology* 9.

DE CARLI, F. et al.

1986 "A Procedure to Obtain Global Radiation Maps From Sunshine Durations at Isolated Stations in a Region with Complex Orography". *Solar Energy* Vol. 37. Pergamon Press Ltd., Nueva York.

DEDIEU, G. et al.

1987 "Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of the Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteorological Data". *Journal Clim. Appl. Meteorol.* 26.

- DIABATÉ, L. et al.
 1989 "Description of an Operational Tool for Determining Global Solar Radiation at Ground Using Geostationary Satellite Images". *Solar Energy* Vol. 42. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- DIABATÉ, L. et al.
 1988 "Estimating Incident Solar Radiation at the Surface From Images of the Earth Transmitted by Geostationary Satellites: The Helisat Project". *Solar Energy* Vol. 5. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- FRULLA, L.A. et al.
 1988 "Incident Solar Radiation on Argentina from the Geostationary Satellite GOES: Comparison with Ground Measurements". *Solar Energy* Vol. 41. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- GAUTIER, C. et al.
 1980 "A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface From GOES Satellite Data". *Journal Applied Meteorology* 36.
- HAY, J.E. et al.
 1978 "A Satellite-Based Methodology for Determining Solar Irradiance at the Ocean Surface During GATE". *Bulletin of American Meteorology Soc.* 59.
- HISER, H.W. et al.
 1980 "Mesoscale Mapping of Available Solar Energy at the Earth's Surface by Use of Satellites". *Solar Energy* Vol. 24. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- HOOTS, F.
 1980 *Models for Propagation of NORAD Element Set*. Package compiled by T.S. Kelso.
- ILLERA, P.
 1989 *Estimación de la Radiación Solar Global Mediante Imágenes Meteosat*. III Reunión científica del grupo de trabajo en teledetección AET. Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid.
- IQBAL, M.
 1976 "Correlation of Average Diffuse and Beam Radiation with Hours of Sunshine". *Solar Energy*. Pergamon Press Ltd. New York.

- JUSTUS, C. et al.
1986 "Satellite-Measured Insolation in the United States, Mexico and South America". *Remote Sensing of Environment* 20.
- KELSO, T.S.
1992 *Documentación for NORAD SGP4/SDP4 Units. Version 2.50.*
- LYDDANE, R.H.
1963 "Small Eccentricities or Inclinations in the Brouwer Theory of the Artificial Satellite". *Astron. J.*, 68.
- MORIARTY, W.W.
1991 "Cloud Cover as Derived From Surface Observations, Sunshine Duration, and Satellite Observations". *Solar Energy* Vol. 47. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- MÖSER, W. et al.
1984 "Incident Solar Radiation Over Europe Estimated From Meteosat Data". *J. App. Meteorol.* 23.
- MÖSER, W. et al.
1983 "Mapping of Global Radiation and of Cloudiness From Meteosat Image Data". *Meteorol. Rdsch.* 36.
- NOIA, M. et al.
1983 "Solar Irradiance Estimation From Geostationary Sattelite Data: I. Statistical Models". *Solar Energy* Vol. 51. Pergamon Press Ltd, Nueva York.
- NOIA, M. et al.
1993 "Solar Irradiance Estimation From Geostationary Sattelite Data: II. Physical Models". *Solar Energy* Vol. 51. Pergamon Press Ltd, Nueva York .
- PINILLA, C.
1995 *Elementos de Teledetección.* Ediciones RA-MA. Madrid.
- RAPHAEL, C.
1983 *Models for Estimating Solar Irradiance at the Earth's Surface From Satellite Data: An Initial Assessment, Technical Report.* Atmospheric Environment Service, Downsview Ontario.

TARPLEY, L.D.

1979 "Estimating Incident Solar Radiation at the Surface, From Geostationary Satellite Data". *Journal Applied Meteorology*, pp. 1172-1181.

ZARCO, P.J. et al.

1995 *Viabilidad del Uso de los Satélites NOAA en los Estudios de Radiación Solar*. Comunicación en la VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Valladolid.

ZELENKA, A. et al.

1992 *Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data, Technical Report*. International Energy Agency, Swiss Meteorological Institute. Zurich.