

VIABILIDAD DEL USO DE LOS SATELITES NOAA EN LOS ESTUDIOS DE RADIACION SOLAR

P.J. Zarco, F.J. Ariza y R. López

Grupo de Investigación en Energía y Recursos Renovables. Universidad de Córdoba. P.O.Box 3.048, 14.071-Córdoba. Fax 34 (9) 57 21 84 82. E-Mail: st2zatep@lucano.uco.es

C. Pinilla Ruiz

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén. Avda. de Madrid, nº35. 23.071 - Jaén. Fax 34 (9)53 21 24 00.

RESUMEN.- El presente trabajo utiliza el *Modelo Orbital SGP4/SDP4* para estudiar la resolución temporal de la serie *TIROS-NOAA*. El conocimiento de la hora y elevación de la pasada de los satélites con antelación suficiente es vital para decidir sobre la viabilidad del uso de los mismos en radiación solar y ciencias afines. La falta de imágenes bajo unas necesidades determinadas de tiempo y/o elevación hace inviable la utilización de dicha serie de satélites. El modelo orbital mencionado ha sido ajustado para predicciones de largo período mediante el estudio de su error, obteniendo una precisión de ± 5 minutos (hora) y de $\pm 6^\circ$ (elevación) para una predicción de 360 días de antelación. El resultado es el *Software Predictor de Eventos*, que calcula las pasadas futuras bajo las restricciones impuestas.

ABSTRACT.- The current research project pursues the study of the temporal resolution for TIROS-NOAA satellites, using the SGP4/SDP4 Orbital Model. In solar radiation and similar sciences, the data availability with enough time for planning the future work based on Remote Sensing is absolutely necessary. The lack of data under certain conditions (time, elevation, etc.) makes impossible the use of such TIROS-NOAA satellites. The mentioned orbital model has been fitted for long-time predictions by its error-study, achieving a ± 5 minutes (time) and $\pm 6^\circ$ (elevation) accuracy for 360 days forecasting. The result is the *Pass Scheduler Software*, that calculates the future passes under given conditions.

1.- INTRODUCCION

La serie TIROS-NOAA es fuente de información para multitud de trabajos basados en la Teledetección. En muchos de ellos se presenta la necesidad de obtener imágenes de forma continua que cumplan unos requisitos determinados en cuanto a su frecuencia de obtención, tanto horaria como diaria, en combinación con las distintas elevaciones variables que cada evento de NOAA nos ofrece. La viabilidad de la utilización de la serie TIROS-NOAA en radiación solar así como en ciencias afines depende de la disponibilidad de imágenes para las necesidades de tiempo y elevación determinadas.

El conocimiento de la disponibilidad de imágenes con tiempo de antelación suficiente para una buena planificación del trabajo es un método de decisión clave para su acometida. No solo en estudios de radiación solar, sino también en todos aquellos en que el momento de obtención de la imagen es crucial, como el control de heladas, incendios forestales, temperaturas máximas/mínimas, etc., pueden encontrar una herramienta de decisión en el

presente trabajo.

En el ámbito de los estudios de la radiación solar, NOAA presenta la ventaja de poseer mayores resoluciones espectral y espacial que el satélite METEOSAT, ampliamente utilizado en este contexto. Por el contrario, debido a la órbita polar de la serie NOAA, presenta la desventaja de una menor resolución temporal, siendo la frecuencia de las ocurrencias, su intervalo horario, y el ángulo de elevación, variables. Las dos primeras características originan la imposibilidad de tomar datos a intervalos de tiempo regulares, mientras que el ángulo de elevación induce errores de tipo geométrico en las imágenes, así como a valores digitales escasamente representativos en los bordes de la escena, lo que no ocurre en España utilizando datos METEOSAT.

El presente trabajo proporciona la posibilidad de prever los eventos futuros que para unas condiciones determinadas se impongan, intervalo horario dentro del día, intervalo temporal dentro del año, elevación mínima del evento así como la elección del tipo de satélite (NOAA 9, 10, 12 ó 14) o la conjunción de todos ellos. Como resultado se obtienen las gráficas de ocurrencias para las necesidades dadas, proporcionando una herramienta para la toma de decisiones sobre la viabilidad de utilizar dicha serie de satélites NOAA en la aplicación concreta.

La predicción de eventos futuros para las condiciones dadas se basa en la utilización del modelo orbital *NORAD SGP4/SDP4*, diseñado para la realización del seguimiento (*tracking*) de las estaciones receptoras de satélites. Su grado de exactitud deja de ser el óptimo para períodos de tiempo más allá de 3 semanas. Mediante un estudio estadístico a lo largo de 360 días hemos obtenido el modelo *NORAD SGP4/SDP4* ajustado para la estación receptora de Córdoba y para largos períodos de tiempo.

2.- OBJETIVOS

Habida cuenta de los pros y contras que presentan ambos tipos de satélites (NOAA, METEOSAT), resultaría adecuado poder integrar la información de más interés proporcionada por cada uno de ellos. Enmarcado dentro de esta finalidad general, el presente trabajo se ha planteado los siguientes objetivos:

- La búsqueda y selección del modelo orbital cuyo grado de exactitud sea mayor.
- El estudio del error de dicho modelo para predicciones de largo período, en concreto con antelación de hasta 360 días.
- El ajuste del modelo orbital mediante regresión de las curvas de error con objeto de obtener discrepancias admisibles entre la predicción teórica y el evento real.
- El estudio de las frecuencias diarias de pasada de los satélites operativos de la serie TIROS-NOAA en conjunción con los ángulos de elevación admisibles.
- La generación del *Software Predictor de Eventos* que nos proporcione la gráfica de la distribución de ocurrencias para un período de días determinado, dentro de un intervalo horario establecido, con una elevación superior a la requerida por el usuario y, todas las restricciones, para el/los satélites seleccionados o para todos juntos.

3.- METODOLOGIA

3.1.- Elección del modelo

Con objeto de determinar apropiadamente la posición de cualquier satélite usando los

elementos orbitales standard, proporcionados por *U.S. Space Command* (NORAD Two-Line Elements), debe utilizarse el modelo adecuado de entre todos los existentes cuya finalidad sea el seguimiento de la antena de las estaciones receptoras. Dado que las observaciones de la posición exacta tomadas por *NORAD U.S. Space* para cada satélite son reducidas a *elementos orbitales* (NORAD-TLE) usando el modelo *SGP4* (*Simplified General Perturbations*), es evidente que el mismo modelo *SGP4* debe ser usado para calcular la posición y velocidad de un satélite con el mayor grado de aproximación posible partiendo del fichero de los *elementos orbitales*. Esta es, por lo tanto, la razón por la que se elige dicho modelo de entre todos los existentes, pudiendo nombrar los modelos *NORAD SGP4/SDP4*, *Brouwer-Lyddane*, *SeaTrack*, entre otros. En períodos cortos de tiempo todos cumplen su objetivo con creces (Lyddane, 1963), realizando el mencionado seguimiento de la antena de la estación receptora mediante la obtención cuasi-semanal del fichero con los *elementos orbitales* y, por lo tanto, eliminando errores ocasionados por perturbaciones orbitales (Brouwer, 1959). En períodos largos de tiempo es, así pues, el modelo *SGP4/SDP4* el que mayor exactitud proporciona ante dichas perturbaciones, que principalmente son debidas a resistencia atmosférica *-atmospheric drag-* (que gradualmente mueve la posición del satélite a una órbita más baja, incrementando, por lo tanto, su velocidad) y que el modelo *Brouwer-Lyddane* no lo tiene en cuenta, efectos de la gravitación solar y lunar, irregularidades del campo gravitacional terrestre, etc. (Kelso, 1992).

3.2.- Cálculo de errores del modelo para un período de 360 días

Como queda dicho anteriormente, nuestro objetivo es utilizar el modelo *SGP4/SDP4* para predicciones de largo tiempo, en concreto, desde 1 a 360 días. Para ello, y dado que no existe conocimiento actualmente sobre el error de dicho modelo en períodos tan largos, diseñamos una metodología para estudiar dicho error 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. Comparando las diferencias de tiempo (minutos) y de elevación (grados) existentes entre la pasada generada por el modelo y la pasada real, $\text{Error}_{\text{tiempo}} = \text{Tiempo}_{\text{evento-real}} - \text{Tiempo}_{\text{evento-modelo}}$, $\text{Error}_{\text{elevac}} = \text{Elevac}_{\text{evento-real}} - \text{Elevac}_{\text{evento-modelo}}$, y asignándole su posición en la gráfica dependiendo de los días de antigüedad de los *elementos orbitales* respecto del día solicitado por el modelo, obtenemos las curvas de error (media del error) para cada satélite en tiempo y elevación (*Figura 1*). Asimismo representamos la desviación típica para cada día frente a la media.

Debido a la inexistencia de datos para el satélite NOAA 14 (primera fecha de *elementos orbitales* para NOAA-14 datan del 2 de Enero de 1995) las gráficas correspondientes a dicho satélite abarcan hasta el día 150.

Finalmente, las gráficas de error son independientes del tiempo en que se usen, ya que los valores de abscisa (tiempo en días) significa el tiempo que existe desde la fecha de los *elementos* hasta la fecha solicitada al modelo. De esta forma conocemos el error con que el modelo nos proporciona el evento solicitado.

Con objeto de ajustar el modelo *SGP4/SDP4* para Córdoba y para largos períodos de tiempo, se ha realizado la regresión polinomial de las curvas de $\text{Error}(\text{tiempo})$, siendo los coeficientes obtenidos los que se muestran en la *Tabla I*.

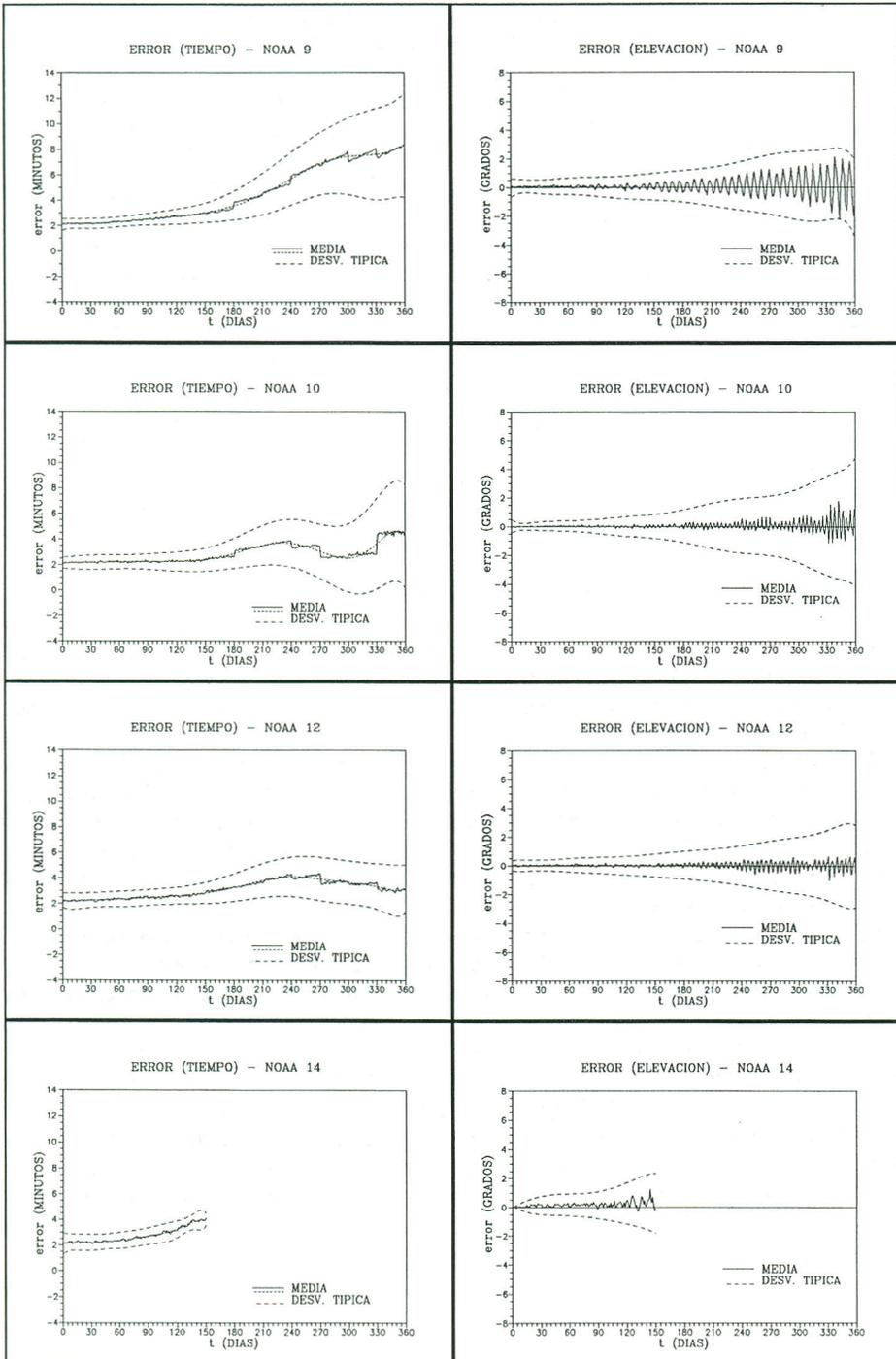


Figura 1.- Curvas Error-Tiempo (minutos) y Error-Elevación (grados) para cada satélite.

Tabla I.- COEFICIENTES DE REGRESION DE LAS GRAFICAS ERROR(TIEMPO)				
<i>e(minutos) = Pⁿ(t=días)</i>				
GRADO	NOAA 9	NOAA 10	NOAA 12	NOAA 14
T.Indep.	2.08287	2.13023	2.25326	2.11426
X	0.0159631	-0.00108392	-0.0245156	0.0098871
X²	-0.00116145	0.000304851	0.00205006	0.00152612
X³	3.81635E-05	-1.37223E-05	-6.88432E-05	-0.000238628
X⁴	-6.31125E-07	3.09001E-07	1.25802E-06	1.26829E-05
X⁵	6.14103E-09	-3.87842E-09	-1.36101E-08	-3.51273E-07
X⁶	-3.74682E-11	2.81131E-11	9.06547E-11	5.72211E-09
X⁷	1.45718E-13	-1.18042E-13	-3.7375E-13	-5.67762E-11
X⁸	-3.49995E-16	2.79061E-16	9.26523E-16	3.37266E-13
X⁹	4.70863E-19	-3.38549E-19	-1.26351E-18	-1.10165E-15
X¹⁰	-2.70105E-22	1.59397E-22	7.27858E-22	1.52057E-18
r²	0.94	0.90	0.95	0.99

Tabla I.- Coef. de regresión de las gráficas Error-Tiempo para cada satélite

3.3.- Cálculo de la Distribución Anual de Eventos

Mediante el modelo podemos conocer la distribución anual de eventos para Elevación > 25°, su evolución temporal, frecuencia de pasadas y, por lo tanto, el máximo y mínimo número de eventos que cada satélite presenta para cada día. El ejemplo de la Figura 2 se ha realizado con el intervalo de 1 Marzo 1994 - 1 Marzo 1995.

La distribución anual de eventos para todos los satélites juntos (NOAA 9/10/12/14) nos dan idea de la variabilidad de ocurrencias a lo largo del período considerado. Dependiendo de la elevación mínima admisible hemos representado los eventos para el mismo período de tiempo y para sucesivas elevaciones ($E > 30^\circ$, $E > 50^\circ$, $E > 70^\circ$ y $E > 80^\circ$) con objeto de conocer el número de eventos por día para las consecutivas restricciones impuestas. Las gráficas nos demuestran que si necesitamos imágenes con un grado de elevación superior siempre a 50° , por ejemplo, nos encontraremos con un número de 4 días sin datos. El número de días sin eventos aumenta, evidentemente, conforme somos más restrictivos en cuanto a la elevación, y así, obtenemos un gran número de días sin datos para una $E > 80^\circ$ (Figura 2)

Las horas de cada suceso (evento) corresponden a horas solares, y se refieren a la estación receptora situada en la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes de la Universidad de Córdoba (Servicio Centralizado de Información del Territorio - SCIT)*.

Tanto para el cálculo de errores (eventos-reales, eventos-modelo) como para la utilización del modelo en la predicción de eventos (eventos-modelo), la situación geográfica corresponde al de dicha estación receptora, cuyas coordenadas son: Latitud: 37 52 00 N; Longitud: 004 47 00 W; Altitud: 137.

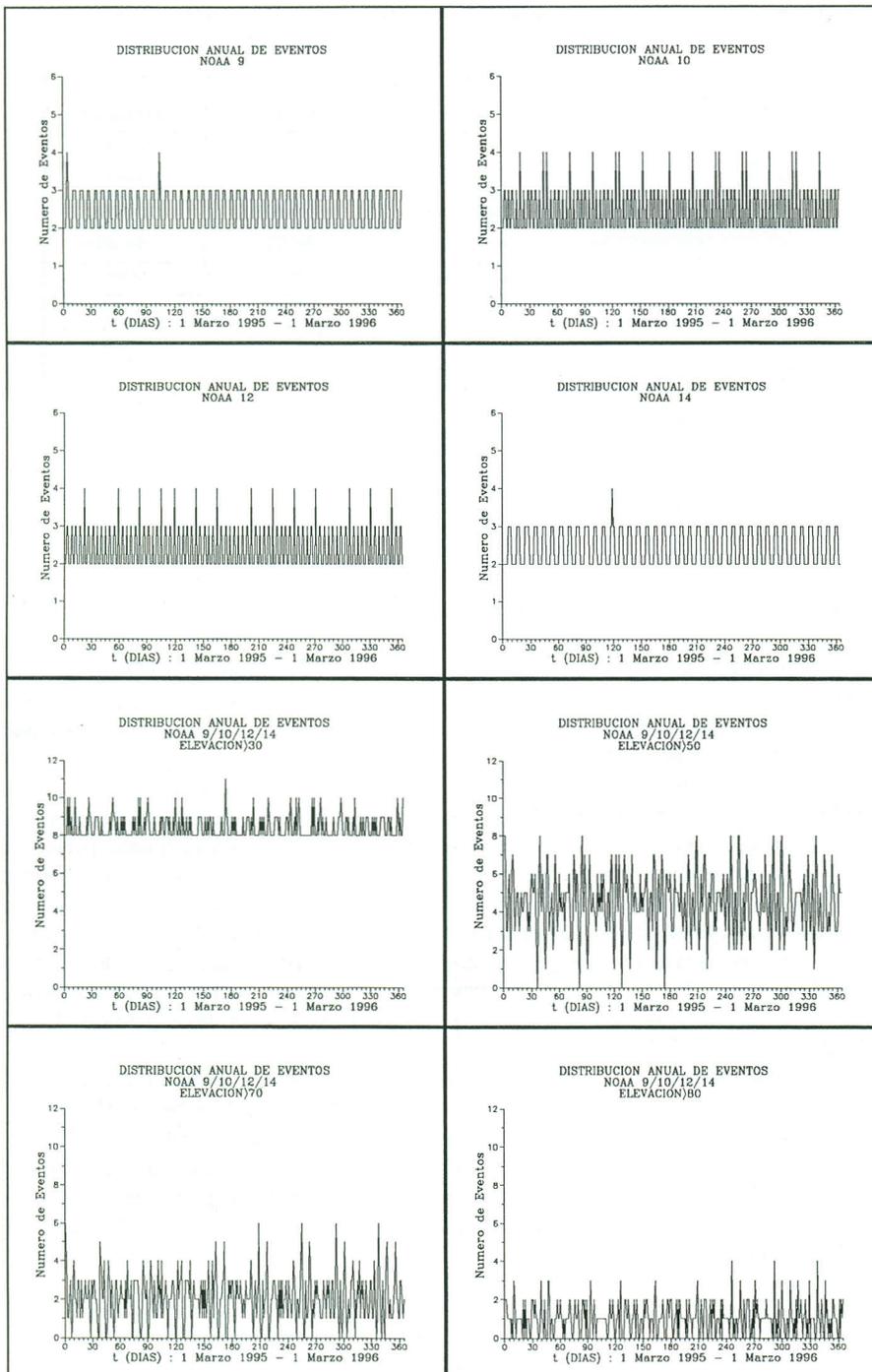


Figura 2.- Distribución anual para cada satélite y para todos con distintas elevaciones

3.4.- Aplicación del Software Predictor de Eventos

Integrando el modelo *SGP4/SDP4-ajustado* y la posibilidad de introducir restricciones variables dependiendo de las necesidades particulares, es decir, intervalos temporales a lo largo del año, intervalos horarios a lo largo del día, de elevación mínima admisible, así como el/los satélites deseados, obtenemos el *Software Predictor de Eventos*.

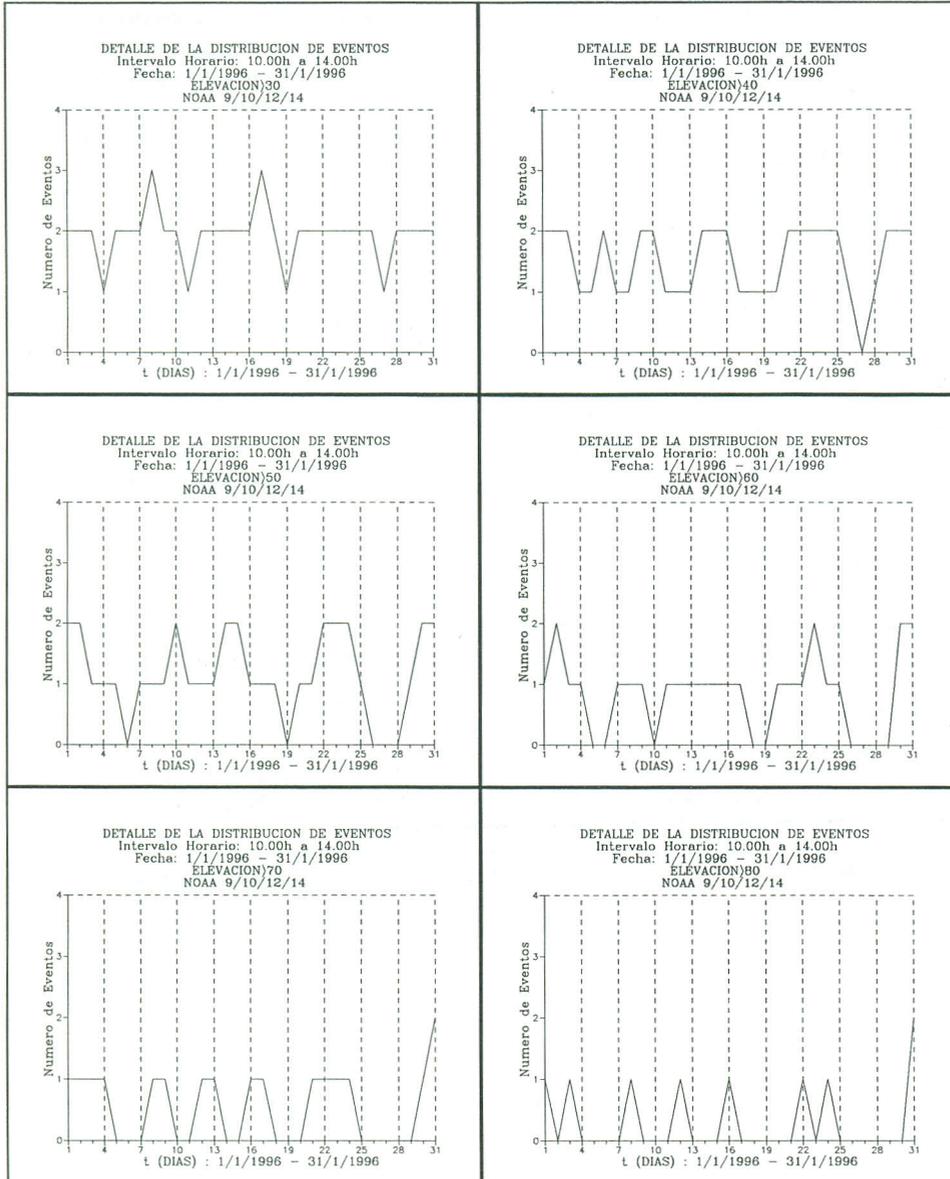


Figura 3.- Distribución de eventos mediante el *Software Predictor de Eventos*

Mediante dicho paquete informático obtenemos información de los eventos futuros con un grado de exactitud elevado, dependiente de la antigüedad de los *elementos orbitales*, y que supone una herramienta en la toma de decisión sobre trabajos basados en Teledetección. Como ejemplo hemos realizado la predicción para NOAA 9/10/12/14 durante los días 1 a 31 de Enero de 1996, en el período comprendido entre 10.00h y 14.00h, para sucesivas elevaciones ($E > 30^\circ$, $E > 40^\circ$, $E > 50^\circ$, $E > 60^\circ$, $E > 70^\circ$ y $E > 80^\circ$) (Figura 3).

Los *elementos orbitales* para tal predicción datan del 7 de Agosto de 1995, por lo que, aproximadamente, el error inducido en dicha predicción es de ± 4 minutos en tiempo y $\pm 3^\circ$ en elevación, dependiendo del satélite, como anteriormente se ha especificado. Esto es así porque desde el 7 de Agosto de 1995 hasta el 1 de Enero de 1996 hay 146 días, por lo que el error corresponderá -para cada satélite- al valor de la ordenada para la abscisa 146.

4.- CONCLUSIONES

El presente trabajo ofrece una herramienta de consulta para la previsión de la disponibilidad futura de datos NOAA. Dependiendo de las restricciones particulares del usuario, intervalo horario, período temporal, elevación mínima admisible, satélite/s, obtenemos las gráficas de ocurrencias y, por lo tanto, la certeza de la disponibilidad futura de imágenes para dichas necesidades/restricciones. La exactitud de la predicción, de ± 5 minutos (hora) y de $\pm 6^\circ$ (elevación) para una antelación de 360 días, supone la alta fiabilidad con la que se pueden planificar trabajos basados en la serie TIROS-NOAA. Sus aplicaciones son variadas, tanto a nivel público como privado, sobre radiación solar, riesgo de heladas, detección y seguimiento de incendios forestales, así como multitud de procesos agrícolas y medioambientales en que la planificación con cierta antelación requiere del conocimiento de la disponibilidad futura de imágenes.

5.- AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. T.S. Kelso (*Adjunct Professor of Space Operations - Air Force Institute of Technology, USA*) su inestimable colaboración en la realización de este trabajo.

6.- REFERENCIAS

- Brouwer, D., 1959. Solution of the problem of artificial satellite theory without drag, *Astron. J.*, 64: 378-397.
- Kelso, T.S., 1992. Documentation for NORAD SGP4/SDP4 Units. Version 2.50.
- Kelso, T.S., 1989-90. Documentation for Pass Scheduler. Version 1.06.
- Kelso, T.S., 1992. Documentation for TrakStar/SGP4 with Visibility. Version 2.15.
- Lyddane, R.H., 1963. Small eccentricities or inclinations in the Brouwer theory of the artificial satellite, *Astron. J.*, 68: 555-558.