



«ANdi»: UNA ESCUSA PARA RECORDAR ASTRONOMÍA

En el marinero, todo ocupado al riesgo, al trabajo y a la fatiga, no cabe quietud para estudio tan dilatado y prolixo; [...]

JORGE JUAN («Examen marítimo / Theórico / Práctico»).

Introducción



N el año 1998 tiene lugar la puesta en circulación de la primera versión del *Almanaque Náutico* en disquete (ANdi). Esta inexcusable actualización en el formato de distribución de las efemérides astronómicas (1), útiles al navegante, coincide con una entrañable efeméride histórica: el bicentenario del traslado del Observatorio desde el Castillo de la Villa en Cádiz al pago de Torrealta en San Fernando. Tan allá como a mediados del siglo XVIII, don Jorge Juan y Santacilia, a la sazón capitán de la Compañía de Guardias

(1) Ampliando la acepción que recoge el *Diccionario de la Lengua Española*, por efemérides astronómicas se entiende, de una forma general, la comunicación de datos relativos a fenómenos astronómicos que han de producirse en el futuro, tales como posiciones de los astros, ortos, ocasos, eclipses, etc.

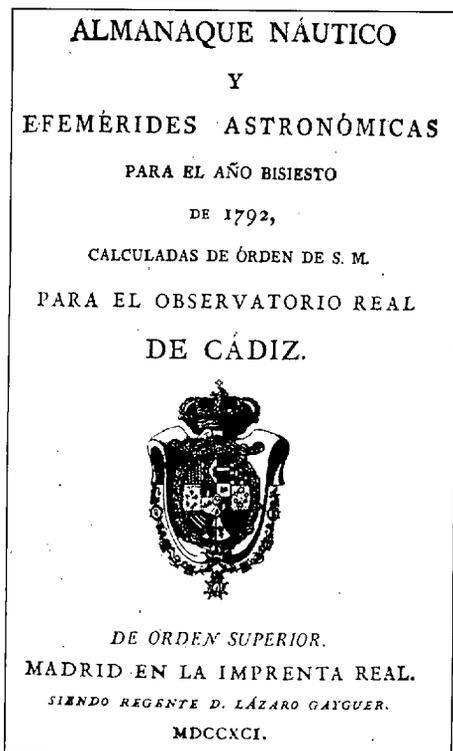


Figura 1.—Portada del primer *Almanaque Náutico*.

Marinas de Cádiz, propuso al marqués de la Ensenada la fundación del Observatorio Real de Cádiz, entre cuyas misiones estuvo desde sus orígenes el proporcionar «efemérides astronómicas precisas para el uso de los navegantes». Estas efemérides se publicaron como anexo del *Estado General de la Armada*, hasta que en 1792 se imprimen en Madrid el *Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas para el año bisiesto de 1792*, que es una de las primeras efemérides de carácter nacional que aparecen en la Historia. Desde entonces, esta publicación se ha realizado ininterrumpidamente adecuándose a los avances científicos y tecnológicos que se han ido produciendo a lo largo del tiempo. En la década de los setenta se popularizó el uso de calculadoras electrónicas, lo que motivó la aparición del *Almanaque Náutico Reducido*, que facilita los cálculos de su hermano mayor, el *Almanaque Náutico*, presentando fórmulas aproximadas útiles para su resolución mediante calculadoras de tipo científico.

El incremento de la presencia de buques españoles en aguas próximas a los círculos polares impulsó la edición en 1996 de un suplemento para la navegación en las latitudes extremas. El *Suplemento al Almanaque Náutico* facilita las horas de las salidas y puestas de Sol y el comienzo y fin de los crepúsculos para latitudes comprendidas entre 70° S y 60° S, y entre 60° N y 70° N, fenómenos que en el *Almanaque Náutico* sólo se presentan para las latitudes de 60° S y 60° N.

1679	Connaissance des Temps (Francia).
1767	The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris (Reino Unido).
1776	Berliner Astronomisches Jahrbuch (Alemania).
1791	Almanaque Náutico y Efemérides Astronómicas (España).
1855	The American Ephemeris and Nautical Almanac (Estados Unidos).
1923	Annuaire Astronomique (URSS).
1934	Efemérides japonesas (Japón).
1958	Efemérides y Almanaque Náutico (India).

Tabla 1.—Aparición de los primeros almanaques nacionales.

La paulatina introducción de la informática en prácticamente la totalidad de los aspectos de la vida cotidiana, y el hecho cierto de que el ordenador personal es un elemento más del cargo de los buques, nos han llevado a la total automatización de los cálculos que facilita el *Almanaque Náutico*, resultando en la reciente publicación ANdi, que además no presenta ninguna restricción en cuanto a la latitud del observador.

La entrada en escena del ANdi nos proporciona una pequeña excusa para recordar someramente algunos de los problemas astronómicos que trata el navegante y ciertas peculiaridades a considerar en el caso de altas latitudes.

El «haz» o los tres problemas básicos

Los problemas astronómicos que interesan al navegante (ortos y ocasos, pasos por el meridiano, etc.) están ligados con el movimiento diurno de los astros, cuya parte fundamental corresponde a la rotación de la Tierra. En el *Almanaque Náutico* la posición de los astros se proporciona mediante sus coordenadas ecuatoriales: la declinación (δ) y el Ángulo Sidéreo (AS) en el caso de las estrellas o la declinación y el horario (H) para los cuerpos del sistema solar. Sin embargo, el navegante al observar un astro mide su acimut (Z) y altura (a) en un sistema de referencia horizontal. Ambos sistemas coordinados se relacionan a través de un viejo conocido: el triángulo de posición, cuya resolución se efectúa mediante fórmulas que proporciona la trigonometría esférica y que a muchos de nosotros nos resultan familiares desde los tiempos de opositor en los que estudiábamos el Fossi.

Básicamente, los problemas astronómicos que trata el navegante pueden encuadrarse en uno de los siguientes casos:

- h:** Determinación de Z y a de un astro a una hora h .
- a:** Determinación de h y Z para una altura a de un astro.
- z:** Determinación de h y a para un acimut Z de un astro.

En el primer caso (**h**), el problema es directo y es el que hay que resolver, por ejemplo, para el cálculo del «mono» en la preparación de la observación. A partir de la hora h se obtiene el horario del lugar H de un determinado astro y se resuelve el triángulo de posición a partir de los datos conocidos: latitud, declinación y horario.

El segundo caso (**a**) es la determinación del paso de un astro por un almucantar, y en él se encuentran, por ejemplo, el cálculo de ortos y ocasos. En el tercer caso (**z**) se encuadrarían los pasos por el meridiano. Para estos dos últimos casos, el cálculo ya no se limita al problema directo, pues la obtención de la hora necesita una transformación de tiempo Sidéreo en tiempo Universal para las estrellas, mientras que para los otros astros, debido a la apreciable

variación de sus coordenadas ecuatoriales, procederá hacer un cálculo iterativo.

El caso **h** siempre tiene solución, puesto que el triángulo de posición siempre existe. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los casos **a** y **z**, que pueden no tener solución en una fecha determinada.

La no ocurrencia de un fenómeno en una fecha se puede dar por dos circunstancias claramente diferenciadas:

- 1.^a El intervalo entre dos fenómenos consecutivos es mayor que veinticuatro horas.
- 2.^a No se dan las condiciones geométricas necesarias.

Aunque también puede producirse para otros astros, el ejemplo más familiar de la primera circunstancia lo proporciona la Luna. Debido a las características de su movimiento orbital, el movimiento aparente de la Luna está afectado de un retardo que causa que, por ejemplo, en cada lunación haya un día en el que no se produce el paso de la Luna por el meridiano superior.

En relación a la segunda circunstancia, la tangencia del paralelo de declinación de un astro con un cierto almucantarat determina la condición geométrica límite para que ocurra el paso del astro por dicho almucantarat; en la tabla 2 se presentan los distintos casos posibles para el hemisferio Norte. Por ejemplo, en latitudes mediterráneas las estrellas de la constelación de la Osa Mayor son circumpolares. Así, Merak (β Ursae Majoris), que tiene una declinación próxima a $+56^\circ$, permanecerá siempre por encima del horizonte verdadero en latitudes superiores a 34° N, de acuerdo con el caso II de la tabla 2.

I	$\delta > \alpha + \theta$	No hay paso; el astro siempre tiene una altura mayor que α .
II	$\delta = \alpha + \theta$	El paso se produce en el meridiano superior del lugar.
III	$\alpha - \theta < \delta < \alpha + \theta$	Se producen dos pasos simétricos respecto al meridiano del lugar.
IV	$\delta = \alpha - \theta$	El paso se produce en el meridiano inferior del lugar.
V	$\delta < \alpha - \theta$	No hay paso, el astro siempre tiene una altura menor que α .

Tabla 2.—Pasos de un astro con declinación δ por un almucantarat de altura α para un observador en el hemisferio Norte con latitud ϕ ($\theta = 90^\circ - \phi$ es la colatitud).

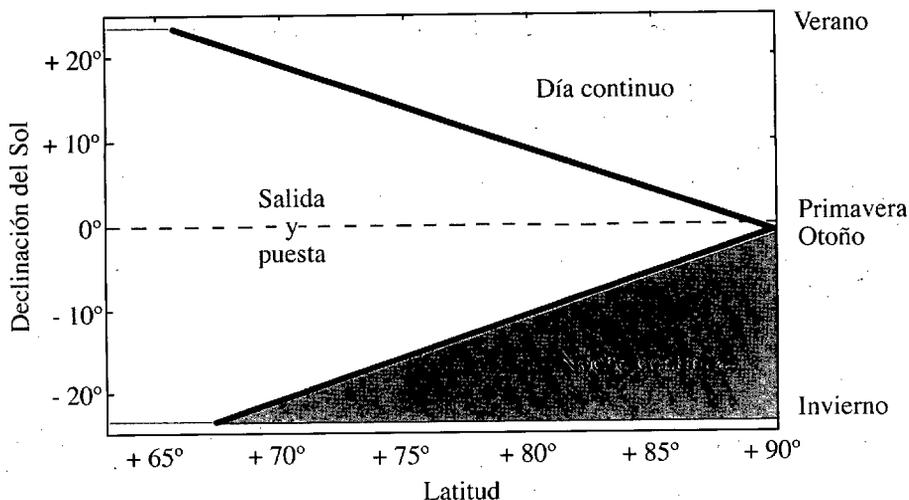


Figura 2.—Día y noche continuos en el hemisferio Norte.

De todos los casos de paso de un astro por un almucantarat, los más cotidianos son los crepúsculos y las salidas y puestas del Sol. Aunque no exhaustivamente (2), en lo que sigue analizaremos con más detalle estos casos.

No ocurrencia de ortos y ocasos de Sol: sus dónde y cuándo

Como muchos de nosotros memorizamos estudiando la *Enciclopedia Álvarez*, reeditada recientemente:

«En la tierra podemos distinguir cinco zonas climáticas principales: una *tórrida*, situada entre ambos trópicos; dos *templadas*, comprendidas entre los trópicos y los círculos polares, y dos *frías*, comprendidas entre los círculos polares y los polos.»

Posteriormente, aprendimos que esta división está motivada por la oblicuidad de la eclíptica, debido a la cual la declinación del Sol varía entre $\pm 23^{\circ} 27'$ aproximadamente (3).

(2) Un análisis detallado de todos los casos posibles se podrá encontrar en el *Boletín «ROA»*, que describe los fundamentos teóricos y algoritmos utilizados en el ANdi y que actualmente está en preparación.

(3) En puertas del tercer milenio, este valor está más próximo a $23^{\circ} 26'$, puesto que el valor real de la oblicuidad media se obtiene de la fórmula

$$\varepsilon = 23^{\circ} 26' 21''.448 - 46''.8150 T - 0''.00059 T^2 + 0''.001813 T^3,$$

Si adoptamos como valores extremos de la declinación del Sol los mencionados anteriormente, y considerando que, debido al semidiámetro solar y a la refracción terrestre (4), la salida y puesta del Sol se produce al paso por el almucantarat de $-50'$, en el hemisferio Norte delimitamos que las latitudes **donde** puede no producirse el fenómeno son las superiores a $65^\circ 43'$, en las cuales puede haber día continuo (caso I de la tabla 2); la noche continua puede darse en latitudes por encima de $67^\circ 23'$ (caso V de la tabla 2).

Obviamente, para aquellas latitudes donde se puedan producir, el día o la noche continuos, únicamente sucederán **cuando** el valor de la declinación del Sol sea el adecuado, dependiendo, por tanto, de la época del año. Las fechas y zonas para las que se produce la no ocurrencia de la salida y puesta del Sol se presentan en la figura 2.

También son de interés para el navegante los crepúsculos. El problema es idéntico al anterior; pero considerando ahora los almucantarates de altura -6° y -12° para los crepúsculos civil y náutico, respectivamente. Límites análogos a los obtenidos para la salida y puesta se obtendrán para la no ocurrencia del principio o fin de un crepúsculo, pudiendo suceder que sea crepúsculo continuo entre la puesta y la salida del Sol (caso análogo al día continuo) o que habiendo noche continua tampoco haya crepúsculo porque el Sol siempre está por debajo del correspondiente almucantarat.

Para una fecha en cuestión, si suponemos que la declinación del Sol permanece constante a lo largo del día, la ocurrencia de dichos fenómenos en una determinada situación se comprueba mediante un sencillo cálculo. Pero indudablemente la declinación varía.

El lío de los casos críticos

Siguiendo centrados en las salidas y puestas del Sol, si la declinación permaneciese constante a lo largo del día, la resolución del triángulo de posición con δ , ϕ y $\alpha = -50'$ como datos, nos proporcionaría directamente el horario del Sol. A partir del horario calculado, se obtendría la hora de ocurrencia del fenómeno. Sin embargo, al no ser constante la declinación del Sol, el triángulo de posición se resuelve tomando un valor promedio de la declina-

donde T es el intervalo en siglos de 36.525 días, contado desde las 12^h del 1 de enero del año 2000. Este valor debe corregirse además por nutación para obtener el valor de la oblicuidad verdadera.

(4) La depresión de $50'$ del horizonte se obtiene de considerar un valor constante de $16'$ para el semidiámetro solar y un valor estándar de $34'$ para la refracción terrestre. Este valor está internacionalmente aceptado, aunque el valor real puede verse muy afectado por las condiciones atmosféricas. Mientras que en el *Almanaque Náutico* las horas de salidas y puestas se presentan, suponiendo que el observador se encuentra al nivel del mar, en el ANdi el cálculo se realiza teniendo en cuenta la depresión del horizonte provocada por la elevación del observador.

ción para el día en cuestión. Así se obtiene una buena aproximación a la hora del fenómeno, la cual se mejorará mediante iteraciones.

El triángulo de posición tendrá o no tendrá solución dependiendo de los valores respectivos de la latitud del observador y de la declinación del Sol. Pero cuando estos valores son muy próximos a los límites de no ocurrencia (líneas oblicuas de la figura 2), la pequeña variación diaria de la declinación puede dar lugar al caso crítico de que en primera aproximación el triángulo de posición no tenga solución, aunque realmente sí se produzca el fenómeno, o viceversa: que en primera aproximación el triángulo de posición proporcione una solución, cuando realmente no hay fenómeno.

Por supuesto, que la transición entre un día con salida y puesta de Sol y el día o la noche continuos supondrá forzosamente la existencia de una fecha en la cual sólo se produce salida o puesta, respectivamente.

A todo lo anterior hay que añadir una complicación más. El movimiento horario del Sol no es constante debido a la inclinación de la eclíptica sobre el ecuador y a la pequeña excentricidad de la órbita de la Tierra. Este hecho motivó la introducción del «Sol medio», cuyo movimiento horario a lo largo del año es constante y en base al cual se define la escala de Tiempo Universal (5). La diferencia entre los horarios respectivos del Sol verdadero y del Sol medio es lo que se conoce como «ecuación de tiempo» (6), cuya manifestación más evidente para el navegante es la variación de la hora de la meridiana.

La ecuación de tiempo es además la causante de que en ciertas latitudes se pueda producir un doble fenómeno, tal y como se ilustra en la figura 3. Sugérimos a los posibles usuarios del ANdi que comprueben los «Fenómenos de Sol y Luna» que se producen el 25 de julio de 1998 en situación $69^{\circ} 25.5' N$, $0^{\circ} E$, al nivel del mar y zona horaria 0.

¿Tiene lo anterior alguna utilidad práctica para el navegante? Posiblemente no; sin embargo, el hecho de poder calcular correctamente estas curiosidades astronómicas nos ha servido como una excelente comprobación de la fiabilidad, tanto de los algoritmos desarrollados como de los programas diseñados.

A modo de conclusión

La evidente necesidad de adecuarse a los tiempo ha llevado a urgir la puesta en circulación de una primera versión del ANdi. Esta versión, que utilizan-

(5) Debido a las irregularidades en la rotación de la Tierra, el Tiempo Universal tampoco es una escala uniforme. La vida diaria está regulada por el Tiempo Universal Coordinado que se genera a partir de patrones atómicos. Explicaciones más detalladas de las distintas escalas de tiempo pueden encontrarse en el Glosario del *Almanaque Náutico 1998* (págs. 425 y siguientes).

(6) La ecuación de tiempo se define en realidad como la diferencia entre las ascensiones rectas del Sol medio y verdadero. En libros de texto antiguos se definía esta cantidad con signo contrario al indicado; tal es el caso del texto de *Astronomía y Navegación*, de Moreu Curbera y Martínez Jiménez.

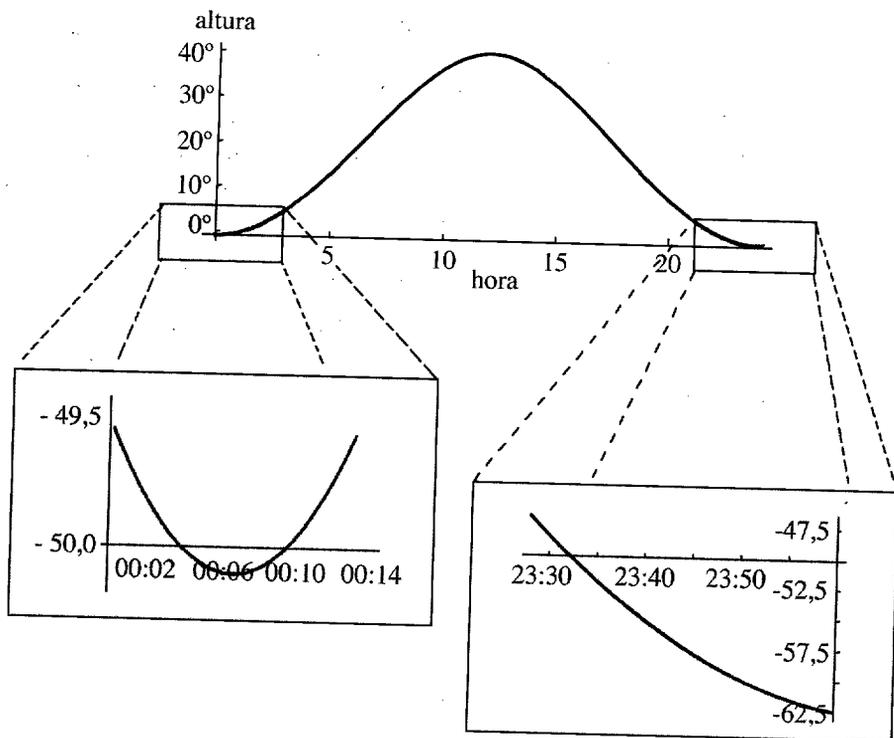


Figura 3.—Variación de la altura de Sol, según se observa en una latitud de $69^{\circ} 25.5' N$, el día 25 de julio de 1998. Nótese la ocurrencia de una doble puesta a $0^{\text{h}} 4^{\text{m}}$ y a $23^{\text{h}} 32^{\text{m}}$ aproximadamente. La ecuación de tiempo para el día en cuestión es de +6.5 minutos.

do la jerga informática podríamos denominar «beta», se pretende completar y mejorar en futuras entregas.

El criterio que ha primado en el diseño de la aplicación informática ha sido el conocido como R3 (*reliable, robust and relaxing*) y que nos permitimos traducir como F3: fidedigna, fuerte y fácil de utilizar. El test fundamental que representará el empleo cotidiano por parte de los usuarios permitirá depurar tanto posibles errores de programación como carencias o simples incomodidades de uso.

Desde el punto de vista legal, el ANdi no reemplaza al *Almanaque Náutico*: de acuerdo con el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, 1974, los buques, a partir de cierto porte, están obligados a poseer, tanto un sextante como alguna publicación de las características del *Almanaque Náutico*, para reducir las observaciones.

La evolución actual de los mecanismos de distribución de la información nos lleva a pensar que en breve las futuras versiones y actualizaciones del

ANdi podrían ser distribuidas directamente a través de las modernas redes informáticas de comunicaciones.

Frente a otros programas comerciales (más espectaculares pero, en ocasiones, sin la precisión requerida en los problemas de navegación astronómica), si finalmente el ANdi «se usa», será un motivo de satisfacción para sus autores, uno de los cuales ha tenido ya el placer de observar cómo «navegaba» de menú en menú su madre, a la que le gusta presumir de abuela y con la que aprendió su primera lección de astronomía, reconociendo la llegada de la primavera por la posición del Sol al salir tras el monte de Ancos.

Teodoro LÓPEZ MORATALLA



Martín LARA COIRA

