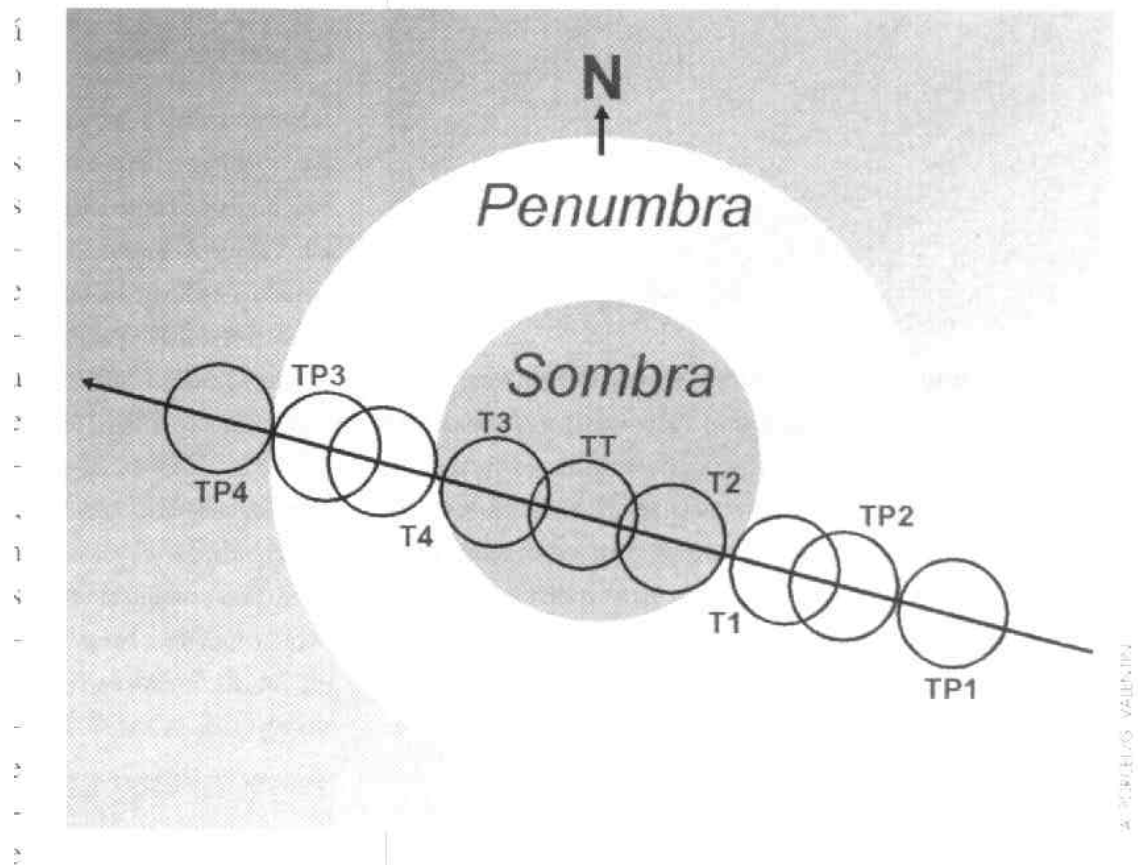


FOTOGRAFÍA DE ECLIPSES TOTALES DE LUNA.

Técnicas y aplicación al cálculo de la magnitud fotográfica de la Luna.

Aniceto Porcel Rosales.

La Fotografía de eclipses totales de Luna, al contrario que en otros casos de fotografía astronómica, es sencilla y no requiere el concurso de gran cantidad de instrumentos. Este artículo pretende aprovechar esta característica para incentivar su utilización de una forma rigurosa y adecuada, con lo que obtendremos unos resultados científicamente útiles.



El presente trabajo está basado en el seguimiento de los últimos eclipses totales de Luna ocurridos desde 1986. Los fracasos en unos casos, y los aciertos en otros, debidamente analizados, arrojan conclusiones de interés para futuros eclipses. Aunque en algunos puntos es aplicable a eclipses no totales, en general la aplicación de las técnicas descritas está diseñada para los totales.

En primer lugar veremos la forma adecuada de obtener negativos técnicamente correctos, o lo que es lo mismo, que se ajusten a la realidad objetiva del fenómeno observado. Llegados a este punto dispondremos de una herramienta de la cual es posible extraer datos de sumo interés, entre los que nos vamos a centrar en el cálculo de la magnitud fotográfica de nuestro satélite.

CARÁCTER GENERAL DE LOS ECLIPSES TOTALES DE LUNA (ETL)

Un eclipse de Luna se produce cuando la Tierra se sitúa entre nuestro satélite y el Sol. Dado que el plano de la órbita lunar está inclinado $5^{\circ} 9'$ con respecto a la eclíptica, este fenómeno no se da en cada oposición, ya que por dicha inclinación la Luna pasa por encima o por debajo de] cono de sombra producido por la Tierra.

Sólo cuando el centro del satélite coincide con el eje del cono de sombra de nuestro planeta se produce un eclipse total de Luna de máxima duración. Si estos centros están ligeramente desplazados, la duración se reduce hasta el punto que puede que nuestro satélite no penetre completamente en el cono, dándose en este caso un eclipse parcial.

Respecto al cono de sombra se pueden distinguir dos zonas bien diferenciadas: la *penumbra* y la *sombra* propiamente dicha. La primera es la parte más exterior, siendo menor su capacidad de oscurecimiento que la de la sombra, que es la parte más interior y oscura. En el gráfico N° 1 se ve claramente la situación de un eclipse total en el que la Luna pasa algo alejada del centro del cono, no obstante, está lo suficientemente cerca de éste para que se dé un ETL, aunque no de máxima duración.

Gráfico 1 Esquema de un eclipse total de Luna y sus distintas fases

RECOMENDACIONES GENERALES

1. Películas fotográficas

Es conveniente utilizar emulsiones de sensibilidad media baja en las películas de diapositiva en color, sobre todo si se dispone de seguimiento. Salvo para alguna aplicación especial se desaconseja una alta sensibilidad. Una buena opción puede ser 100ASA.

2. Arqueamiento de exposiciones

Por *arquear* se entiende la realización de varias tomas fotográficas en torno a una central que tomamos como supuestamente correcta. Tengamos en cuenta lo variables que pueden ser las condiciones geométricas de diferentes eclipses y, sobre todo, las diferencias en el estado de la atmósfera terrestre. Un cálculo válido para un determinado eclipse puede variar substancialmente para otro, con lo que es posible que la exposición estimada no sea la más satisfactoria. En general los parámetros más influyentes en las variaciones de luminosidad y color son:

- *Profundidad del eclipse*: Básicamente éste es un factor de dependencia geométrica, siendo posible conocerlo de antemano con unas efemérides adecuadas.

- *Estado de la atmósfera terrestre*- Tiene dos vertientes diferenciadas. Por un lado, la del estado global de la atmósfera que influirá no sólo en la oscuridad del eclipse, sino también en la coloración que tome el disco lunar. En este sentido fenómenos tales como las erupciones volcánicas recientes pueden alterar el aspecto de la Luna, sobre todo en la totalidad. Por otro lado, la del estado de la misma a nivel local, la cual también se debe tener en cuenta (transparencia, *seeing*, etc.).

- *Altura de la Luna sobre el horizonte*: Obviamente no es lo mismo captar la superficie lunar cerca del horizonte que muy alta sobre el mismo. Esto está en cierto modo ligado al punto anterior y afecta fundamentalmente a la coloración de nuestro satélite. Durante los eclipses muy largos, la Luna correrá un trayecto muy significativo, con lo que la tendremos en alturas muy diversas.

- *Diferencias de albedo*: El disco lunar nos ofrece índices de albedo muy variables, sobre todo **por la distinta composición** geológica de los denominados *mares* y *tierras*. Así, las diferencias geométricas de los eclipses harán que la sombra terrestre cubra porciones de su superficie que, en conjunto, tendrán brillos diferentes. Es un dato a tener en cuenta cuando las fracciones no cubiertas (o recién descubiertas) son pequeñas

Todo este conjunto de factores dificulta claramente cuando pretendemos estimar los tiempos de exposición adecuados, de aquí la utilidad de arquear suficientemente para asegurar que la toma correcta esté comprendida en el rango de exposiciones utilizadas.

AJUSTE DE LA EXPOSICIÓN PARA LA SUPERFICIE CUBIERTA Y NO CUBIERTA

Dado que la Luna durante el eclipse se va introduciendo paulatinamente en el cono de sombra proyectado por la Tierra y que el disco lunar nos muestra un diámetro apreciable, éste requiere distintas exposiciones para la zona iluminada y la oscura.

Así, si queremos obtener una toma correcta para la porción aún no cubierta por la sombra, la exposición adecuada prácticamente no registrará nada de la zona oscura. Por el contrario, las exposiciones calculadas para la zona oscura nos mostrarán la parte de la Luna que haya quedado sobreexpuesta (la cual adquirirá una característica forma de bellota), mientras que el resto proporcionará detalles en el color que adquieren durante el eclipse.

Estas exposiciones dobles (para ambas zonas) se hacen especialmente convenientes a partir de que la Luna esté cubierta en un 50% por la sombra terrestre. Por lo general, la parte oscura requiere un factor de cinco o seis veces (mínimo) más de exposición que la no cubierta aún por la sombra. Aunque en realidad, esto depende del eclipse, por lo que es obvio que en este caso también es conveniente arquear.

CONTACTOS INICIALES CON LA PENUMBRA Y LA SOMBRA

Respecto de la penumbra, apenas tiene incidencia en la exposición si la Luna está o no dentro de ella, ya que normalmente sólo una débil coloración nos pone de manifiesto que el disco lunar se ha introducido en ella.

La sombra es otra cuestión, pues es mucho más oscura. Es interesante resaltar que la medición de contactos cuando la Luna se dispone bien a entrar o bien a salir de esta región es un tanto ambigua, pues es de difícil percepción visual. La fotografía es un buen auxilio, ya que en la película estos instantes se marcan con una manifiesta nitidez, por lo que si planificamos con cautela los tiempos de realización de las fotografías, posteriormente éstas pueden servir para el cálculo de contactos. Secuencias con este fin pueden ser muy útiles.

INSTRUMENTAL

Como se comprobará al observar la tabla 1, la fotografía lunar se caracteriza por cortos tiempos de exposición o, lo que es lo mismo, fotografías instantáneas. Obviamente durante un eclipse total de Luna esta situación cambia. Así, tenemos que en la fase de totalidad las exposiciones serán del orden de segundos.

Con una focal de 400 mm ya se puede conseguir un diámetro aceptable del disco lunar. Con esta relación local, hemos de tener la precaución de utilizar un cable disparador y un sólido trípode siempre que las exposiciones superen 1/60 de segundo. Por otro lado, se puede prescindir del seguimiento del astro si no sobrepasamos los 4". Más allá de este tiempo la Luna nos saldrá movida. Con focales superiores a 400 mm este tiempo se acorta. El seguimiento, aunque no es imprescindible si no utilizamos telescopio, es aconsejable.

CÁLCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN (TE) A continuación se muestra una tabla de exposiciones recomendadas para la Luna fuera del eclipse (también válida en la penumbra) en función del número fl de nuestro sistema y de la sensibilidad de la película utilizada.

En general para focales menores de 500 mm hay que forzar ligeramente el tiempo de exposición (TE), entre +0,5 y +1 punto, sobre todo a partir de la fase F3 (inclusive). Si utilizamos película negativa para copias en papel, la loma de referencia para la "Luna Llena" podrá dar buenos resultados reduciendo un punto el tiempo de exposición.

Respecto de la simetría de entrada y salida de la sombra, ésta no tiene por qué ser exacta a efectos del TE, no obstante, los resultados obtenidos tomándola como se ha descrito han sido satisfactorios. En este caso, de nuevo la geometría del eclipse es significativa.

TABLA I: EXPOSICIONES RECOMENDADAS PARA LA LUNA LLENA (NO ECLIPSADA) EN SEGUNDOS.

ASA	f/6,3	f/10	f/15
32	1/125	1/60	1/15
50	1/250	1/125	1/30
100	1/500	1/250	1/60
200	1/1000	1/500	1/125
400	1/2000	1/1000	1/250
1000	1/4000	1/2000	1/500

Estos tiempos deben ser corregidos para cada fase del eclipse, según el factor c del que luego hablaremos.

CORRECCIONES DE EXPOSICIÓN (C) PARA LAS DISTINTAS FASES DEL ECLIPSE

Los coeficientes c que aplicamos a cada instante del eclipse corresponden al aumento de exposición en puntos o pasos del obturador. Es conveniente probar todas las tomas aconsejadas (arquear) para las diferentes fases, así, más adelante, podremos valorar la más adecuada.

A partir de la fase F3 (Luna cubierta en un 50% aprox.) debemos optar por realizar tomas calculadas para registrar la parte cubierta por la sombra. También en este caso es conveniente arquear. Para registrar la totalidad, por término medio hemos de dar unos doce o trece puntos más que su valor correspondiente para la Luna Llena. Todos estos valores son dependientes de la oscuridad del eclipse, por lo que son orientativos (están calculados para un eclipse de mediana oscuridad) y deberán ser variados para cada caso concreto. No obstante, se puede afirmar que son bastante indicativos, sobre todo gracias al gran "margen de latitud- de las emulsiones actuales (capacidad de una película de tolerar exposiciones no correctas sin detrimento significativo de la imagen), amén de que con el arqueado de exposición se cubren prácticamente todas las situaciones posibles.

Veamos un ejemplo de su utilización. Así, para una película de 100 ASA, y un valor f/6,3, la Luna fuera del eclipse requiere una exposición de 1/1500 de segundo (tabla I). Las exposiciones requeridas son las siguientes:

FASE		EXPOSICIÓN	OBSERVACIONES
Fase L0	(0, +1)	1/500 , 1/250 de seg.	Luna llena antes del eclipse
Fase F1	(0, +1)	1/500, 1/250 de seg.	
Fase F2	(0, +1)	1/500, 1/250 de seg.	
Fase F3	(0, +1, +2)	1/500, 1/250 , 1/125 de seg.	
Fase F4	(+1, +2, +3)	1/250, 1/125 , 1/60 de seg.	
Fase F5	(+4, +5, +6)	1/30, 1/15 , 1/8 de seg.	Última luz
Fase T6	(+11, +12, +13)	4", 8" , 16"	Totalidad
Fase F7	(+4, +5, +6)	1/30, 1/15 , 1/8 de seg.	Primera luz
Fase F8	(+1, +2, +3)	1/250, 1/125 , 1/60 de seg.	
Fase F9	(0, +1, +2)	1/500, 1/250 , 1/125 de seg.	
Fase F10	(0, +1)	1/500, 1/250 de seg.	
Fase F11	(0, +1)	1/500, 1/250 de seg.	
Fase L0	(0, +1)	1/500 , 1/250 de seg.	Luna llena después del eclipse

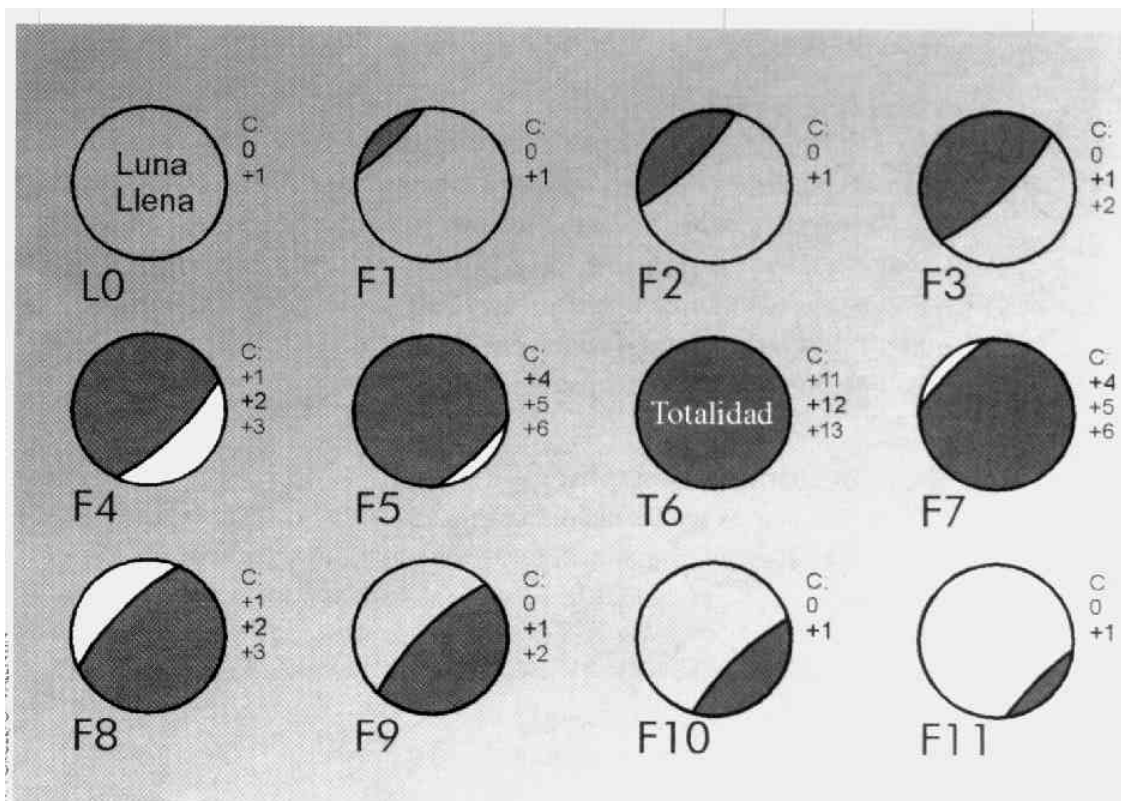


Gráfico 3 Distintas fases de un ETL con el valor correspondiente al factor de corrección *c*. En negrita se resalta el valor ideal. Después de la fase F 11 volveríamos a la situación inicial, es decir, a la fase L0.

CÁLCULO DE LA MAGNITUD FOTOGRAFICA

Una vez que disponemos de secuencias fotográficas de las que podemos extraer tomas correctamente expuestas, podemos calcular a partir de éstas la magnitud fotográfica de la Luna durante el eclipse. Para ello sólo nos basta conocer los tiempos de exposición de las tomas sobre las que vamos a estimar la magnitud, así como el tiempo de exposición dado a una toma expuesta correctamente de la Luna antes de comenzar el eclipse.

1. Explicación del método

Hemos de tener en cuenta que el sistema que vamos a describir requiere sólo variaciones en los TE y no en el número *f*/o abertura, así el diafragma del objetivo fotográfico, o diámetro del telescopio, debe variar de unas tomas a otras.

La escala de tiempos de exposición de las cámaras fotográficas funciona de forma que la variación de un punto significa una reducción o aumento del TE al doble. Así, 1/60 de segundo es el doble de exposición que 1/125 de segundo y la mitad que un 1/30. Este hecho posibilita conocer cuánto hemos aumentado la exposición hasta conseguir una toma correcta de la Luna eclipsada, o lo que es lo mismo, la reducción del flujo luminoso procedente del satélite desde momentos antes del eclipse hasta el momento de la toma fotográfica.

La escala habitual de TE que encontramos en las actuales cámaras fotográficas es la siguiente: SENTIDO DEL AUMENTO DE EXPOSICIÓN (+): 1/4000, 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/60, 1/30, 1/15, 1/8, 1/4, 1/2, 1", 2" y 4", SENTIDO DE LA DISMINUCIÓN DE EXPOSICIÓN (-) siendo activados los tiempos más largos en la posición **B**.

Como hemos visto, cada paso hacia delante o atrás significa una duplicación o reducción del TE. De esta forma, sólo nos basta contar cuántos pasos nos hemos desplazado en la escala (en nuestro caso hacia delante) a partir del TE dado a la Luna fuera del eclipse hasta la exposición a la cual queremos calcular la magnitud.

La tabla 11 nos da este valor directamente, sólo basta buscar en el eje de abscisas (u ordenadas) el TE para la Luna fuera del eclipse y en el de ordenadas (o abscisas) el TE que hemos dado en un momento dado y así obtendremos el valor correspondiente. Si pasamos de TE mayores a otros menores, el guarismo obtenido debe ser interpretado como negativo.

TABLA II: DISTANCIAS DE LOS TE (NÚMERO NP) PARA EL CÁLCULO DE LA MAGNITUD LUNAR EN ECLIPSES TOTALES DE LUNA.

	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1"	2"	8"	16"	
1/4000	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1/2000	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1/1000	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1/500	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1/250	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/125	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1/60	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1/30	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1/15	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1/8	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
1/4	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6
1/2	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
1"	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4
2"	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3
4"	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2
8"	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1
16"	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4			1	0

Al número de pasos lo denominamos Np .

Si $Np > 0$, lo que obtenemos es la disminución de la intensidad luminosa respecto del valor de referencia. Si $Np < 0$, se tiene que $2NP = 1/2NP$, de esta forma el valor hallado representa la intensidad respecto al valor de referencia. En nuestro caso $Np > 0$, así con la relación $I_2 = 2^{Np}$, obtenemos en cuánto disminuye la intensidad del flujo luminoso (I_2), respecto de la exposición de la Luna fuera del eclipse. Veamos un ejemplo:

Primer ejemplo:

Supongamos que la exposición dada a nuestro satélite unos minutos antes de comenzar el eclipse fue de 1/250 de segundo y que en el centro de la totalidad la exposición correspondiente fue de 16 segundos. Si consultamos la tabla II nos da un valor para $Np = 12$, luego

$$I_2 = 2^{NP} = 2^{12} = 4.096$$

En el caso de que efectuemos exposiciones intermedias (sólo posibles a partir de 1") a las descritas, el cálculo se complica ligeramente, ya que la escala de TE puede expresarse como una función lineal, es decir, si la representamos gráficamente obtendremos una recta que variará en función de los valores de partida. En esta situación I_2 viene expresado por $f(x) = \alpha * x$, donde x es el valor correspondiente al TE sobre el que estamos calculando y α es la disminución de intensidad (I_2) del TE de 1" respecto al TE dado a la Luna fuera del eclipse.

Segundo ejemplo:

Si tenemos un TE dado a la Luna fuera del eclipse de 1/60" y un TE sobre el que queremos calcular la magnitud de 14,35", si consultamos la tabla II para 1/60 hasta 1" obtenemos para $N_p = 6$, si sustituimos los valores en la fórmula tendremos que:

$$I_2 = 2^{N_p} = 2^6 = 64$$

por lo tanto $\alpha = 64$, de aquí

$$I_2 = f(x) = \alpha * x = 64 * 14,35 = 918,4$$

El valor obtenido para 12 nos posibilita obtener la magnitud fotográfica de la Luna. Para ello utilizaremos la *ecuación de Pogson*

$$I_1 / I_2 = 2,512^{m_1 - m_2}$$

de aquí despejamos m_2 ,

$$M_2 = M_1 - ((\log I_1 - \log I_2) / \log 2,512)$$

donde m , es la magnitud fotográfica de la Luna Llena antes del eclipse (-12,8), I_1 es la intensidad luminosa emitida por la Luna antes del eclipse que corresponde con la toma de la que partimos y cuyo valor tomamos como 1 (2^0), I_2 es la disminución de intensidad respecto de la exposición de referencia cuyo valor hemos hallado por el método descrito Y M_2 es la magnitud fotográfica de la Luna en el instante calculado.

2. Variación de la magnitud fotográfica en función del tiempo

Si las secuencias fotográficas son realizadas de forma uniforme durante el eclipse, podemos realizar una curva que nos muestre la evolución de la magnitud con el tiempo. Para ello hemos de planificar previamente la separación entre secuencias que, lógicamente, irá en función de la duración del eclipse.

Hay que tener en cuenta que el método descrito tiene unos márgenes de error dependientes de la estimación de las tomas adecuadas. En este sentido, la realización de una curva de luz tiene la ventaja de mostrarnos el comportamiento global de la Luna en función de la geometría propia del eclipse y del estado de la atmósfera terrestre, minimizando el peso de los márgenes de error de los cálculos de magnitud.

3. Errores y alcance del método

El problema principal del método estriba en hallar la exposición correcta posteriormente al eclipse. De esta forma, si tomamos como buenas las fotografías que no lo son, adjudicaremos tiempos de exposición mayores o menores, según nos desplazemos en la escala hacia delante o hacia atrás, es decir, escoger tomas sobreexpuestas o subexpuestas. El error cometido es aproximadamente el siguiente:

Para ± 1 TE.... $\pm 0,4$ magnitudes

Para ± 2 TE $\pm 0,8$ magnitudes

Es aconsejable que no pase demasiado tiempo entre la realización de las fotos y la elección de las correctas. Se hace obvio que para la exposición dada a la fotografía de la Luna antes del eclipse hemos de tener sumo cuidado, pues ésta va a ser la que utilizemos de referencia para todo el proceso. Se puede realizar una exposición a la Luna una vez haya finalizado el eclipse y utilizarla también como exposición de referencia promediándola, si es necesario, con la primera.

A pesar de los problemas descritos, mi experiencia es la de que si procedemos con cuidado el método es útil, aunque dado que sólo ha sido utilizado plenamente en algunos pocos eclipses totales de Luna, en un futuro se deberá probar en función de perfeccionarlo con nuevos datos y experiencias.

Sería interesante que más observadores ayuden a afinar el método con sus ideas y observaciones.

Todo aquel interesado puede ponerse en contacto con el autor a través de la dirección postal de la Sociedad Astronómica Granadina, apartado de correos 195, 18080 - Granada.*

MAGNITUD A PARTIR DEL NÚMERO DE DANJON

Aunque este **punto queda fuera** de los objetivos del presente artículo, es una interesante vía de investigación respecto del problema del cálculo de la magnitud, en este caso visual, de la Luna. El sistema, ideado por John E. Westfall, tiene su origen en la deducción de una ecuación por mínimos cuadrados a partir de treinta eclipses totales y parciales. La ecuación obtenida relaciona el *número de Danjon* con la magnitud aparente de nuestro satélite. Ésta es la siguiente:

$$V = (2,87 \pm 0,61) - (1,852 \pm 0,279) L$$

donde L es el número de Danjon y V la magnitud visual de la Luna.

La mencionada ecuación puede ser mejorada a partir de una muestra más significativa tanto de eclipses futuros como de históricos de los que se tengan datos fiables del número de Danjon.