

*Departamento de Astrofísica y
Ciencias de la Atmósfera*



TRABAJO ACADÉMICAMENTE DIRIGIDO
*Constantes fotométricas del
observatorio de la UCM*



*Ángel Ruiz Camuñas
CURSO 2003-2004*

*Dirigido por:
Jaime Zamorano Calvo
Jesús Gallego Maestro*

Índice general

Lista de Figuras	4
1. Introducción	5
2. Instrumentación	6
2.1. Telescopio	6
2.2. Fotómetro	7
2.3. MeCO	7
3. Técnicas de observación	9
3.1. Fotometría absoluta	9
3.1.1. Fundamento teórico	9
3.1.2. Estrellas de referencia	11
3.1.3. Utilizando el fotómetro	12
3.2. Fondo de cielo con MeCO	12
4. Observaciones	14
4.1. Fotometría absoluta con SSP-3	14
4.1.1. Proceso de toma de datos	14
4.1.2. Datos obtenidos	14
4.2. Brillo de cielo con MeCO	21
4.2.1. Mapeado de cielos	21
4.2.2. Curvas de luminosidad al atardecer	22
5. Reducción de datos	24
5.1. Fotometría absoluta con SSP-3	24
5.1.1. Resumen	30

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
5.1.2. Errores	31
5.2. Brillo de cielo con MeCO	32
5.2.1. Mapeado de cielo	32
5.2.2. Curvas de luminosidad al atardecer	36
6. Conclusiones	38
Bibliografía	40

Lista de Figuras

2.1. Telescopio utilizado: Meade LX200.	6
2.2. Mando de control del telescopio.	7
2.3. Fotómetro Optec SSP-3.	8
2.4. Medidor de Cielo Oscuro.	8
3.1. Modelo de capas planoparalelas para la atmósfera.	10
3.2. Recta de Bouger para medidas en filtros B y V.	11
3.3. Manejo de MeCO. Izquierda: demasiado brillante. Centro: demasiado débil. Derecha: ajuste perfecto.	13
5.1. Convertidor de coordenadas de XEphem.	24
5.2. Datos de la observación del 23 de Junio. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.	25
5.3. Datos de la observación del 24 de Junio. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.	26
5.4. Datos de la observación del 15 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.	27
5.5. Datos de la observación del 17 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.	28
5.6. Recta de Bouger con la corrección de color para el filtro B.	29
5.7. Datos de la observación del 20 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.	29
5.8. Recta de Bouger con la corrección de color para el filtro B.	30
5.9. Mapa de brillo de cielo del observatorio de Yebes (Guadalajara).	33
5.10. Mapa de brillo de cielo de Madrid desde el observatorio de la UCM en una noche sin luna.	34
5.11. Mapa de brillo de cielo de Madrid desde el observatorio de la UCM en una noche con luna.	35
5.12. Evolución del brillo de cielo al atardecer.	36
5.13. Evolución del brillo de cielo al atardecer.	37

Capítulo 1

Introducción

Todo sistema fotométrico se ve caracterizado por dos parámetros. Uno de ellos depende de las condiciones atmosféricas del momento de la observación. Se denomina coeficiente de extinción. El otro depende del sistema de observación utilizado y se conoce como constante instrumental. Ambos parámetros reciben el nombre de constantes fotométricas.

Nuestro propósito en este trabajo es obtener estas constantes para el observatorio de la UCM. Queremos caracterizar el sistema formado por el telescopio de la Cúpula Este y el fotómetro fotoeléctrico del departamento.

Para ello utilizaremos técnicas de fotometría absoluta con estrellas estándar de magnitud aparente bien conocida. Debemos escoger una muestra de estrellas que sean fácilmente localizables en el momento de las observaciones y cuya variación de luminosidad sea mínima.

Otro de los objetivos de este trabajo es la medición del brillo de cielo en Madrid mediante MeCO. La contaminación lumínica es un grave problema de las sociedades industrializadas modernas. Aparte del gran inconveniente que supone para las observaciones astronómicas, la iluminación indiscriminada y sin criterio en las ciudades supone un derroche irresponsable de energía, además de perturbar los ciclos biológicos de numerosas especies, incluidos los seres humanos.

Aunque muy lentamente las administraciones se van concienciando del problema, veremos con nuestras observaciones la escasa calidad del cielo de Madrid y como influye en otros lugares de observación.

Este trabajo es una continuación de los realizados por Francisco Javier Sanchez Muñoz (*Medida de las Constantes Fotométricas del Observatorio de la UCM*) y Luis Alejandro Ramírez González (*Medida de la Luminosidad de Fondo de Cielo del Observatorio de la UCM*) durante el curso 2000-2001.

Capítulo 2

Instrumentación

2.1. Telescopio

Aunque en principio se planeó utilizar el Celestron C11 de la Cúpula Oeste, finalmente optamos por el Meade LX200 Schmidt-Cassegrain de la Cúpula Este. Es un telescopio de 12 pulgadas (30.5 cm) y una distancia focal de 305 cm a foco primario, lo que supone una relación focal $f/10$. Dispone de montura ecuatorial en horquilla y motor de seguimiento.



Figura 2.1: Telescopio utilizado: Meade LX200.

Hay dos modos de apuntar el telescopio. Se puede hacer realizar manualmente, mediante los cursores del mando de control (ver fig.2.2). Las teclas N-S permiten moverlo en declinación y las teclas E-W en ascensión recta. Tiene cuatro velocidades de movimiento para poder hacer ajustes finos.

También dispone de un sistema de apuntado automático con distintos modos de uso. Pueden introducirse

las coordenadas de la estrella en el mando de control y el telescopio se orientará automáticamente en esa dirección. También puede seleccionarse el nombre del objeto entre los disponibles en el catálogo que contiene. O, por último, tecleando el código SAO de la estrella.

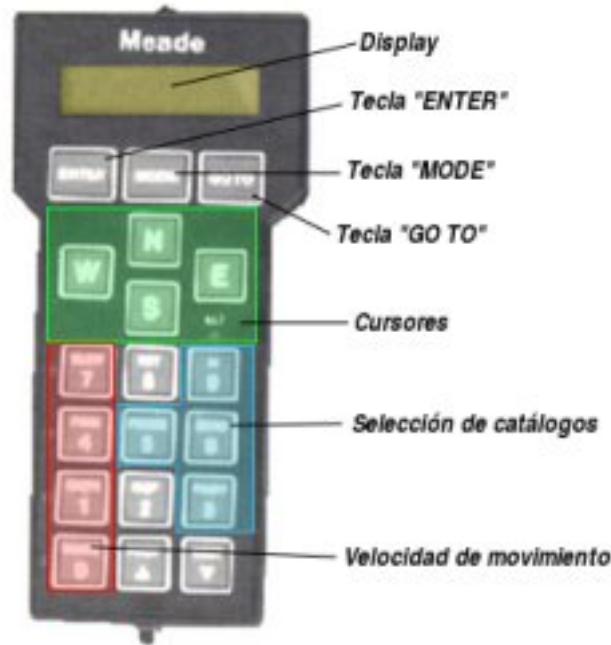


Figura 2.2: Mando de control del telescopio.

Esta última característica fue el factor decisivo para escogerle. De este modo podríamos dedicar la mayor parte del tiempo de observación a tomar las medidas necesarias y perderíamos muy poco tiempo en localizar los objetos elegidos.

2.2. Fotómetro

Utilizaremos el fotómetro Optec, Inc. SSP-3 que posee el departamento. Es un detector de estado sólido basado en un fotodiodo de silicio. Su manejo es muy simple y resulta fácilmente transportable. Funciona con una batería o enchufado a la red eléctrica. Su principal ventaja es su amplio rango dinámico. Mide de forma lineal en un rango de 10^6 a 1.

Este fotómetro dispone de un juego de filtros B y V, bandas en las que realizaremos las medidas. El detector junto con los filtros que le acompañan tienen una respuesta ligeramente distinta a los del sistema de Johnson original, tal y como puede consultarse en el manual.

2.3. MeCO

El MeCO¹ es un aparato inspirado en el artículo "A Simple Dark-Sky Meter" de la revista Sky&Telescope de Febrero del 2001, construido para el departamento por Luis Alejandro Ramírez González. Es un instrumento que permite realizar medidas de brillo de cielo de una forma simple y rápida.

¹Medidor de Cielo Oscuro

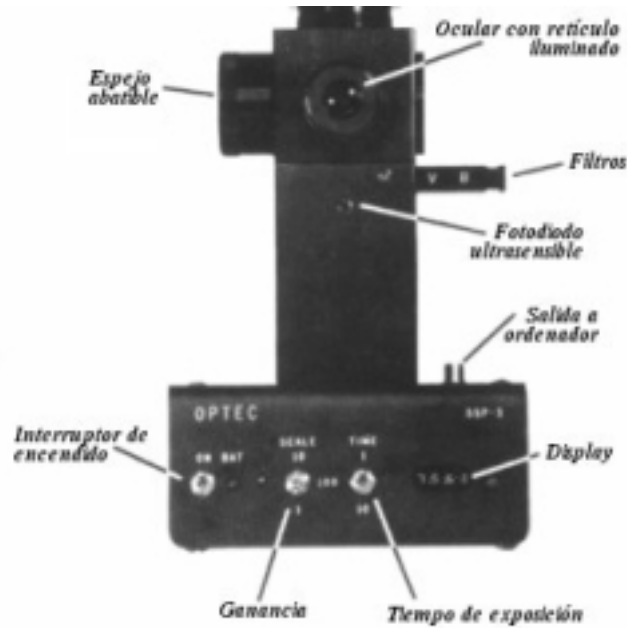


Figura 2.3: Fotómetro Optec SSP-3.

Consta de un tubo con un ocular. En el extremo opuesto se ha colocado un filtro verde y un led. La luminosidad del led se controla mediante un reostato. El sistema se alimenta con una batería de 9V. El circuito se cierra con un amperímetro que nos permite saber la corriente que circula por el led.

Es un aparato sencillo pero muy útil. Si bien las medidas no son precisas, dan una muy buena idea del brillo de cielo de un lugar con muy poco esfuerzo. Se puede transportar fácilmente. Ésto, unido a su manejo simple, nos facilita realizar medidas fuera del observatorio.

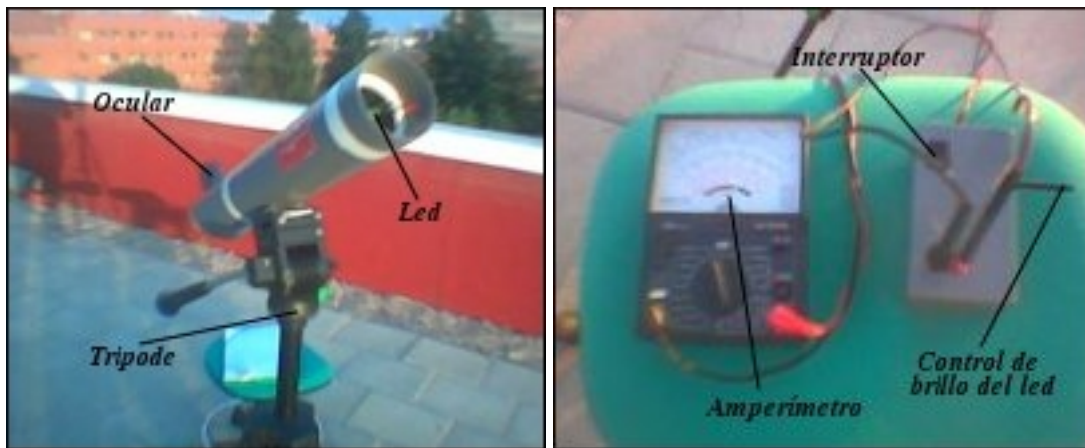


Figura 2.4: Medidor de Cielo Oscuro.

Capítulo 3

Técnicas de observación

3.1. Fotometría absoluta

Cuando se realizan medidas fotométricas hay dos importantes factores que influyen en el resultado. El primero es el dispositivo de detección. Cada conjunto de telescopio, filtros y detector tiene una respuesta diferente para una misma señal recibida.

El segundo factor es la atmósfera terrestre. La capa de aire que rodea nuestro planeta actúa como un filtro para la radiación. La luz emitida por las estrellas se ve atenuada al atravesar la atmósfera. Así, el flujo medido en tierra en una determinada banda fotométrica depende de la transparencia de la atmósfera (que varía con la longitud de onda, de una noche a otra y de un lugar a otro) y del recorrido total de la luz en la atmósfera (cuanto mayor sea la masa de aire atravesada por la radiación, mayor será la extinción).

La fotometría absoluta es un método observacional que nos permite determinar de un modo cuantitativo estas dependencias. La primera de ellas se recoge en la denominada **constante instrumental** y la segunda mediante el **coeficiente de extinción**. La idea consiste en observar estrellas de magnitud bien conocida. A partir del flujo fotométrico medido y la altura de la estrella durante la observación se puede trazar la recta de Bouger y obtener las constantes mencionadas.

Este tipo de fotometría exige de noches de gran calidad atmosférica: sin nubes, con gran transparencia, etc, y que además se mantengan estables durante todo el tiempo de observación. Es lo que se denomina "noches fotométricas"¹.

3.1.1. Fundamento teórico

Extinción

Por simplicidad asumiremos un modelo de capas planoparalelas para la atmósfera (ver fig.3.1). La curvatura terrestre es lo suficientemente grande para que esta asunción sea válida mientras observemos estrellas no muy próximas al horizonte (con altura mayor que 30°).

Tras atravesar una distancia ds en la atmósfera la radiación emitida por la estrella se ve atenuada en dI_ν , donde el sufijo ν indica la dependencia con la frecuencia, según la ecuación:

¹Cabe decir que durante el cuatrimestre anterior no hubo demasiadas noches de este tipo, de ahí que se realizaran muchas menos observaciones de las previstas en un principio

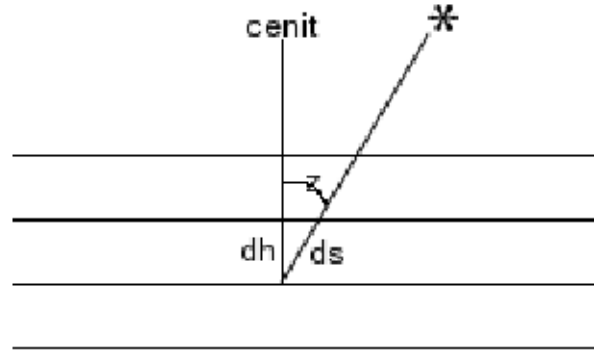


Figura 3.1: Modelo de capas planoparalelas para la atmósfera.

$$dI_\nu = -\kappa_\nu I_\nu ds, \quad (3.1)$$

donde κ_ν es el coeficiente de absorción.

Según nuestro modelo de atmosfera

$$ds = \sec z dh, \quad (3.2)$$

donde z es la distancia cenital (ver fig.3.1).

Definimos el espesor óptico como

$$\tau_\nu(s) = \int_0^s \kappa_\nu ds = \sec z \int_0^s \kappa_\nu dh = \tau_\nu(0) \sec z, \quad (3.3)$$

donde $\tau_\nu(0)$ es el espesor óptico en el cenit.

Integrando la ecuación 3.1 y sustituyendo con las ecuaciones anteriores

$$\int_0^s \frac{dI_\nu}{I_\nu} = - \int_0^s \kappa_\nu ds$$

$$I_\nu(s) = I_\nu(0) e^{-\tau_\nu(s)} = I_\nu(0) e^{-\tau_\nu(0) \sec z}.$$

Utilizamos la ley de Pogson para pasar de intensidades a magnitudes

$$m_\nu(s) - m_\nu(0) = -2.5 \log \frac{I_\nu(s)}{I_\nu(0)},$$

donde $m_\nu(s)$ es la magnitud de una estrella medida en tierra a la frecuencia ν tras atravesar una distancia s de la atmósfera (o, lo que es equivalente, a una distancia cenital z).

Sustituyendo con el resultado anterior

$$m_\nu(s) = m_\nu(0) - 2.5 \log e^{-\sec z \tau_\nu(0)} = m_\nu(0) + 2.5 \tau_\nu(0) \log e \sec z.$$

Englobando el coeficiente $2.5 \tau_\nu(0) \log e$ en una sola constante K_ν (coeficiente de extinción),

$$m_\nu(s) = m_\nu(0) + K_\nu \sec z. \quad (3.4)$$

Detección

Tras atravesar la atmósfera, la radiación llega a nuestro sistema de detección. El detector nos muestra un resultado en cuentas, N_ν , que es proporcional al flujo recibido, F_ν . Como cero de la escala de magnitudes se toma el brillo de la estrella Vega, por lo tanto:

$$m_\nu(s) - \underbrace{m_{Vega}}_0 = -2.5 \log \frac{F_\nu}{F_{\nu Vega}} = -2.5 \log \frac{N_\nu}{N_{\nu Vega}} = -2.5 \log N_\nu + 2.5 \log N_{\nu Vega}.$$

Igualando a la ecuación 3.4

$$-2.5 \log N_\nu + 2.5 \log N_{\nu Vega} = m_\nu(0) + K_\nu \sec z.$$

$$m_\nu(0) + 2.5 \log N_\nu = C_\nu - K_\nu \sec z, \quad (3.5)$$

donde $C_\nu = 2.5 \log N_{\nu Vega}$ es la constante instrumental. Si llamamos $y = m_\nu(0) + 2.5 \log N_\nu$ y $x = \sec z$, tenemos la ecuación de una recta de ordenada en el origen C_ν y pendiente K_ν . Es la denominada **recta de Bouger** (ver fig.3.2).

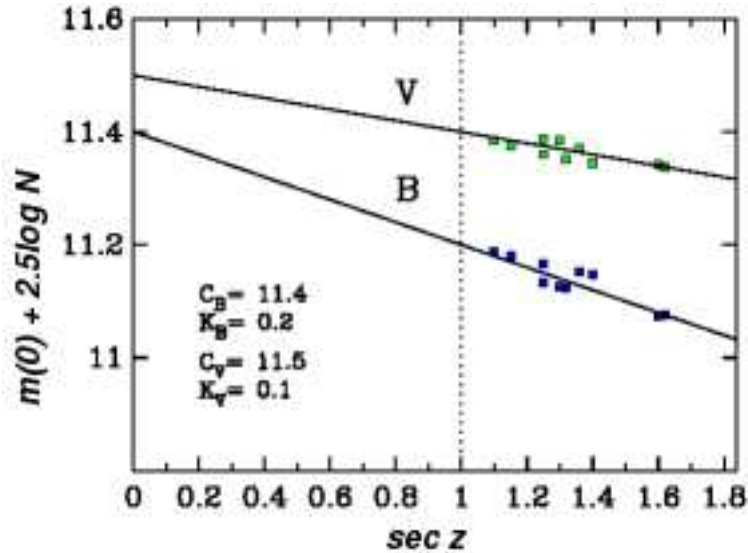


Figura 3.2: Recta de Bouger para medidas en filtros B y V.

3.1.2. Estrellas de referencia

Como ya se ha comentado, para obtener las constantes fotométricas necesitamos estrellas de referencia con magnitud bien conocida. Además, es necesario que no sean variables, que sean detectables por nuestro sistema y que sean visibles en el momento de las observaciones.

Para ello, mediante el programa "The Sky" obtenemos un esquema del cielo para la noche en que vamos a observar (tomamos como hora de observación las 23:00 TL). Nos interesan las estrellas más brillantes, con lo que descartamos las de magnitud superior a 4. A continuación seleccionamos las que se encuentran a una altura superior a 30° y que no sean variables.

De este modo podemos obtener una muestra de estrellas a diferentes alturas, que es lo que necesitamos para trazar la recta de Bouger. Mediante la base de datos Simbad comprobamos que las estrellas seleccionadas efectivamente no son variables y obtenemos sus magnitudes exactas en banda B y V.

En la tabla 3.1 se muestran las estrellas que han sido observadas al menos una vez. El código SAO resulta muy útil para el sistema de apuntado automático de nuestro telescopio. Las coordenadas son J2000.

Estrella	SAO	Tipo	A.R.	DEC.	V	B	σ_M
λ UMA	43268	-	10 ^h 17 ^m 05.79 ^s	+42°54'51.7"	3.45	3.479	0.01
ξ Dra	30631	Sistema doble	17 ^h 53 ^m 31.73 ^s	+56°52'21.5"	3.73	4.907	0.01
δ Ser B *	101623	Sistema doble	15 ^h 34 ^m 48.14 ^s	+10°32'19.0"	3.80	4.06	0.01
Phecda	28179	Líneas de emisión	11 ^h 53 ^m 49.85 ^s	+53°41'41.1"	2.41	2.454	0.02
Deneb	49941	Líneas de emisión	20 ^h 41 ^m 25.91 ^s	+45°16'49.2"	1.25	1.342	0.02
Vindemiatrix	100384	Gran movimiento propio	13 ^h 02 ^m 10.60 ^s	+10°57'32.9"	2.85	3.784	0.02
Etamin	30653	Sistema doble	17 ^h 56 ^m 36.37 ^s	+51°29'20.0"	2.24	3.761	0.01
ϵ Boo A *	83500	Sistema doble	14 ^h 44 ^m 59.21 ^s	+27°04'27.4"	2.70	3.67	0.01
Altair	125122	Gran movimiento propio	19 ^h 50 ^m 47.00 ^s	+08°52'06.0"	0.76	0.981	0.01
ζ Aql	104461	Sistema doble	19 ^h 05 ^m 24.61 ^s	+13°51'48.5"	2.99	3.004	0.01
γ Lyr	67663	Sistema doble	18 ^h 58 ^m 56.62 ^s	+32°41'22.4"	3.25	3.201	0.01
ζ Her	65485	Binaria espectroscópica	16 ^h 41 ^m 17.16 ^s	+31°36'09.8"	2.81	3.46	0.05
Sadalmelik	145862	Sistema doble	22 ^h 05 ^m 47.04 ^s	+00°19'11.5"	2.95	3.919	0.05
η Peg	90734	Binaria espectroscópica	22 ^h 43 ^m 00.14 ^s	+30°13'16.5"	2.93	3.782	0.05
Almach	37734	Sistema doble	02 ^h 03 ^m 53.95 ^s	+42°19'47.0"	2.10	3.47	0.05

Tabla 3.1: Estrellas observadas.

Las magnitudes B y V se han extraído del catálogo Hipparcos, excepto en las estrellas marcadas con un asterisco, que no habían sido observadas por este satélite. Hemos tomado como error (σ_M) para ambos datos la semidiferencia entre los valores extremos de V que aparecen en Simbad. Si bien en los catálogos el valor de B suele ser más preciso que el de V, así nos aseguramos un error superior al real, e independiente de los observadores y de la instrumentación.

3.1.3. Utilizando el fotómetro

El fotómetro se ajusta al ocular del telescopio. Debe colocarse unos 10 minutos antes de comenzar la observación para que el aparato tome la temperatura ambiente. Si no llega luz al detector, las cuentas con ganancia y tiempo de exposición a uno deben estar entre 3 y 7.

El fotómetro posee un ocular por el que puede verse un retículo circular que define la zona de visión del detector. Debe centrarse la estrella que queremos medir en dicho retículo y comprobar que el seguimiento es correcto. Se abate el espejo, dejando el detector expuesto a la luz.

La señal generada se convierte en cuentas, mostrando su valor en el panel de lectura. Se puede modificar tanto la ganancia (1, 10, 100) como el tiempo de integración (1 y 10 segundos) mediante interruptores (ver fig.2.3). Tras realizar la lectura se debe comprobar que la estrella continúa dentro del retículo.

Cabe decir que este fotómetro tiene una zona de máxima sensibilidad un poco desplazada del centro del retículo. Es necesario mover ligeramente la estrella en el retículo hasta que se obtenga un máximo de cuentas.

3.2. Fondo de cielo con MeCO

El manejo de MeCO es muy simple. No hay más que apuntar a una zona del cielo, mirar a través del ocular y con el mando regular el brillo del LED hasta que coincida con el que observamos en el filtro (ver fig.3.3).

El amperímetro nos da un valor de la intensidad de corriente que pasa por el LED. Aprovecharemos el

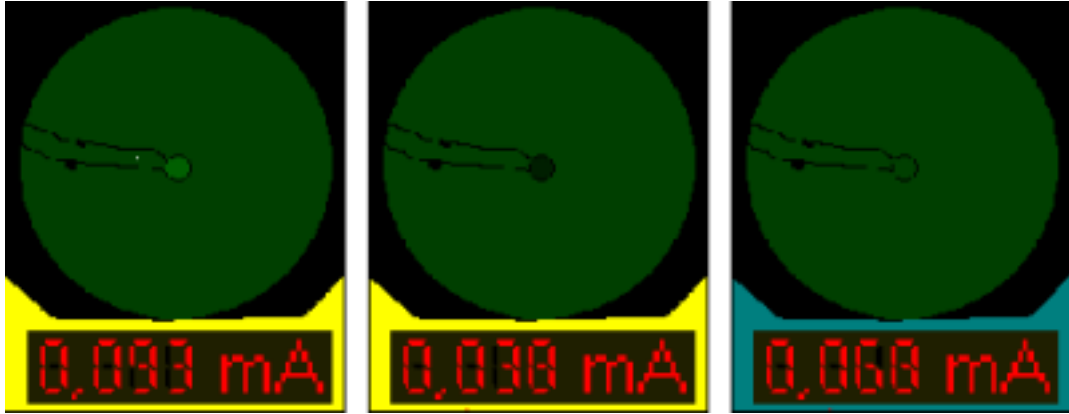


Figura 3.3: Manejo de MeCO. Izquierda: demasiado brillante. Centro: demasiado débil. Derecha: ajuste perfecto.

calibrado realizado por Luis Alejandro Ramírez en su trabajo [5] para convertir los valores de corriente en valores de luminosidad (magnitudes):

$$m = C_V + \Delta m - K_V \sec z - 2.5 [(1.33 \pm 0.04) \log I + (4.62 \pm 0.05)], \quad (3.6)$$

con la intensidad I en miliamperios y la magnitud m en magnitudes por segundo de arco al cuadrado.

Las constantes fotométricas C_V y K_V se obtendrán a partir de las observaciones de fotometría absoluta en banda V, tal y como se ha explicado anteriormente. Δm viene dada por la proyección del diafragma del fotómetro. Comenzamos calculando la escala de placa de nuestro telescopio:

$$P = \frac{206265''}{12 \times 25.4 \times 10} = 67.67''/mm.$$

Como el diafragma del fotómetro es de 1mm, su proyección sobre el cielo será de $d = 67.67''$. Por lo tanto, el área proyectada será:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 3597('')^2.$$

La diferencia de magnitudes viene dada por

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{1}{3597} = 8.89. \quad (3.7)$$

Capítulo 4

Observaciones

4.1. Fotometría absoluta con SSP-3

4.1.1. Proceso de toma de datos

Antes de comenzar las medidas fotométricas se debe calibrar el telescopio para que su sistema de apuntado automático funcione correctamente. Utilizamos para ello estrellas fácilmente localizables en el cielo (generalmente he usado Polaris, Alkaid y Vega).

Seleccionamos una de las estrellas y hacemos que el telescopio apunte automáticamente hacia ella. Si la orientación no es correcta, apuntamos manualmente hasta que la estrella quede bien centrada y pulsamos la tecla "ENTER" del panel de control del telescopio (ver fig.2.2) unos segundos. Repetimos este mismo proceso con una segunda estrella. Con dos estrellas es suficiente para obtener un apuntado correcto, aunque es conveniente utilizar al menos tres para conseguir un resultado más fino.

El proceso de fotometría absoluta no resulta complicado, aunque debe hacerse cuidadosamente. Solo debemos apuntar a la estrella que quiere medir y anotar los resultados que ofrece el fotómetro. Junto con cada medida de una estrella se debe realizar también una medida del cielo próximo a la estrella. De este modo podremos descontar el efecto que tiene el brillo de cielo sobre la luminosidad de la estrella.

Cuando el tiempo de exposición es pequeño los datos aparecen y desaparecen muy rápido en el display. Además cuando la estrella está bien centrada el número de cuentas es máximo. Todo ello introduce una componente subjetiva, haciendo que nos quedemos con los datos más altos de forma inconsciente.

Para minimizar este problema seguiremos el método utilizado por Francisco Javier Sánchez Muñoz en su trabajo [4]: utilizando una grabadora, se mira el display, se dicta el dato a la grabadora, se aparta la mirada durante un instante y se vuelve a mirar para tomar el siguiente.

Es posible que la estrella se descentre mientras se están tomando las medidas. Se detecta fácilmente, ya que el número de cuentas cae progresivamente. En ese caso se detiene el proceso de medida, se vuelve a centrar la estrella correctamente y se inicia de nuevo la medida sin tener en cuenta los resultados anteriores.

4.1.2. Datos obtenidos

Las observaciones se realizaron desde el telescopio de la cúpula este de la Facultad de Ciencias de la UCM:

Latitud $40^{\circ}27'4''\text{N}$; Longitud $03^{\circ}43'34''$; Altura 640m.

Para cada noche se indica cada estrella observada y la banda fotométrica en la que se mide. E indica la ganancia seleccionada al realizar la medida y T el tiempo de exposición. Se señala también la hora de la medida (en tiempo local), a partir de la cual obtendremos la distancia cenital. Por último se muestran las medidas obtenidas, tanto de la estrella como del fondo de cielo.

Noche del 23 al 24 de Junio del 2004

1. λ UMa

T: 1; E: 100

Filtro V: 6117, 6319, 6073, 6018, 6127 Filtro B: 4029, 3765, 3747, 3887, 3816

Cielo: 585, 583, 584, 587, 585 Cielo: 523, 532, 533, 532, 537

Hora: 23:47 Hora: 23:52

2. ξ Dra

T: 1; E: 100

Filtro V: 5621, 5610, 5592, 5540, 5496 Filtro B: 1365, 1553, 1526, 1468, 1353

Cielo: 576, 573, 573, 572, 570 Cielo: 521, 524, 528, 523, 524

Hora: 00:09 Hora: 00:11

3. δ Ser B

T: 1; E: 100;

Filtro V: 5321, 5210, 5251, 5232, 5293 Filtro B: 3304, 3243, 3306, 3342, 3292

Cielo: 575, 576, 575, 579, 573 Cielo: 532, 525, 522, 527, 530

Hora: 00:22 Hora: 00:24

4. Deneb

T: 1; E: 10;

Filtro V: 4800, 4653, 4703, 4736, 4659 Filtro B: 2985, 2995, 3019, 3047, 2988

Cielo: 61, 62, 63, 62, 62 Cielo: 55, 56, 55, 55, 56

Hora: 00:38 Hora: 00:39

5. ϵ Boo A

T: 1; E: 10

Filtro V: 1816, 1851, 1807, 1824, 1807 Filtro B: 620, 624, 616, 627, 616

Cielo: 57, 57, 56, 57, 56 Cielo: 53, 53, 53, 52, 53

Hora: 00:51 Hora: 00:54

Estrella	Brutas V	Cielo V	TU	Brutas B	Cielo B	TU
λ UMa	61.3±1.1	5.848±0.015	21:47	38.5±1.1	5.31±0.05	21:52
ξ Dra	55.7±0.5	5.728±0.022	22:09	14.5±0.9	5.240±0.025	22:11
δ Ser B	52.6±0.5	5.756±0.022	22:22	33.0±0.4	5.27±0.04	22:24
Deneb	471±6	6.20±0.07	22:38	301±3	5.54±0.05	22:39
ϵ Boo A	182.1±1.8	5.66±0.05	22:51	62.1±0.5	5.28±0.04	22:54

La tabla anterior recoge la media de las cuentas obtenidas para cada estrella normalizadas (es decir, dividiendo entre T y E), junto con su error. Se ha tomado como error la desviación estandar de las medidas.

Noche del 24 al 25 de Junio del 2004

1. Deneb

T: 1; E: 10

Filtro V: 3404, 3474, 3451, 3498, 3555, 3495, 3660, 3433, 3513, 3465 Filtro B: 1813, 1923, 2092, 1974, 1895, 1993, 1984, 1896, 1917, 1903

Cielo: 66, 64, 65, 65, 63, 64, 63, 65, 64, 65 Cielo: 49, 49, 50, 49, 49, 49, 50, 48, 50, 50

Hora: 23:21 Hora: 23:23

2. λ UMa

T: 1; E: 100

Filtro V: 5242, 5422, 5284, 5386, 5537, 5383, 5266, 5414, 5400, 5643
 Cielo: 540, 536, 528, 533, 539, 529, 528, 529, 534, 532
 Hora: 23:35

Filtro B: 3386, 3440, 3378, 3326, 3323, 3310, 3373, 3268, 3323, 3495
 Cielo: 461, 456, 496, 456, 461, 460, 465, 460, 458, 459
 Hora: 23:39

3. ϵ Boo A

T: 1; E: 100;

Filtro V: 3997, 6711, 5501, 5070, 5111, 4122, 4500, 4507, 6348, 6705
 Cielo: 545, 540, 544, 546, 553, 542, 548, 539, 537, 540
 Hora: 23:53

Filtro B: 1659, 1157, 1215, 1639, 1517, 1653, 1606, 1940, 2075, 1606
 Cielo: 463, 466, 459, 463, 464, 451, 468, 454, 462, 460
 Hora: 23:55

4. Vindemiatrix

T: 1; E: 100;

Filtro V: 7616, 8071, 8013, 8302, 8206, 8470, 8729, 8684, 8501, 8909
 Cielo: 529, 523, 527, 530, 532, 532, 528, 538, 526, 533
 Hora: 00:03

Filtro B: 3117, 3183, 3195, 3154, 3251, 3226, 3647, 3138, 3243, 3147
 Cielo: 464, 459, 458, 453, 455, 463, 459, 456, 457, 463
 Hora: 00:06

5. Phecda

T: 1; E: 10

Filtro V: 1490, 1536, 1464, 1473, 1455, 1489, 1493, 1516, 1461, 1422
 Cielo: 55, 55, 55, 54, 56, 54, 55, 55, 56, 55,
 Hora: 00:18

Filtro B: 1016, 951, 1024, 992, 979, 1006, 992, 1004, 990, 987
 Cielo: 50, 49, 50, 48, 49, 49, 49, 50, 50, 50
 Hora: 00:21

Estrella	Brutas V	Cielo V	TU	Brutas B	Cielo B	TU
Deneb	349±7	6.44±0.10	21:21	194±7	4.93±0.07	21:23
λ UMa	54.0±1.2	5.33±0.04	21:35	33.6±0.7	4.63±0.12	21:39
ϵ Boo A	52±10	5.43±0.05	21:53	16±3	4.61±0.05	21:55
Vindemiatrix	84±4	5.30±0.04	22:03	31.8±0.5	4.59±0.04	22:06
Phecda	148±3	5.50±0.07	22:18	99.4±2.0	4.94±0.07	22:21

Noche del 15 al 16 de Septiembre del 2004

1. ζ Aql

T: 1; E: 100

Filtro V: 8428, 8731, 8646, 8448, 8654, 8691, 8591, 8691, 8893, 8578
 Cielo: 878, 877, 879, 880, 878, 882, 873, 872, 873, 880
 Hora: 22:10

Filtro B: 6010, 6121, 6027, 6077, 6259, 6094, 6281, 6326, 6336, 6141
 Cielo: 652, 653, 651, 655, 647, 645, 648, 650, 646, 645
 Hora: 22:12

2. Deneb

T: 1; E: 10

Filtro V: 5965, 5944, 5970, 5749, 5805, 5694, 5913, 5716, 5725, 5784
 Cielo: 92, 93, 93, 92, 93, 93, 92, 93, 93, 92
 Hora: 22:26

Filtro B: 3598, 3659, 3591, 3722, 3673, 3702, 3657, 3726, 3693, 3701
 Cielo: 72, 71, 71, 72, 72, 72, 71, 72, 72, 72
 Hora: 22:28

3. **Altair**

T: 1; E: 10

Filtro V: 7763, 7545, 7594, 7733, 7703, 7731, 7729, 7633, 7789, 7704
 Filtro B: 3460, 3465, 3399, 3570, 3283, 3214, 3248, 3396, 3650, 3447
 Cielo: 98, 99, 97, 97, 96, 96, 96, 95, 96, 95
 Cielo: 69, 68, 69, 69, 69, 69, 68, 69, 69, 69
 Hora: 22:49
 Hora: 22:50

4. **Etamin**

T: 1; E: 100

Filtro V: 2265, 2253, 2262, 2288, 2277, 2287, 2304, 2301, 2303, 2288 (E=10)
 Filtro B: 4660, 4684, 4750, 4710, 4719, 4654, 4686, 4733, 4730, 4718
 Cielo: 832, 828, 827, 826, 829, 834, 833, 826, 828, 829
 Cielo: 627, 625, 630, 630, 628, 621, 627, 626, 618, 625
 Hora: 23:14
 Hora: 23:17

5. γ **Lyr**

T: 1; E: 100

Filtro V: 3702, 3760, 3906, 3664, 3724, 3844, 3692, 3847, 3735, 3777
 Filtro B: 2871, 2809, 2805, 2845, 2782, 2882, 2851, 2906, 2904, 2974
 Cielo: 837, 844, 840, 846, 851, 843, 852, 846, 837, 840
 Cielo: 639, 635, 646, 638, 641, 637, 639, 639, 643, 639
 Hora: 23:30
 Hora: 23:32

6. ζ **Aql**

T: 1; E: 100

Filtro V: 8595, 8500, 8757, 8863, 8609, 8367, 8427, 8326, 8393, 8680
 Filtro B: 6889, 6992, 6868, 6623, 6475, 6575, 6870, 6978, 7057, 7128,
 Cielo: 835, 831, 837, 834, 837, 833, 831, 834, 837, 841
 Cielo: 647, 643, 642, 645, 641, 640, 644, 643, 647, 640
 Hora: 23:42
 Hora: 23:44

Estrella	Brutas V	Cielo V	TU	Brutas B	Cielo B	TU
ζ Aql	86.4±1.4	8.77±0.03	20:10	61.7±1.2	6.49±0.04	20:12
Deneb	583±11	9.26±0.05	20:26	367±5	7.17±0.05	20:28
Altair	769±8	9.65±0.13	20:49	341±14	6.88±0.04	20:50
Etamin	228.3±1.8	8.29±0.03	21:14	47.0±0.3	6.26±0.04	21:17
γ Lyr	37.7±0.8	8.44±0.05	21:30	28.6±0.6	6.40±0.03	21:32
ζ Aql	85.5±1.8	8.35±0.03	21:42	68.5±2.2	6.43±0.03	21:44

Noche del 17 al 18 de Septiembre del 2004

1. ζ **Her**

T: 1; E: 100

Filtro V: 1337, 1316, 1322, 1320, 1307, 1347, 1308, 1330, 1317, 1328 (E=10)
 Filtro B: 5091, 5077, 5107, 5146, 5128, 5059, 5137, 5118, 5056, 5118,
 Cielo: 831, 825, 828, 829, 828, 833, 830, 832, 825, 825
 Cielo: 603, 601, 610, 610, 606, 600, 599, 596, 601, 604
 Hora: 21:45
 Hora: 21:51

2. **Sadalmelik**

T: 1; E: 100

Filtro V: 1105, 1109, 1141, 1057, 1088, 1106, 1137, 1090, 1080, 1076 (E=10)
 Filtro B: 3350, 3356, 3357, 3332, 3298, 3390, 3328, 3389, 3347, 3375
 Cielo: 1143, 1141, 1129, 1138, 1142, 1128, 1136, 1139, 1131, 1141
 Cielo: 678, 681, 687, 687, 686, 692, 686, 685, 683, 678
 Hora: 21:59
 Hora: 22:01

3. **Altair**

T: 1; E: 10

Filtro V: 8395, 8318, 8393, 8311, 8282, Filtro B: 4537, 4506, 4518, 4532, 4534,
8392, 8429, 8202, 8366, 8429 4554, 4573, 4545, 4527, 4518
Cielo: 97, 97, 97, 97, 97, Cielo: 66, 67, 67, 66, 67
98, 97, 98, 97, 98 66, 67, 67, 66, 67
Hora: 22:10 Hora: 22:12

4. **η Peg**

T: 1; E: 100

Filtro V: 1102, 1096, 1119, 1075, 1084, Filtro B: 3932, 3951, 3896, 3869, 3866,
1080, 1088, 1093, 1086, 1114 (E=10) 3815, 3852, 3812, 3884, 3875
Cielo: 914, 920, 919, 923, 925, Cielo: 647, 648, 652, 644, 650
918, 919, 925, 921, 918 647, 650, 646, 647, 657
Hora: 22:42 Hora: 22:44

5. **Deneb**

T: 1; E: 10

Filtro V: 5560, 5599, 5617, 5667, 5680 Filtro B: 3402, 3440, 3405, 3458, 3429
5621, 5660, 5621, 5633, 5525 3431, 3469, 3451, 3423, 3450
Cielo: 84, 85, 83, 84, 84, Cielo: 62, 62, 63, 62, 61,
85, 84, 85, 84, 85 64, 62, 63, 61, 62
Hora: 22:51 Hora: 22:53

6. **Almach**

T: 1; E: 100

Filtro V: 2210, 2169, 2065, 2023, 2129, Filtro B: 5215, 5210, 5117, 5092, 5214,
2185, 2152, 2156, 2143, 2058 (E=10) 5136, 5171, 5312, 5359, 5091
Cielo: 1129, 1139, 1133, 1137, 1135, Cielo: 676, 671, 671, 677, 669,
1133, 1124, 1128, 1122, 1132 674, 670, 676, 678, 670
Hora: 23:00 Hora: 23:01

7. **Etamin**

T: 1; E: 100

Filtro V: 2247, 2257, 2245, 2241, 2240, Filtro B: 4632, 4643, 4632, 4647, 4576,
2246, 2235, 2250, 2258, 2250 (E=10) 4586, 4612, 4580, 4647, 4526
Cielo: 809, 800, 804, 806, 801, Cielo: 607, 607, 615, 606, 610,
811, 813, 809, 807, 810 603, 609, 607, 604, 612
Hora: 23:11 Hora: 23:12

Estrella	Brutas V	Cielo V	TU	Brutas B	Cielo B	TU
ζ Her	132.3±1.2	8.29±0.03	19:45	51.0±0.3	6.03±0.05	19:51
Sadalmelik	110±3	11.37±0.06	19:59	33.5±0.3	6.84±0.04	20:01
Altair	835±7	9.73±0.05	20:10	453.4±1.9	6.66±0.05	20:12
η Peg	109.4±1.4	9.20±0.03	20:42	38.8±0.4	6.49±0.04	20:44
Deneb	562±5	8.43±0.07	20:51	343.6±2.2	6.22±0.09	20:53
Almach	213±6	11.31±0.05	21:00	51.9±0.9	6.73±0.03	21:01
Etamin	224.7±0.7	8.07±0.04	21:11	46.1±0.4	6.08±0.04	21:12

Noche del 20 al 21 de Septiembre del 2004

1. ζ Her

T: 1; E: 100

Filtro V: 1326, 1307, 1317, 1305, 1318, 1300, 1333, 1312, 1303, 1332 (E=10)	Filtro B: 5251, 5141, 5152, 5079, 5099, 5083, 5165, 5193, 5169, 5111
Cielo: 854, 837, 848, 850, 850, 848, 843, 848, 850, 851	Cielo: 578, 599, 598, 599, 596, 600, 594, 598, 587, 597
Hora: 21:35	Hora: 21:38

2. Sadalmelik

T: 1; E: 100

Filtro V: 1048, 1066, 1089, 1094, 1056, 1059, 1058, 1068, 1031, 1040 (E=10)	Filtro B: 3200, 3308, 3125, 3348, 3307 3186, 3255, 3187, 3303, 3221
Cielo: 1228, 1227, 1230, 1228, 1223, 1231, 1232, 1226, 1232, 1232,	Cielo: 688, 688, 693, 700, 694, 685, 689, 688, 694, 682
Hora: 21:49	Hora: 21:51

3. Altair

T: 1; E: 10

Filtro V: 7960, 7777, 7906, 7832, 7833, 7790, 7701, 7857, 7924, 7777	Filtro B: 4131, 4166, 4164, 4188, 4214, 4185, 4188, 4148, 4133, 4211
Cielo: 107, 105, 105, 106, 106, 107, 106, 107, 107, 105	Cielo: 69, 70, 71, 70, 70, 71, 70, 71, 70, 70
Hora: 22:01	Hora: 22:02

4. η Peg

T: 1; E: 100

Filtro V: 1146, 1121, 1148, 1117, 1128, 1128, 1154, 1105, 1147, 1125 (E=10)	Filtro B: 3805, 3772, 3768, 3846, 3752, 3771, 3828, 3816, 3892, 3809
Cielo: 1228, 1270, 1264, 1258, 1242 1231, 1194, 1241, 1266, 1230	Cielo: 757, 730, 743, 729, 728, 736, 736, 743, 743, 740
Hora: 22:07	Hora: 22:10

5. Deneb

T: 1; E: 10

Filtro V: 5117, 5169, 5109, 5125, 5177, 5150, 5225, 5127, 5083, 5047	Filtro B: 3070, 3124, 3088, 3093, 3132, 3175, 3115, 3100, 3142, 3069
Cielo: 93, 93, 91, 92, 93, 92, 92, 93, 92, 92	Cielo: 66, 67, 65, 66, 67, 66, 65, 66, 66, 66
Hora: 22:17	Hora: 22:18

6. Almach

T: 1; E: 100

Filtro V: 2012, 1918, 1999, 1902, 1838, 2024, 2031, 1939, 1987, 2008 (E=10)	Filtro B: 3994, 4159, 4125, 4491, 4462 4453, 4328, 4474, 4328, 4527
Cielo: 1280, 1281, 1276, 1276, 1280, 1274, 1278, 1279, 1277, 1280	Cielo: 688, 689, 685, 687, 691, 697, 688, 690, 692, 687
Hora: 22:27	Hora: 22:28

7. Etamin

T: 1; E: 100

Filtro V: 2195, 2168, 2131, 2185, 2163, 2092, 2143, 2115, 2177, 2153 (E=10)	Filtro B: 4309, 4338, 4330, 4296, 4352, 4375, 4379, 4380, 4357, 4376
Cielo: 799, 804, 811, 802, 804, 800, 800, 803, 800, 803	Cielo: 578, 582, 586, 584, 586, 587, 588, 583, 588, 590
Hora: 22:45	Hora: 22:47

8. γ Lyr

T: 1; E: 100

Filtro V: 7132, 7113, 7280, 7121, 7110, Filtro B: 4658, 4669, 4702, 4670, 4736,
7057, 7117, 7062, 7032, 7037 4693, 4629, 4679, 4678, 4605Cielo: 792, 790, 790, 784, 787, Cielo: 580, 575, 584, 564, 566,
790, 787, 787, 786, 784 580, 577, 582, 576, 578

Hora: 22:54

Hora: 22:55

Estrella	Brutas V	Cielo V	TU	Brutas B	Cielo B	TU
ζ Her	131.5 \pm 1.2	8.48 \pm 0.05	19:35	51.4 \pm 0.5	5.95 \pm 0.07	19:38
Sadalmelik	106.1 \pm 2.0	12.29 \pm 0.03	19:49	32.4 \pm 0.7	6.90 \pm 0.05	19:51
Altair	784 \pm 8	10.61 \pm 0.09	20:01	417 \pm 3	7.02 \pm 0.06	20:02
η Peg	113.2 \pm 1.6	12.42 \pm 0.23	20:07	38.1 \pm 0.4	7.39 \pm 0.09	20:10
Deneb	513 \pm 5	9.23 \pm 0.07	20:17	311 \pm 3	6.60 \pm 0.07	20:18
Almach	197 \pm 6	12.781 \pm 0.023	20:27	43.3 \pm 1.8	6.89 \pm 0.03	20:28
Etamin	215 \pm 3	8.03 \pm 0.03	20:45	43.5 \pm 0.3	5.85 \pm 0.04	20:47
γ Lyr	71.1 \pm 0.7	7.88 \pm 0.03	20:54	46.7 \pm 0.4	5.76 \pm 0.07	20:55

4.2. Brillo de cielo con MeCO

Con MeCO hemos realizado dos tipos de mediciones. Por un lado hemos realizado un mapeo sistemático del cielo de Madrid en diferentes fechas y condiciones. Se realizó también un mapeo del cielo del observatorio de Yebes, en Guadalajara. Se intentaron realizar mapeos en otros lugares de la geografía española, pero por diferentes circunstancias resultó finalmente imposible. También se realizaron medidas de luminosidad del cielo durante el atardecer en diferentes fechas y orientaciones.

Destacar un efecto curioso observado con este aparato. Si se enfoca directamente hacia una fuente de luz intensa (un foco, una farola, etc), se obtienen medidas de luminosidad mucho más bajas de lo que sería razonable. Incluso apagando el led, su brillo resulta más intenso que el que se observa a través del filtro verde.

4.2.1. Mapeado de cielos

Para obtener un buen registro del brillo de cielo en su totalidad tomamos medidas a alturas de 10° , con registros cada 30° en azimut; 30° , con registros cada 45° ; 60° , con registros cada 90° y en el cenit (una sola medida, lógicamente). Comenzamos con el MeCO orientado al sur y vamos realizando medidas en sentido sur, oeste, norte, este, sur.

Noche del 14 al 15 de Mayo - Yebes

Aprovechando la visita que se realiza en la asignatura de Ampliación de Técnicas Experimentales en Astrofísica al observatorio de Yebes, en Guadalajara (a 55 km de Madrid), se realizó el siguiente mapeo de la luminosidad del cielo.

Altura	Azimut	I / mA	Comentarios
10	0	0.014	
10	30	0.012	
10	60	0.012	
10	90	0.020	
10	120	0.018	
10	150	0.020	
10	180	0.010	
10	210	0.010	
10	240	0.008	
10	270	-	árboles
10	300	-	árboles
10	330	0.014	
30	0	0.006	
30	45	0.014	
30	90	0.018	
30	135	0.010	
30	180	0.016	nube
30	225	0.006	
30	270	0.010	
30	315	0.010	
60	0	0.004	
60	90	0.002	
60	180	0.002	
60	270	0.002	
90	-	0.002	

Noche del 18 al 19 de Mayo - Madrid

Altura	Azimut	I / mA	Comentarios
10	0	0.034	
10	30	0.026	
10	60	0.040	
10	90	0.030	
10	120	-	foco teleco
10	150	0.018	
10	180	0.030	
10	210	0.052	torre
10	240	0.064	
10	270	0.052	focos boda real
10	300	0.030	
10	330	0.052	

Altura	Azimut	I / mA	Comentarios
30	0	0.024	
30	45	0.022	
30	90	0.018	
30	135	-	foco teleco
30	180	0.022	
30	225	0.056	
30	270	0.064	
30	315	0.046	
60	0	0.010	
60	90	0.010	
60	180	0.012	
60	270	0.024	
90	-	0.002	

Noche del 27 al 28 de Mayo - Madrid

Altura	Azimut	I / mA	Comentarios
10	0	0.052	
10	30	0.048	
10	60	0.044	
10	90	0.044	
10	120	0.030	
10	150	-	foco teleco
10	180	-	foco teleco
10	210	0.070	nube
10	240	0.063	nube
10	270	0.072	torre
10	300	0.058	
10	330	0.062	

Altura	Azimut	I / mA	Comentarios
30	0	0.044	
30	45	0.026	
30	90	0.018	
30	135	0.024	
30	180	0.026	
30	225	0.034	
30	270	0.056	
30	315	0.058	
60	0	0.022	
60	90	0.028	
60	180	0.026	
60	270	0.034	
90	-	0.014	

4.2.2. Curvas de luminosidad al atardecer

En este caso dejamos el MeCO en una orientación fija (generalmente a 30° de altura y hacia el oeste) y vamos realizando lecturas cada 10 minutos hasta que anochece completamente.

18 de Mayo

MeCO orientado al norte y fijado a 30° de altura

Hora	I / mA
21:45	0.8
21:55	0.3
22:05	0.066
22:15	0.060
22:25	0.042
22:35	0.022
22:45	0.020
22:55	0.020

2 de Junio

MeCO orientado al oeste y fijado a 30° de altura

Hora	I / mA
21:30	25
21:40	15
21:50	5
22:00	1.8
22:10	0.7
22:20	0.15
22:30	0.080
22:40	0.064
22:50	0.030
23:00	0.030

Capítulo 5

Reducción de datos

5.1. Fotometría absoluta con SSP-3

Tras realizar las observaciones, ya disponemos de todos los datos necesarios para representar las rectas de Bouger correspondientes a cada noche y calcular las constantes fotométricas.

A partir de las cuentas brutas y el cielo en cada banda podemos obtener las cuentas netas, N_p . No hay más que restar a las cuentas brutas las cuentas del cielo.

Mediante el convertidor de coordenadas del programa astronómico XEphem obtenemos los valores necesarios para $\sec z$. Introducimos el lugar y la hora exacta (TU) de observación, junto con la ascensión recta y declinación de la estrella. Nos devuelve la altura y azimut de la misma en ese momento y lugar. La distancia cenital es simplemente el ángulo complementario de la altura.

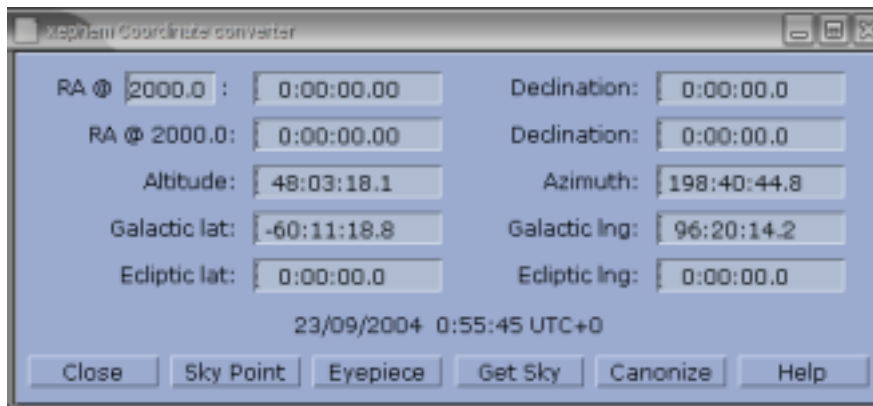


Figura 5.1: Convertidor de coordenadas de XEphem.

Noche del 23 al 24 de Junio del 2004

Estrella	N_V	$V + 2.5 \log N_V$	sec z	N_B	$B + 2.5 \log N_B$	sec z
λ UMa	55.5 ± 1.1	7.81 ± 0.05	1.89	33.2 ± 1.1	7.28 ± 0.08	1.94
ξ Dra*	50.0 ± 0.5	7.98 ± 0.03	1.10	9.3 ± 0.9	7.33 ± 0.24	1.09
δ Ser B	46.8 ± 0.5	7.98 ± 0.03	1.17	27.7 ± 0.4	7.67 ± 0.04	1.17
Deneb	465 ± 6	7.92 ± 0.04	1.41	295 ± 3	7.51 ± 0.03	1.41
ϵ Boo A*	176.4 ± 1.8	8.32 ± 0.03	1.13	56.8 ± 0.5	8.06 ± 0.02	1.14

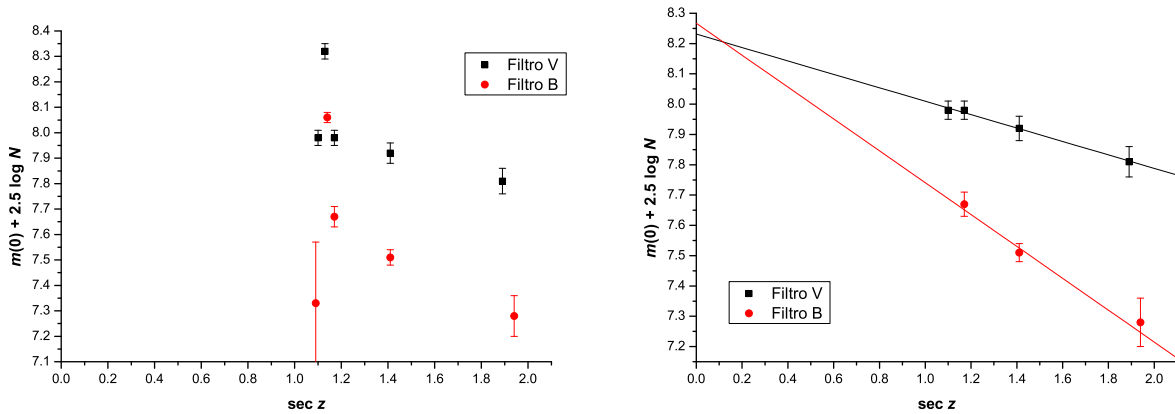


Figura 5.2: Datos de la observación del 23 de Junio. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouguer tras descartar algunos puntos.

En la fig.5.2 se observa como algunos de los datos obtenidos (marcados con * en la tabla) se desvían demasiado de la tendencia general. Este efecto puede deberse a la aparición de alguna nube o a que la estrella no estaba bien colocada en el retículo del fotómetro.

Descartando esos datos poco fiables, las constantes fotométricas resultantes son:

$$\begin{aligned}
 C_V &= 8.23 \pm 0.09 & C_B &= 8.27 \pm 0.16 \\
 K_V &= 0.22 \pm 0.07 & K_B &= 0.53 \pm 0.11
 \end{aligned}$$

Los coeficientes de correlación del ajuste son:

$$R = -0.993 \qquad R = -0.985$$

Noche del 24 al 25 de Junio del 2004

Estrella	N_V	$V + 2.5 \log N_V$	sec z	N_B	$B + 2.5 \log N_B$	sec z
Deneb	343 ± 7	7.59 ± 0.05	1.82	189 ± 7	7.03 ± 0.09	1.80
λ UMa	48.7 ± 1.2	7.67 ± 0.06	1.83	29.0 ± 0.7	7.14 ± 0.06	1.86
ϵ Boo A*	47 ± 10	6.9 ± 0.5	1.06	11 ± 3	6.3 ± 0.7 </td <td>1.06</td>	1.06
Vindemiatrix	79 ± 4	7.59 ± 0.13	1.53	27.2 ± 0.5	7.37 ± 0.05	1.55
Phecda	143 ± 3	7.80 ± 0.06	1.41	94.5 ± 2.0	7.39 ± 0.06	1.42

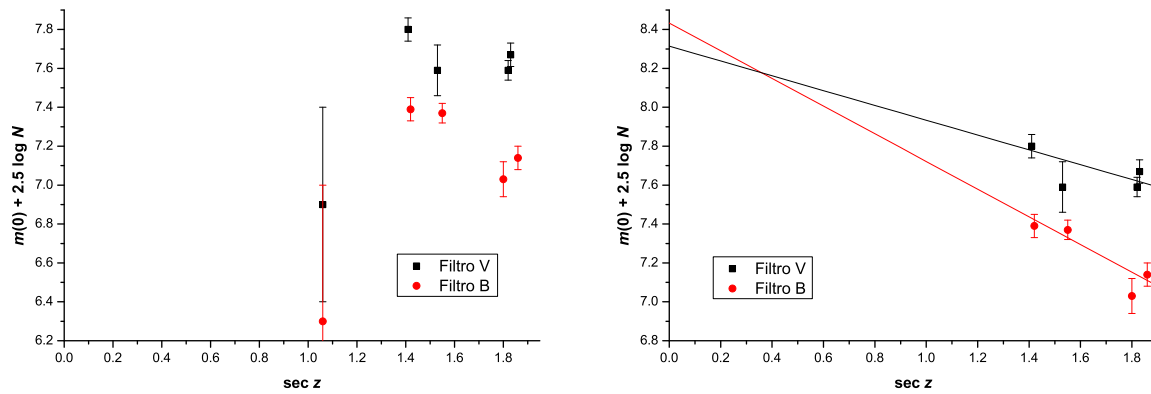


Figura 5.3: Datos de la observación del 24 de Junio. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouguer tras descartar algunos puntos.

En este caso hemos descartado los datos de la estrella ϵ Boo A. Las constantes fotométricas son:

$$C_V = 8.3 \pm 0.3 \quad C_B = 8.4 \pm 0.3$$

$$K_V = 0.38 \pm 0.17 \quad K_B = 0.71 \pm 0.17$$

Los coeficientes de correlación del ajuste son:

$$R = -0.821 \quad R = -0.92$$

Noche del 15 al 16 de Septiembre del 2004

Estrella	N_V	$V + 2.5 \log N_V$	sec z	N_B	$B + 2.5 \log N_B$	sec z
ζ Aql*	77.6 ± 1.4	7.71 ± 0.05	1.13	55.2 ± 1.2	7.35 ± 0.06	1.13
Deneb	574 ± 11	8.15 ± 0.05	1.02	360 ± 5	7.73 ± 0.04	1.02
Altair	759 ± 8	7.96 ± 0.03	1.18	334 ± 12	7.29 ± 0.09	1.18
Etamin*	220.0 ± 1.8	8.096 ± 0.023	1.15	40.7 ± 0.3	7.784 ± 0.021	1.16
γ Lyr*	29.3 ± 0.8	6.92 ± 0.07	1.10	22.2 ± 0.6	6.57 ± 0.07	1.10
ζ Aql	77.1 ± 1.8	7.71 ± 0.06	1.26	62.1 ± 2.2	7.48 ± 0.09	1.26

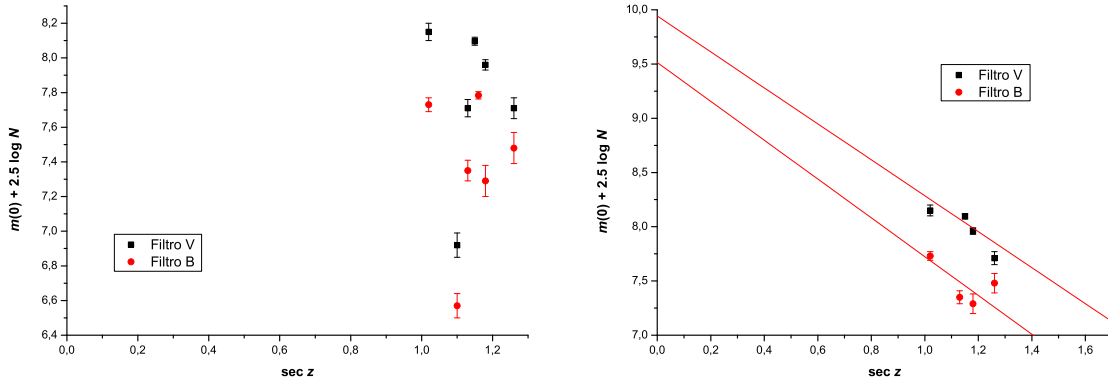


Figura 5.4: Datos de la observación del 15 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.

Hemos desechado los datos de ζ Aql y γ Lyr en V, y de Etamin y γ Lyr en B. Las constantes fotométricas son:

$$C_V = 9.9 \pm 0.3 \quad C_B = 9.5 \pm 0.4$$

$$K_V = 1.7 \pm 0.3 \quad K_B = 1.8 \pm 0.4$$

Los coeficientes de correlación del ajuste son:

$$R = -0.798 \quad R = -0.803$$

Puede verse en la fig. 5.4 como las observaciones se han restringido a una franja estrecha de alturas (no se seleccionó adecuadamente la muestra de estrellas). Las rectas de Bouger trazadas con estos datos no pueden considerarse representativas. Esto explica la gran discrepancia entre las constantes fotométricas obtenidas para esta día con el resto de noches.

Noche del 17 al 18 de Septiembre del 2004

Estrella	N_V	$V + 2.5 \log N_V$	$\sec z$	N_B	$B + 2.5 \log N_B$	$\sec z$
ζ Her	124.0 ± 1.2	8.04 ± 0.06	1.19	45.0 ± 0.3	7.59 ± 0.05	1.20
Sadalmelik	99 ± 3	7.94 ± 0.09	1.67	26.7 ± 0.3	7.49 ± 0.06	1.65
Altair	825 ± 7	8.05 ± 0.02	1.17	446.7 ± 1.9	7.605 ± 0.015	1.21
η Peg	100.2 ± 1.4	7.93 ± 0.06	1.17	32.3 ± 0.4	7.55 ± 0.06	1.17
Deneb	554 ± 5	8.11 ± 0.03	1.01	337.4 ± 2.2	7.66 ± 0.03	1.00
Almach	202 ± 6	7.86 ± 0.09	1.96	45.2 ± 0.9	7.48 ± 0.06	1.95
Etamin	216.6 ± 0.7	8.079 ± 0.013	1.16	40.0 ± 0.4	7.77 ± 0.03	1.16

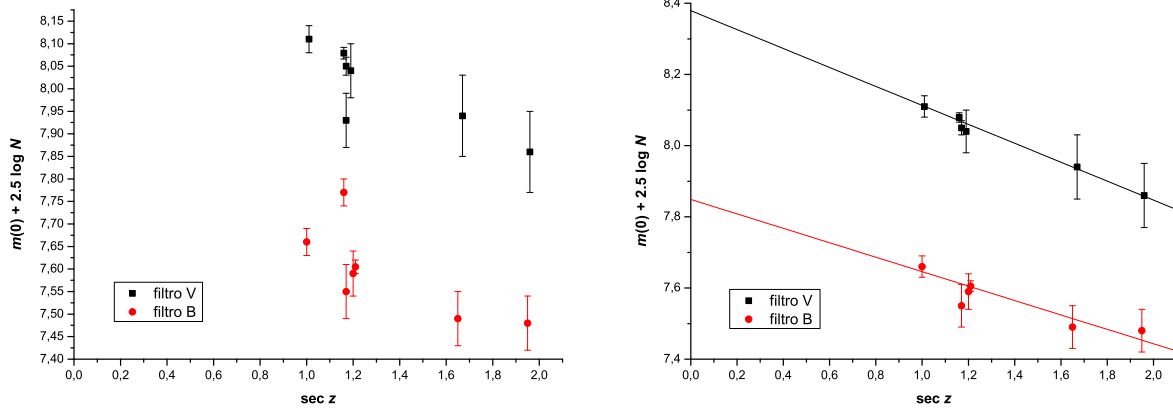


Figura 5.5: Datos de la observación del 17 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouguer tras descartar algunos puntos.

Descartamos el dato de η Peg en V y el de Etamin en B. Las constantes fotométricas son:

$$\begin{aligned} C_V &= 8.4 \pm 0.1 & C_B &= 7.85 \pm 0.08 \\ K_V &= 0.27 \pm 0.09 & K_B &= 0.20 \pm 0.06 \end{aligned}$$

A primera vista obtenemos datos contradictorios, ya que el coeficiente de extinción en el filtro B debe ser mayor que para el filtro V. En la fig. 5.5 se observa una mayor dispersión de los datos para el filtro B. Además, este fenómeno vuelve a repetirse en la observación del 20 de Septiembre (ver fig. 5.7), así que debemos estar cometiendo algún error sistemático.

Puede deberse a que para trazar las rectas de Bouguer no hemos tenido en cuenta el color de las estrellas. Una expresión más correcta para obtener la magnitud de una estrella debe incluir un término de color:

$$m_\nu = C_\nu - K_\nu \sec z - D_\nu(B - V). \quad (5.1)$$

Para calcular la constante D_ν representamos $B + 2.5 \log N_B$ frente a $(B-V)$. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados obtenemos el término de color $D_B = 0.13 \pm 0.04$. Ahora representamos $B + 2.5 \log N_B - D_\nu(B - V)$ frente a $\sec z$ y podemos obtener las constantes fotométricas correctas:

$$\begin{aligned} C_V &= 8.4 \pm 0.1 & C_B &= 8.02 \pm 0.09 \\ K_V &= 0.27 \pm 0.09 & K_B &= 0.32 \pm 0.08 \end{aligned}$$

Los coeficientes de correlación del ajuste son:

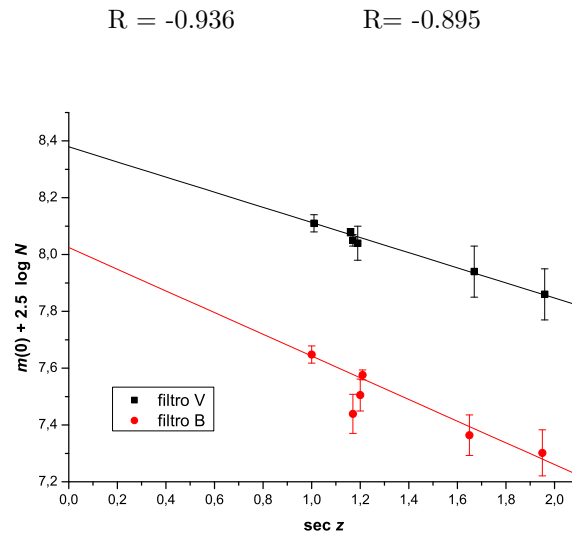


Figura 5.6: Recta de Bouger con la corrección de color para el filtro B.

Noche del 20 al 21 de Septiembre del 2004

Estrella	N_V	$V + 2.5 \log N_V$	sec z	N_B	$B + 2.5 \log N_B$	sec z
ζ Her	123.0 ± 1.2	8.03 ± 0.06	1.19	45.4 ± 0.5	7.60 ± 0.06	1.20
Sadalmelik	93.8 ± 2.0	7.88 ± 0.07	1.66	25.5 ± 0.7	7.44 ± 0.08	1.64
Altair	773 ± 8	7.98 ± 0.03	1.17	410 ± 3	7.513 ± 0.021	1.17
η Peg	100.8 ± 1.6	7.94 ± 0.06	1.23	30.7 ± 0.4	7.49 ± 0.06	1.23
Deneb	504 ± 5	8.01 ± 0.03	1.01	304 ± 3	7.55 ± 0.03	1.01
Almach	184 ± 6	7.76 ± 0.10	2.19	36.4 ± 1.8	7.37 ± 0.13	2.17
Etamin	207 ± 3	8.03 ± 0.04	1.14	37.7 ± 0.3	7.701 ± 0.022	1.14
γ Lyr	63.2 ± 0.7	7.75 ± 0.03	1.07	40.9 ± 0.4	7.23 ± 0.03	1.08

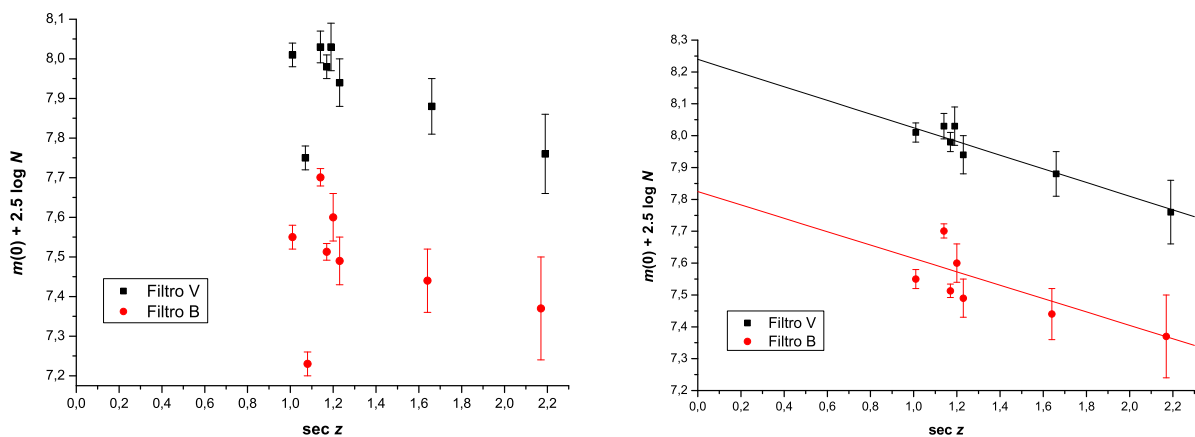


Figura 5.7: Datos de la observación del 20 de Septiembre. Izquierda: representación de todos los datos. Derecha: recta de Bouger tras descartar algunos puntos.

Descartamos las medidas realizadas sobre γ Lyr. Las constantes fotométricas son entonces:

$$C_V = 8.24 \pm 0.09 \qquad C_B = 7.82 \pm 0.10$$

$$K_V = 0.21 \pm 0.07 \qquad K_B = 0.21 \pm 0.09$$

De nuevo tenemos que aplicar el termino de color para obtener los valores correctos de las constantes fotométricas. En este caso $D_B = 0.13 \pm 0.06$, con lo que:

$$C_V = 8.24 \pm 0.09 \qquad C_B = 7.87 \pm 0.11$$

$$K_V = 0.21 \pm 0.07 \qquad K_B = 0.33 \pm 0.10$$

Los coeficientes de correlación del ajuste son:

$$R = -0.936 \qquad R = -0.923$$

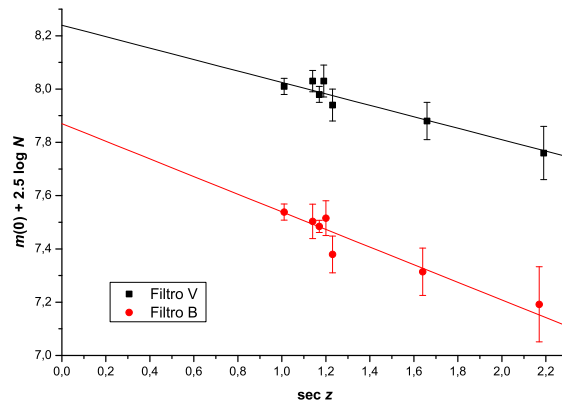


Figura 5.8: Recta de Bouger con la corrección de color para el filtro B.

5.1.1. Resumen

Noche	C_V	K_V	C_B	K_B
23 - 24 Jun.	8.23 ± 0.09	0.22 ± 0.07	8.27 ± 0.16	0.53 ± 0.11
24 - 25 Jun.	8.3 ± 0.3	0.38 ± 0.17	8.4 ± 0.3	0.71 ± 0.17
15 - 16 Sept.	9.9 ± 0.3	1.7 ± 0.3	9.5 ± 0.4	1.8 ± 0.4
17 - 18 Sept.	8.4 ± 0.1	0.27 ± 0.09	8.02 ± 0.09	0.32 ± 0.08
20 - 21 Sept.	8.24 ± 0.09	0.21 ± 0.07	7.87 ± 0.11	0.33 ± 0.1

Tabla 5.1: Constantes fotométricas obtenidas.

Si descartamos la noche del 15 de Septiembre, en la cual, como ya se ha comentado, se cometieron errores a la hora de elegir la muestra de estrellas a observar, podemos ver que en banda V los resultados son bastante uniformes. Sus valores medios son:

$$C_V = 8.29 \pm 0.09 \qquad K_V = 0.27 \pm 0.05$$

Para el filtro B se aprecia mayor variabilidad, en especial en el coeficiente de extinción de las dos primeras noches. Sus valores medios son:

$$C_B = 8.15 \pm 0.09$$

$$K_B = 0.47 \pm 0.06$$

Comparemos estos resultados con los obtenidos por F.J. Sánchez [4]:

$$\begin{aligned} C'_V &= 8.27 \pm 0.04 \\ C'_B &= 7.98 \pm 0.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K'_V &= 0.22 \pm 0.12 \\ K'_B &= 0.479 \pm 0.020 \end{aligned}$$

Al utilizar sistemas fotométricos diferentes (distinto telescopio), era esperable algún cambio en las constantes instrumentales. En filtro V son prácticamente iguales, y en filtro B hay un ligero aumento.

Los coeficientes de extinción atmosférica no han sufrido ninguna evolución. Aunque de una noche a otra puede variar, en termino medio permanecen constantes.

5.1.2. Errores

Sea $u = f(x, y)$ una función de dos datos experimentales, x , y , no correlacionados. Tomaremos como fórmula de propagación de errores la siguiente:

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2. \quad (5.2)$$

El error de las cuentas netas, σ_N , será entonces

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_C^2}, \quad (5.3)$$

siendo B las cuentas brutas y C las cuentas del cielo.

El error de la cantidad que representaremos en ordenadas ($m(0) + 2.5 \log N$) será

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_m^2 + \left(\frac{2.5}{N}\right)^2 \sigma_N^2}. \quad (5.4)$$

El error de la secante de z podemos considerarlo despreciable frente al resto de fuente de errores de las constantes fotométricas. Dichas constantes se obtienen a partir de un ajuste por mínimos cuadrados, con lo que los errores vendrán dados por:

$$\sigma_{C_\nu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{y_i}^{-1} (y_i - K_\nu \sec z_i - C_\nu)^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_{y_i}^{-1}}}, \quad (5.5)$$

$$\sigma_{K_\nu} = \frac{2\sigma_{C_\nu}}{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\sec z_i - \overline{\sec z})^2}} \quad (5.6)$$

donde $y = m_\nu(0) + 2.5 \log N_\nu$, n el número total de medidas y $\overline{\sec z}$ la media habitual.

5.2. Brillo de cielo con MeCO

5.2.1. Mapeado de cielo

Representaremos los datos obtenidos mediante el script de MatLAB creado por Luis Alejandro Ramírez González en su trabajo [5]. Éste representa en coordenadas cartesianas el cielo, tomando como eje x el azimut y como eje y la altura. Tras transformar los valores de intensidad a magnitudes mediante la ecuación 3.6 se representan en el diagrama anterior. Interpolando linealmente para el resto de puntos se obtiene una curva en 3D que representa la luminosidad del cielo.

Para poder representarlo en 2D, basta rotar el gráfico hasta obtener una vista cenital de la superficie tridimensional. Las magnitudes se representan en una escala de colores, siendo los colores más cálidos las magnitudes más bajas (mayor luminosidad) y los más fríos las magnitudes más altas (menor luminosidad). Además, en el mapa resultante se indican mediante cruces blancas los puntos donde se realizaron las medidas.

De este modo se obtienen mapas que representan bastante bien la variación de la luminosidad del cielo con relativamente pocas medidas. Así mismo, si se utiliza la misma escala para todos los mapas, se aprecia rápidamente la gran diferencia en la "calidad" del cielo entre unos lugares y otros.

Para calcular la magnitud de brillo de cielo se han tomado $C_V = 8.3$, $K_V = 0.3$ como valores para las constantes fotométrica. Son los valores medios obtenidos a partir de las dos primeras observaciones realizadas.

Noche del 14 al 15 de Mayo - Yebes

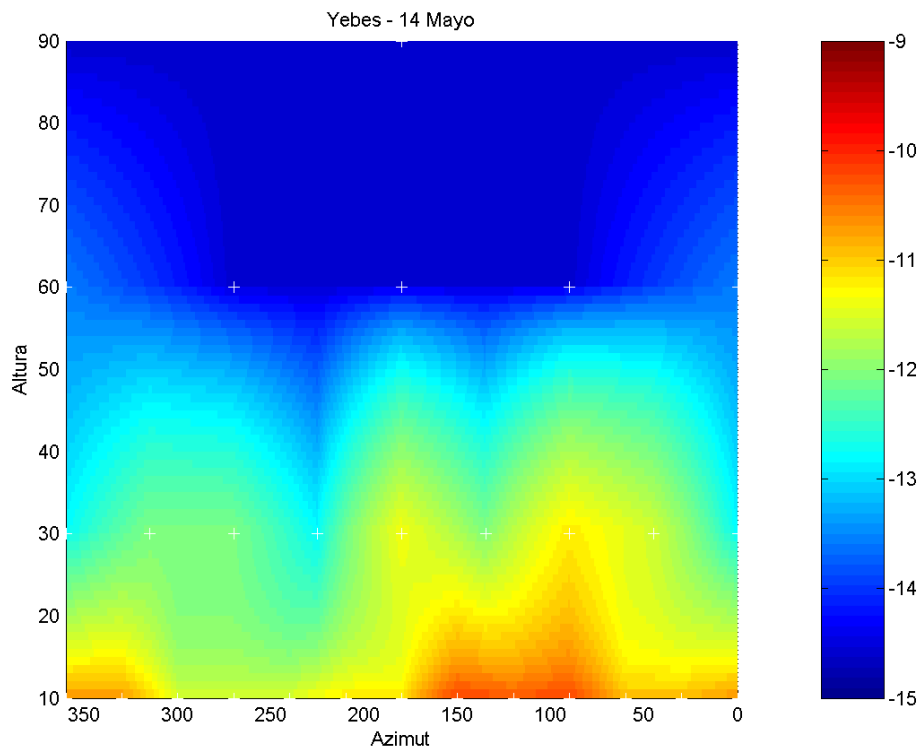


Figura 5.9: Mapa de brillo de cielo del observatorio de Yebes (Guadalajara).

Este mapa es un claro ejemplo de cómo la contaminación lumínica afecta no sólo al lugar donde se produce, sino que alcanza lugares muy alejados. Puede verse en la fig. 5.9, entre $\sim 50^\circ$ y $\sim 175^\circ$ de azimut, una zona donde la luminosidad aumenta hasta dos magnitudes respecto al valor medio a esa misma altura. Es precisamente el efecto provocado por las luces de la ciudad de Madrid.

Si comparamos este mapa con el realizado en 2001 por L.A. Ramirez [5], veremos que si bien la luminosidad media del cielo es similar, el efecto de Madrid se ha expandido en azimut. Mientras que en el 2001 la zona de luminosidad intensa estaba muy localizada entorno a 100° de azimut, en nuestras medidas el área se extiende entre 50° y 175° .

Habría que repetir las medidas para comprobar si esto es realmente un aumento de la contaminación lumínica provocada por Madrid, o solo es un efecto debido al cambio del observador (recordemos que las medidas de MeCO están sometidas a una componente subjetiva elevada).

Noche del 18 al 19 de Mayo - Madrid

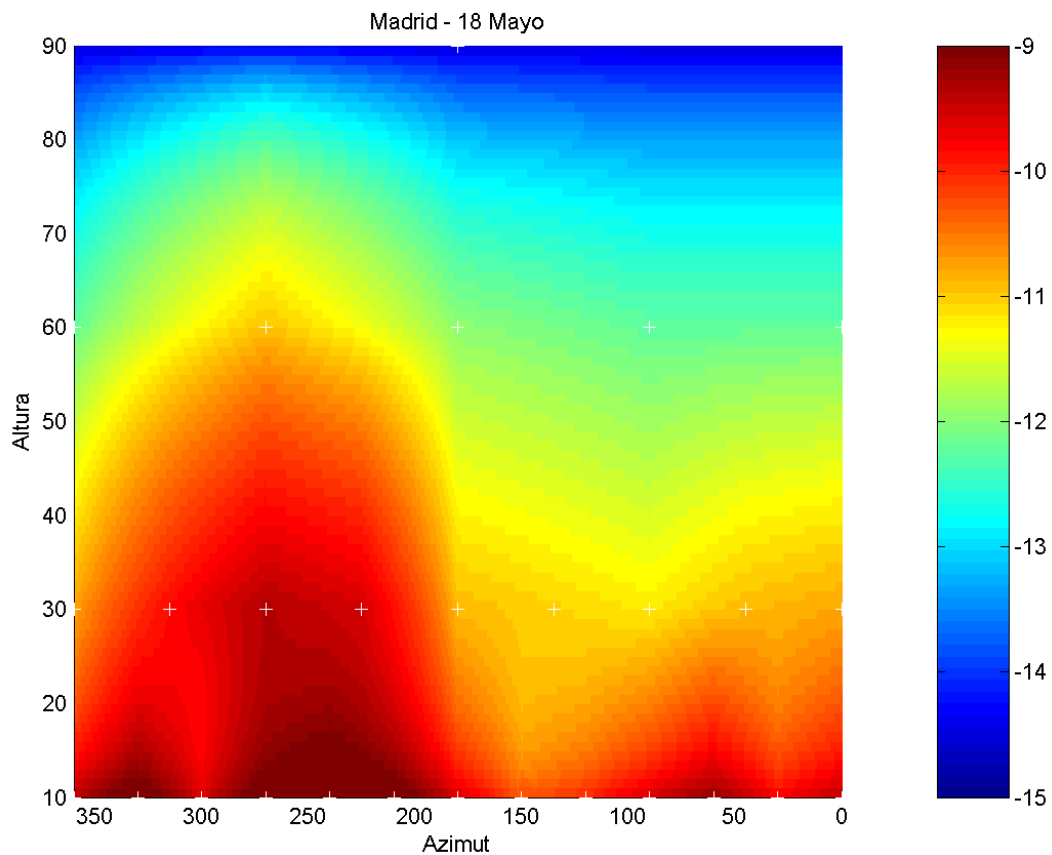


Figura 5.10: Mapa de brillo de cielo de Madrid desde el observatorio de la UCM en una noche sin luna.

Estas medidas fueron realizadas en una noche sin luna en el momento de la observación. Tal y como se observa a simple vista, la fig. 5.10 muestra una mayor luminosidad en dirección al centro de la ciudad. Se aprecia el efecto de la Torre Picaso, las Torres Kio, etc. Hay una variación de hasta 1.5 magnitudes para una altura de unos 40° entre las afueras de la ciudad y el centro.

Además esta observación coincidió con la semana en la que Madrid fue engalanada para la boda del Príncipe Felipe. Entre otros muchos elementos decorativos, se incluyeron potentes focos dirigidos hacia el cielo. Se puede ver su efecto sobre el brillo de cielo: entorno a 250° de azimet y 20° de altura aparece una zona de luminosidad más intensa que no aparece en siguientes observaciones.

Noche del 27 al 28 de Mayo - Madrid

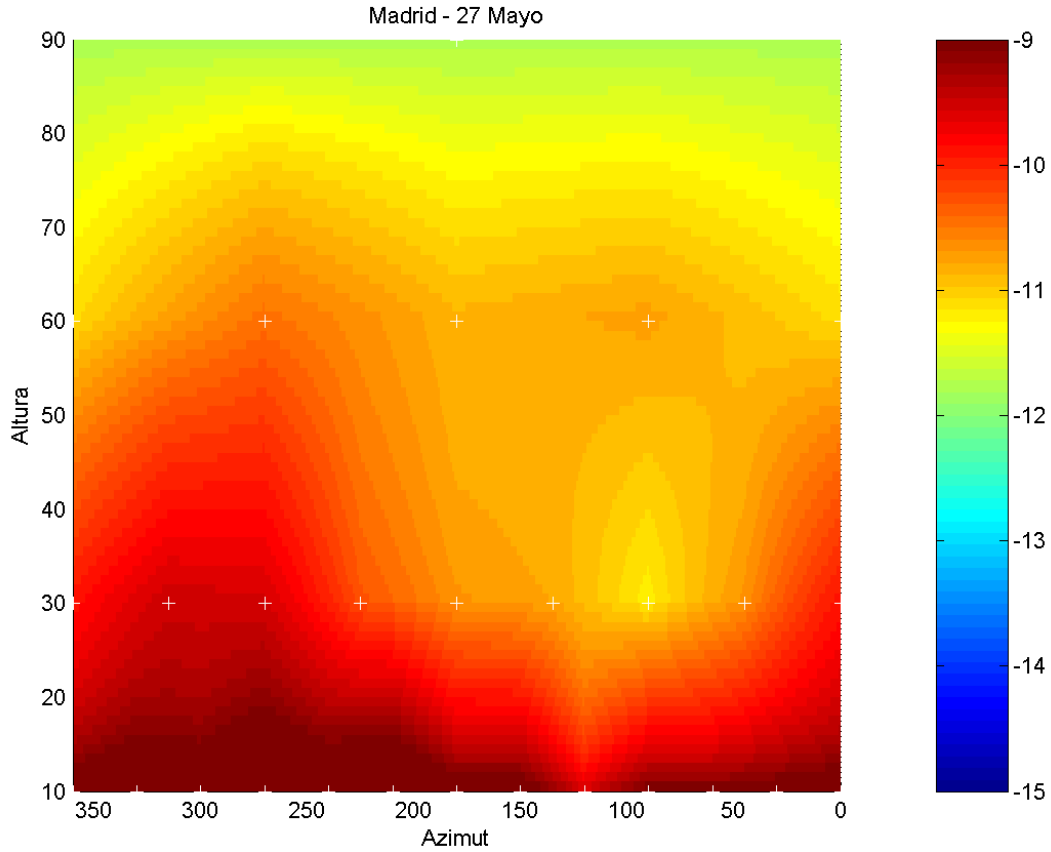


Figura 5.11: Mapa de brillo de cielo de Madrid desde el observatorio de la UCM en una noche con luna.

En esta ocasión las medidas se realizaron con luna en cuarto creciente, a una altura de $\sim 30^\circ$. Se repite el mismo patrón en azimut que en la observación anterior, pero se aprecia un aumento en la luminosidad media del cielo. A alturas elevadas se aprecia mayor brillo que en la observación anterior.

Brillo de cielo con fotómetro

Vamos a comparar los resultados obtenidos con MeCO con el brillo de cielo que hemos medido en nuestras observaciones fotométricas. Para ello tomaremos estrellas que en el momento de la observación se encontraran a alturas similares a las que hemos tomado medidas con MeCO.

La muestra utilizada se recoge en la tabla 5.2. Para calcular el brillo de cielo a partir de las cuentas medidas basta aplicar la siguiente ecuación:

$$m_c = C_V + \Delta m - K_V \sec z - 2.5 \log N_V. \quad (5.7)$$

Utilizaremos en cada caso las constantes fotométricas calculadas para cada noche. Δm está calculada en la ecuación 3.7.

Obtenemos para una altura de aproximadamente 60° un brillo de cielo entre 14.5 y 15 magnitudes

Estrella	Noche	sec z	altura	$CieloV$	m
ϵ Boo A	23 Junio	1.13	62°	5.848	~15.0
δ Ser B	23 Junio	1.17	59°	5.756	~15.0
Altair	17 Septiembre	1.17	59°	9.73	~14.5
η Peg	17 Septiembre	1.17	59°	9.20	~14.5
Etamin	20 Septiembre	1.14	61°	8.03	~14.5

Tabla 5.2: Brillo de cielo entorno a algunas estrellas.

por segundo de arco al cuadrado. Con MeCO, para esa misma altura el brillo de cielo está entorno a 11 magnitudes.

5.2.2. Curvas de luminosidad al atardecer

Mediante la ecuación 3.6 transformamos los valores de intensidad a magnitudes. Representamos gráficamente los resultados, colocando en abscisas el tiempo y en ordenadas el brillo de cielo.

18 de Mayo del 2004

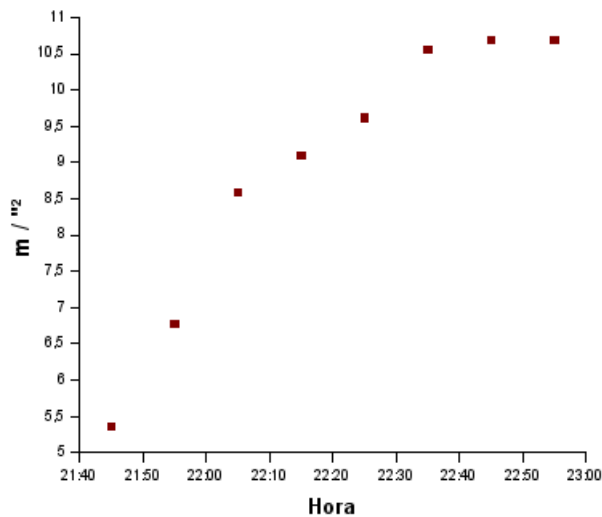


Figura 5.12: Evolución del brillo de cielo al atardecer.

El MeCO estaba orientado hacia el norte. En la fig. 5.12 se muestra como el brillo de cielo va disminuyendo mientras anochece, hasta alcanzar el valor promedio medido en los mapas (~10-11 mag., véase fig. 5.10).

2 de Junio del 2004

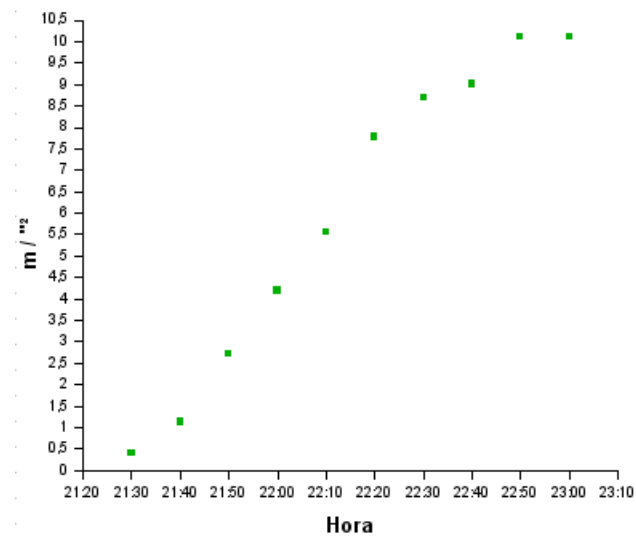


Figura 5.13: Evolución del brillo de cielo al atardecer.

En este caso MeCO estaba orientado hacia el oeste, con lo que se observa una mayor variación de la luminosidad.

Capítulo 6

Conclusiones

El proceso seguido para la elaboración de este trabajo puede resumirse en los siguientes puntos:

1. Las observaciones fotométricas se realizaron mediante el telescopio Meade LX200 de la cúpula este. Se eligió principalmente por su sistema de apuntado automático, que nos permitió agilizar mucho el proceso de medida.
2. Se realizaron las observaciones fotométricas en dos tandas, una en Junio y otra en Septiembre, para comprobar si existía alguna evolución en las constantes fotométricas. Se pretendían realizar un mayor número de observaciones, pero las malas condiciones climatológicas del curso lo hicieron imposible.
3. Se seleccionó una muestra de estrellas para calibrar el sistema fotométrico. Se procuró que en cada observación se midieran estrellas en un rango amplio de alturas, ya que no podía permanecer en la facultad durante toda la noche. Se tuvo especial cuidado en no elegir estrellas variables y lo más luminosas posibles.
4. Durante diferentes noches se realizaron medidas fotométricas de las estrellas elegidas, a partir de las cuales se calculó tanto el coeficiente de extinción como la constante instrumental.
5. Se utilizó MeCO para realizar medidas de brillo del cielo sobre el observatorio del UCM. También se intentó observar en otros lugares de la geografía del país, pero finalmente sólo se logró en el observatorio astronómico de Yebes (Guadalajara).
6. También se estudió la evolución del brillo de cielo al atardecer desde el observatorio mediante MeCO.

Las conclusiones que obtenemos de este estudio son:

1. Las constantes fotométricas obtenidas para el observatorio de la UCM mediante este estudio son:

$$\begin{array}{ll} C_V = 8.29 \pm 0.09 & K_V = 0.27 \pm 0.05 \\ C_B = 8.15 \pm 0.09 & K_B = 0.47 \pm 0.06 \end{array}$$

siendo C la constante instrumental del sistema fotométrico utilizado y K el coeficiente de extinción.

2. A pesar del cambio de telescopio, las constantes instrumentales son prácticamente las mismas que las obtenidas para el sistema Celestron 11 + fotómetro [4]. Solo se aprecia un pequeño aumento en la correspondiente al filtro B.
3. En filtro V no se aprecia una diferencia clara entre los coeficientes de extinción obtenidos en las observaciones de Junio y Septiembre. En filtro B si se aprecia un cambio importante, aunque el efecto pueda deberse a errores en las observaciones de Junio (datos insuficientes).

4. El valor medio de los coeficientes de extinción es prácticamente idéntico a los obtenidos por F.J. Sánchez en 2001 [4].
5. Si se observan estrellas con índices de color muy diferentes, es necesario añadir una corrección al cálculo de la recta de Bouger. Hay que introducir el llamado término de color:

$$m_\nu = C_\nu - K_\nu \sec z - D_\nu(B - V)$$

6. Se ha comprobado que diferentes usuarios de MeCO pueden obtener resultados cualitativamente iguales, tras comparar los mapas elaborados en este trabajo con los de L.A. Ramirez [5] en 2001.
7. Se aprecia un crecimiento del área del cielo de Yebes afectada por la contaminación lumínica de Madrid desde el 2001. No se puede concluir con seguridad si esto es un efecto real o solo es debido al cambio de observador.
8. Podemos notar también un aumento en el brillo promedio entre los mapas del 2001 y del 2004 para el cielo de Madrid. De nuevo, no podemos descartar que este efecto sea debido únicamente al cambio de observador.
9. Se ha comprobado que MeCO puede detectar los efectos de la iluminación "decorativa" (focos de la boda real) sobre el cielo del observatorio.
10. Existe una discrepancia notable (entorno a tres magnitudes) entre el brillo de cielo medido con el fotómetro y el obtenido mediante MeCO. Sería interesante realizar otra calibración detallada del aparato.

Bibliografía

- [1] Gordon Walker. *Astronomical Observations. An Optical Perspective*. Cambridge University Press, 1987.
- [2] Ian Ridpath. *Diccionario de Astronomía*. Editorial Complutense, 1999.
- [3] *Model SSP-3 Solid-State Stellar Photometer: Technical Manual for Theory of Operation and Operating Procedures*. OPTEC, Inc., <http://www.optecinc.com>.
- [4] Francisco Javier Sánchez Muñoz. *TAD: Medida de las Constantes Fotométricas del Observatorio de la UCM*. 2001.
- [5] Luis Alejandro Ramírez González. *TAD: Medida de la Luminosidad de Fondo de Cielo del Observatorio de la UCM*. 2001.
- [6] *Base de datos astronómica Simbad*. <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>.