



Contaminación lumínica: Medir para sobrevivir

David Galadí, Blanca Troughton
y Fernando Jáuregui

David Galadí-Enríquez, Centro Astronómico Hispano-Alemán (Observatorio de Calar Alto).

Blanca Troughton Luque, Red Andaluza de Astronomía (RAAdA).

Fernando Jáuregui Sora, Planetario de Pamplona.

Los tres autores son miembros de Cel Fosc, Asociación contra la Contaminación Lumínica, www.celfosc.org.

Cualquier problema medioambiental requiere, como primer paso para su análisis, diagnóstico y tratamiento, evaluar sus efectos de manera cuantitativa. A este respecto, el mundo de la contaminación lumínica se mueve aún en un estado casi «premoderno».

Abundan los diagnósticos cualitativos, incluso subjetivos, y a menudo se emplean como argumentos (hasta en administraciones y ambientes legales) meras fotografías sin valor científico real. Pero existen diferentes métodos de medida que, en manos de personas aficionadas a la astronomía, permiten ya dar el paso de lo cualitativo a lo cuantitativo. Solo basando los juicios en números contrastables podremos describir el problema y, sobre todo, controlar su evolución futura y, muy en especial, valorar la eficacia de las medidas legales que se empiezan a adoptar. Sin sistemas de medida homologados, comparables entre sí, seguiremos a merced de la subjetividad y, lo que es peor, de la manipulación y la propaganda. Este artículo recopila los sistemas de medida de la contaminación lumínica homologados y disponibles ya hoy: técnicas fotométricas basadas en la medida del brillo de las estrellas, procedimientos sencillos por medio del Sky Quality Seter (SQM) y métodos simples pero eficaces que recurren a la observación visual en estado puro.

FOTOMETRÍA ASTRONÓMICA APLICADA A UN PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL

El aspecto de la contaminación lumínica relevante en astronomía es el del brillo del fondo de cielo, es decir, la intensidad que emite un «trozo» de firmamento. Pero la astronomía lleva muchas décadas, podría decirse que incluso siglos, desarrollando técnicas fotométricas para medir la intensidad de los objetos celestes. Medir cuánta luz emite un trozo cualquiera de la bóveda celeste no es muy diferente, en el fondo, a evaluar el brillo aparente de los astros. Hay multitud de personas que disponen de los medios técnicos y la formación necesarios para realizar fotometría astronómica. Estas mismas técnicas se pueden aplicar con poco esfuerzo adicional a la medida del brillo del cielo. En los párrafos que siguen explicamos cómo convertir un telescopio ordinario equipado con cámara CCD y filtros fotométricos en un instrumento objetivo y preciso capaz de evaluar el brillo del fondo de cielo.



Hoy día, con los dispositivos captadores de imágenes de estado sólido, el número de estrellas de brillo conocido con precisión asciende a centenares de miles. Esto quiere decir que en el cielo, cada noche, disponemos de una multitud inmensa de fuentes luminosas calibradas que pueden servir de referencia para comparar con ellas el brillo del cielo y obtener así datos numéricos de la mayor calidad. Esta es la base de las técnicas de fotometría astronómica aplicada a la medida de la contaminación lumínica.

El instrumental y la atmósfera

Cuando se dirige a una estrella un equipo formado por telescopio, filtro y cámara CCD y se obtiene una imagen durante un determinado tiempo de integración, el resultado de la medida sobre la imagen estelar es un *número de cuentas*. El problema fotométrico básico consiste en relacionar esas cuentas con el brillo de la estrella tal y como consta en los catálogos, normalmente expresado en las unidades preferidas en astronomía, las magnitudes estelares. Entre el dato del catálogo para esa estrella y la medida arrojada por la cámara CCD se interponen dos obstáculos: el propio equipo instrumental y la atmósfera.

Las propiedades del telescopio, del filtro y de la cámara, unidas al tiempo de integración aplicado, ejercen una influencia en el resultado de la medida. El influjo del tiempo se elimina de un modo trivial al dividir las cuentas registradas entre el tiempo de integración. Resulta así el dato en cuentas por segundo. Pero aun así, cada combinación de telescopio con filtro y con cámara dará un resultado distinto. Es preciso, por tanto, que cada cual calibre su propio sistema instrumental. Para este fin se compara la medida en cuentas por segundo con el brillo catalogado de las estrellas.

Pero surge entonces el segundo obstáculo: la atmósfera. Los catálogos recogen los datos de brillo aparente de las estrellas fuera de la atmósfera. Sin embargo, las medidas con telescopio se realizan desde el interior de la atmósfera. Según las características de cada noche puede haber más o menos atenuación del brillo de los astros. ¿Cómo saber, entonces, qué parte de la medida instrumental se debe a alteraciones introducidas por los equipos y qué parte hay que atribuir a la extinción atmosférica?

Fotometría astronómica absoluta

La propia atmósfera ofrece un medio para separar ambos efectos. Como se aprecia en la Figura 2, la luz de estrellas situadas a alturas distintas sobre el horizonte atraviesa masas de aire diferentes. Por lo tanto, el efecto atenuador de la atmósfera estará relacionado con la altura de los astros. Si se observan estrellas de brillo conocido a distintas alturas y se comparan sus medidas instrumentales con la altura de cada observación se puede deducir el efecto atmosférico, expresado en forma numérica en el parámetro conocido como *coeficiente de extinción*.



Figura 1. El instrumental básico para la medida del brillo de fondo de cielo por métodos fotométricos absolutos: un telescopio (a poder ser automatizado), equipado con cámara CCD astronómica y rueda de filtros. (Foto J. Aceituno, Itec Astronómica)

La observación de estrellas a distintas alturas (o a distintas masas de aire) supone la base de la técnica de fotometría absoluta en astronomía.

Una vez descontado el efecto atmosférico se puede comparar la medida que da la cámara con los valores fotométricos catalogados para las estrellas. De aquí se deriva la constante instrumental de la combinación telescopio-filtro-cámara, que recibe el nombre de *punto cero*.

El coeficiente de extinción depende de las condiciones meteorológicas y lo normal es que varíe de una noche a otra, o incluso a lo largo de una misma noche. Una noche en que el coeficiente de extinción no se mantenga estable no es útil para intentar este tipo de calibraciones. Se deben usar para ello

Contaminación lumínica: Medir para sobrevivir

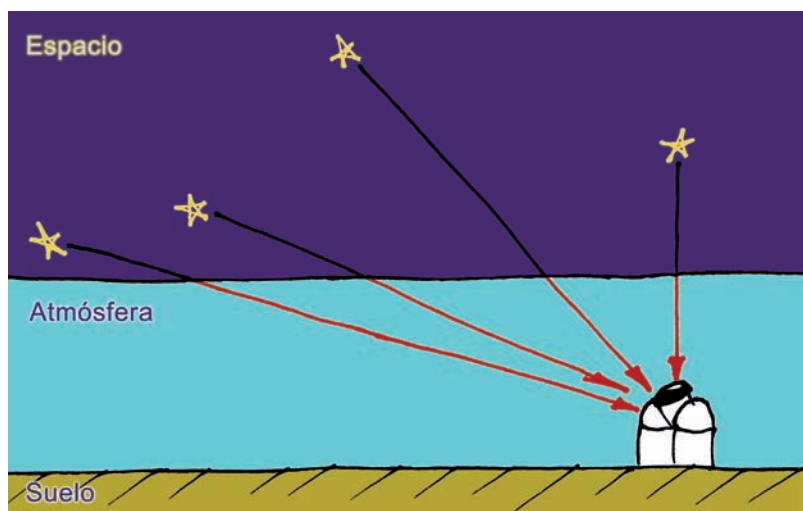


Figura 2. Cuanta mayor altura sobre el horizonte muestra un astro, menor es la masa de aire atravesada por su luz en el recorrido a lo largo de la atmósfera hasta el observador (trayecto señalado en rojo). (Dibujo D. Galadí)

noches estables o, como suele decirse, *fotométricas*. Es indiferente que haya o no Luna, o que el cielo esté muy brillante o poco. Lo importante es que las condiciones, en cuanto a transparencia del aire, sean estables.

El punto cero es una característica intrínseca del sistema instrumental. En teoría cada combinación de telescopio con filtro y cámara posee su propia constante instrumental. Lo ideal es caracterizar

el equipo instrumental con cada uno de los filtros de que se disponga, y hacerlo el mayor número de veces posible, en noches distintas. Tras haber realizado estos cálculos con cada filtro en un número suficiente de ocasiones se verá que los coeficientes de extinción son distintos según la noche, pero los parámetros instrumentales deberían parecerse. Así se podrá comprobar si el punto cero es realmente o no estable, y la dispersión de los resultados dará una idea de la precisión a la que se podrá llegar luego al efectuar medidas de fondo de cielo.

Inconvenientes y ventajas

Los inconvenientes de esta técnica fotométrica son evidentes. Se requiere disponer de un telescopio y una cámara CCD astronómica y, además, los filtros empleados han de ser fotométricos. No se pueden obtener medidas sin filtro, o con filtros para tricromía fotográfica. Lo ideal es emplear filtros fotométricos correspondientes a algún sistema estándar, el más extendido de los cuales es el de Johnson-Cousins. Recomendamos trabajar con los filtros *B*, *V*, *R* de este sistema fotométrico. Además, el proceso de calibración o determinación del punto cero en cada filtro puede resultar penoso y requiere ciertos conocimientos y equipos (ordenadores, programas de procesado de imágenes).

Sin embargo, las ventajas superan todos los inconvenientes. Hay muchas personas en nuestro entorno con los aparatos, programas y conocimientos suficientes para enfrentarse a este problema. Una vez calibrado el punto cero del sistema instrumental en cada filtro, ya solo es necesario repetir el proceso de vez en cuando (quizá cada seis u ocho meses) para comprobar que no hay cambios y entretanto utilizar para las medidas el punto cero ya conocido. Hecha la calibración, las medidas no llevan más de unos minutos y los resultados son no solo de la mayor precisión que se pueda obtener, sino que resultan directamente comparables con los obtenidos por cualquier otra persona en cualquier otro lugar del mundo, estarán homologados. Por añadidura, el uso de filtros distintos ofrece información valiosa sobre el *color* del brillo de fondo de cielo, un dato crucial y que no se puede deducir con ninguna otra técnica. Este procedimiento permite además calibrar otros dispositivos como los sencillos SQM (ver el siguiente apartado de este artículo).

Aunque existen en el mercado aparatos basados en cámaras CCD, filtros y objetivos ojo de pez que efectúan estas medidas de manera automática o semiautomática, su coste es elevado. Si se aplican las técnicas que hemos esbozado es posible convertir cualquier telescopio con CCD y filtros en un aparato de medir el brillo de fondo de cielo. En este artículo introductorio, y sin recurrir a fórmulas, no podemos aspirar a mucho más que dar una idea general de la filosofía de esta técnica, pero quien tenga interés y disponga de los medios adecuados podrá profundizar en ella sin dificultades mucho mayores que las impli-

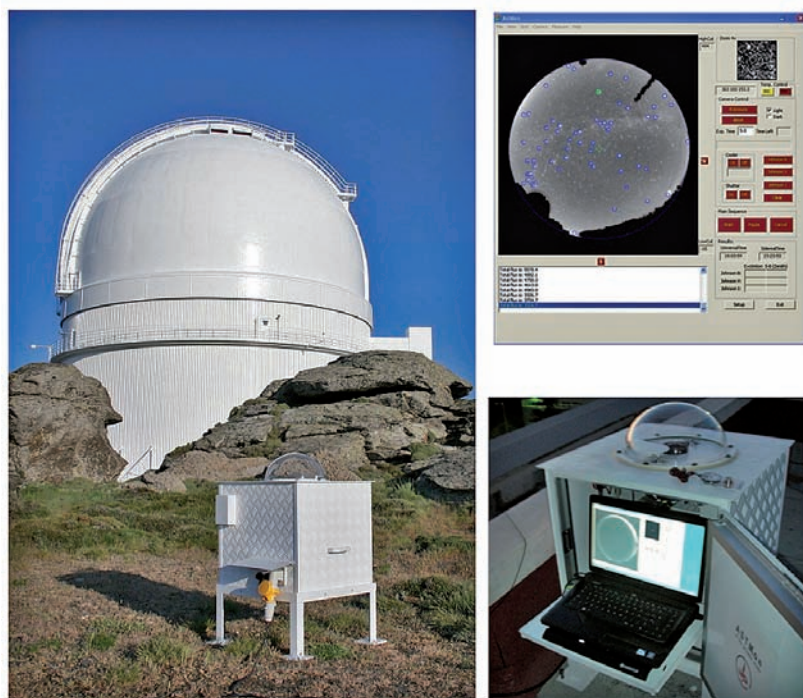
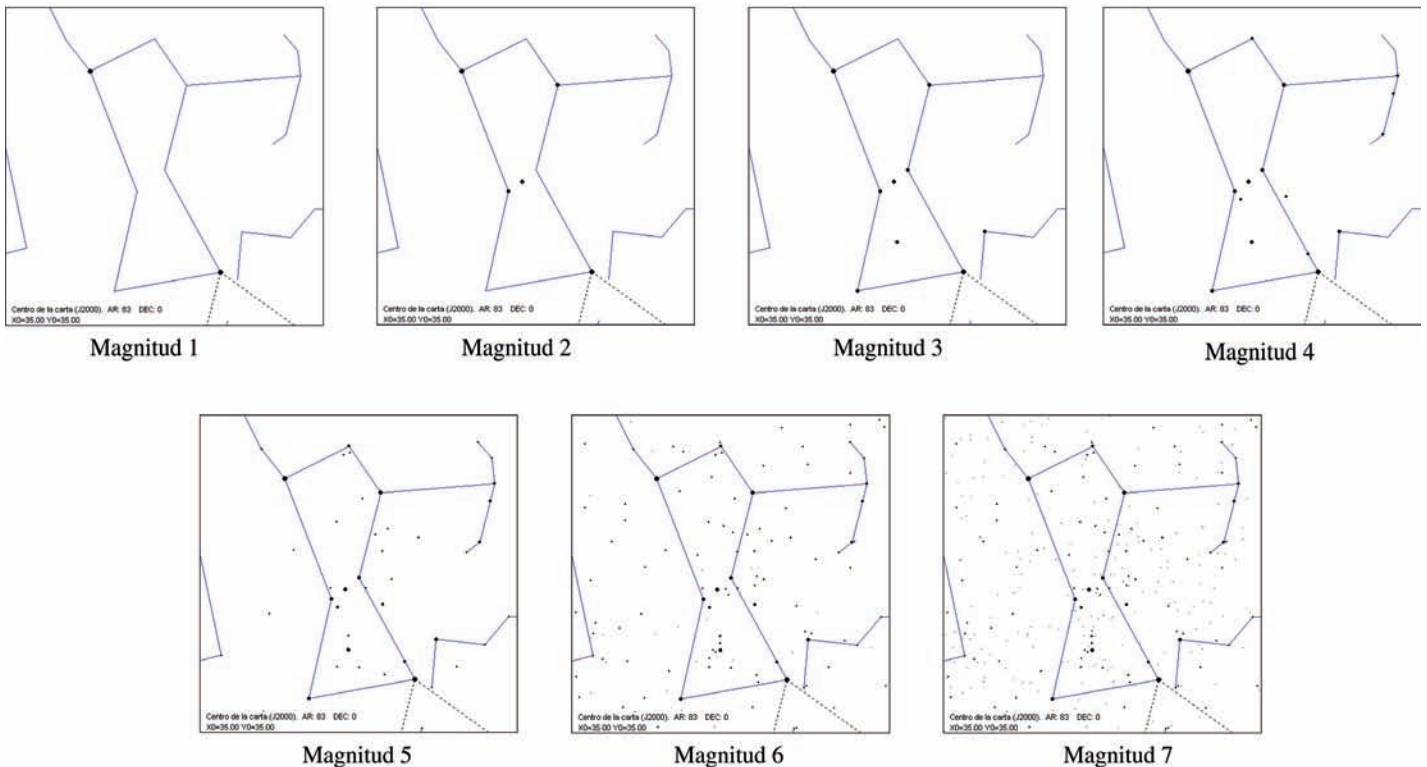


Figura 3. El mercado ofrece instrumentos que efectúan medidas de brillo de fondo de cielo de manera automatizada para toda la bóveda celeste, como este ejemplar instalado en el Observatorio de Calar Alto. No obstante, su precio es alto para el uso no profesional. (Foto J. Aceituno, Itec Astronómica)



CARTA PARA EL REGISTRO DE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA*
PROYECTO IACO – www.iaco.es

CONSTELACIÓN ORION (ORI)



* Carta elaborada a partir de las cartas de SPMN (Red de Investigación sobre Bóolidos y Meteoritos).

Figura 4. Carta estelar de referencia para la toma de medidas a simple vista según los protocolos del proyecto IACO. En este caso se muestran los mapas correspondientes a la región de Orión, la misma zona celeste que se emplea como referencia en el proyecto *Globe at Night*. (Fuente: www.iaco.es)

cadadas en las medidas fotométricas habituales con cámara CCD. Para ello puede dirigirse a los autores del artículo para obtener más información.

MIDIENDO LA CALIDAD DEL CIELO CON MÉTODOS SENCILLOS

Quienes tenemos la astronomía como afición disponemos de dos herramientas eficaces para determinar el brillo del fondo del cielo en cualquier lugar, y contribuir así con nuestras medidas a paliar la situación a la que nos está llevando una iluminación artificial desmedida, que conduce a una pérdida de calidad del cielo nocturno a una velocidad vertiginosa.

La primera herramienta es la vista. Ojos que no miran como cualesquiera otros, entrenados para ver más allá de lo común, para ver colores en el cielo: estrellas blancoazuladas, amarillentas, rojizas... y están acostumbrados a fijarse y saber contar en la oscuridad. La otra herramienta que cada vez se hace más popular es medir con un aparato de uso muy simple, el SQM.

Ambos métodos son muy sencillos pero tienen sus ventajas e inconvenientes. La ventaja funda-

mental consiste en que para su aplicación no se requiere una instrumentación de alto coste, ni unos conocimientos específicos en astrofotografía y fotometría astronómica. La desventaja es la pérdida de precisión, aunque este último aspecto se consigue eliminar en el caso de realizar las medidas con el SQM cuando estos están calibrados.

Método visual: contando estrellas

Este método es muy simple, basta hacer un conteo de estrellas a simple vista en unas constelaciones determinadas, por comparación con unos mapas prediseñados que muestran las estrellas que se ven según lo contaminado que está el cielo. Las medidas han de hacerse en una fecha y franja horaria común para todos los observadores, con cielos despejados y sin Luna, habiendo hecho previamente la adaptación a luz del lugar durante un mínimo de quince minutos. Varios proyectos puestos en marcha desde hace algunos años en el mundo utilizan este método.

El proyecto IACO (Investigación y Acción sobre Cielo Oscuro, www.iaco.es), muy conocido y popular



Figura 5. Dispositivo SQM montado sobre un soporte de construcción casera pero preciso, que permite efectuar medidas en diferentes valores de acimut y altura. Para que las medidas angulares sean correctas se emplean, como se aprecia en la figura, un nivel de burbuja y una brújula. (Foto B. Troughton)

en España, sobre todo desde el Año Internacional de la Astronomía 2009, está diseñado especialmente para la latitud media de España. Se determina la magnitud media que corresponde a un lugar al contar las estrellas en tres constelaciones alrededor del cenit en una determinada fecha del año (en 2012, del 11 al 23 de febrero y del 13 al 25 de marzo). Así todos los observadores obtendrán una medida de la oscuridad del cielo bajo las mismas condiciones. En España este proyecto cuenta actualmente con veinte coordinadores provinciales de asociaciones astronómicas y con el apoyo de otras entidades como Cel Fosc, el Planetario de Pamplona y la Red Andaluza de Astronomía (RAAd).

Otro proyecto con alta participación mundial es *Globe at Night* (www.globeatnight.org). Si bien solo hay que hacer el recuento en la constelación de Orión, tiene el inconveniente de que su altura cambia según la latitud, por lo que resulta efectivo

para comparar la calidad del cielo en un mismo lugar o en zonas con latitud equivalente.

La ventaja de estos métodos es que son fáciles de realizar incluso para los recién iniciados, se obtienen miles de medidas con la ayuda de la participación ciudadana, contribuyendo a la difusión social del problema de la contaminación lumínica, para muchos totalmente ajeno e incluso irrisorio, hasta en los medios de comunicación. Y este es realmente uno de sus aspectos más importantes. Además, este método presenta un alto potencial cuando se aplica en la enseñanza, ya que aúna el método científico con las tecnologías de la innovación y la comunicación, pues los datos se introducen vía Internet en un formulario específico. Al ganar en sencillez, se pierde en precisión y ello constituye su desventaja, llegando a la exactitud de la magnitud en números enteros. Asimismo, los resultados dependen en cierta medida de circunstancias inherentes a los propios observadores, pues cada persona tiene un coeficiente de percepción variable, según su experiencia y sus condiciones físicas: agudeza visual, adaptación a la oscuridad, etc.

La precisión en la medida se mejora cuando el recuento de estrellas se realiza en las llamadas zonas MALE (de «magnitud límite estelar»), que permiten determinar el brillo de la estrella más débil visible a simple vista, por tanto, es un factor de la calidad del cielo, llegando incluso a una precisión de la décima de magnitud. Este cálculo se basa en un conteo visual de estrellas de una zona del cielo delimitada por tres o cuatro estrellas y se hace la transformación a magnitudes estelares mediante una tabla de conversión que viene dada en las cartas. Al calcular la MALE en el cenit y alrededor de él con una altura superior a los 30° sobre el horizonte y promediar se obtiene un valor que da cuenta de las luces artificiales repartidas a lo largo de la bóveda celeste. La desventaja de este método es que para su aplicación requiere un mayor conocimiento del cielo y una cierta experiencia en la observación. Éste es un método muy usado por los observadores de meteoros.

Midiendo el brillo del cielo con el SQM

El medidor de la calidad del cielo, SQM (Sky Quality Meter), es un aparato que contiene un fotómetro muy sensible que mide el brillo del cielo nocturno en luz visible, y da el resultado de la medida en magnitudes por segundo de arco cuadrado ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Se deben utilizar los modelos SQM-L (manual) y SQM-LU (interfaz USB), que tienen mayor sensibilidad que el SQM simple y una lente para reducir el campo de visión. De esta forma recogen más luz de un cono más pequeño, 20° de diámetro frente a los 80° del otro. Adaptando el SQM a un trípode junto a dos círculos graduados, en el plano horizontal y en el vertical, se obtiene un registro del brillo de todo el cielo a distintas alturas y acimutes (proyecto NIXNOX, SEA: www.sea-astronomia.es/drupal/nixnox).

Contaminación lumínica: Medir para sobrevivir

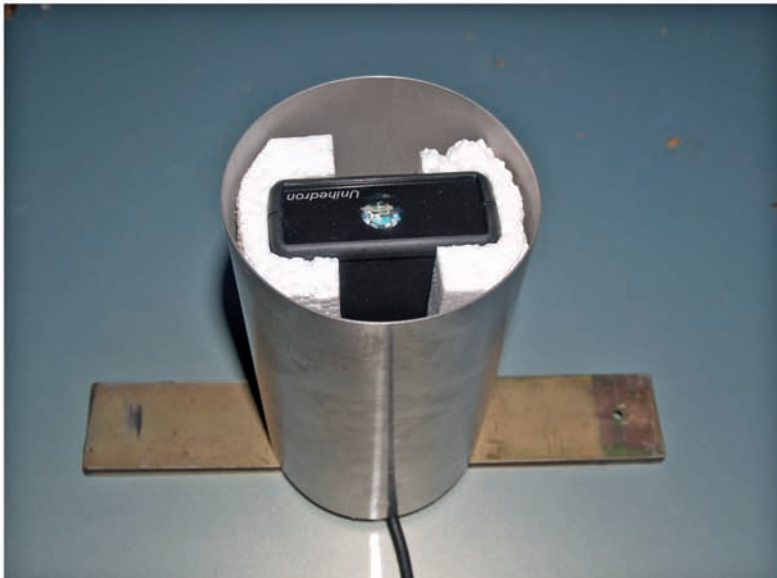


Figura 6. Izquierda: Sky Quality Meter, versión LU, adaptado al soporte magnético para su uso como parte del sistema «Road Runner» («Correcaminos»). Derecha: el dispositivo instalado sobre el techo de un automóvil, listo para su uso. (Fotos B. Troughton)

Aunque la precisión del aparato no es absoluta, puede usarse para comparar la calidad del cielo desde un mismo lugar a lo largo de una noche o en noches sucesivas y comparar la calidad del cielo en lugares

diferentes. A pesar de que la calibración de cada unidad se realiza con instrumental de alta calidad, es precisa la calibración entre las distintas unidades para asegurar homogeneidad entre los resultados.



LA AVENTURA DEL ESPACIO

LA EXPOSICIÓN

Más de 300 piezas originales y 2.500 m² de historia

Pabellón XII Recinto Ferial Casa de Campo

¡La fiebre espacial ha vuelto!

www.laaventuradelespacio.com

Entradas a la venta en www.entradas.com
en el 902 585 125 y en taquilla de la exposición

JOHN NURMINEN
EVENTS

ArtStation

UTXU
www.utxu.pt

COSMOSPHERE
MUSEO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Trigion

U.S. Space &
Rocket Center

WORLDWIDE
EXHIBITIONS

WORLDWIDE
EXHIBITIONS

WORLDWIDE
EXHIBITIONS

EL MUNDO
ORBYT.

SEIZ

HISTORIA
QUO

Con la colaboración de:

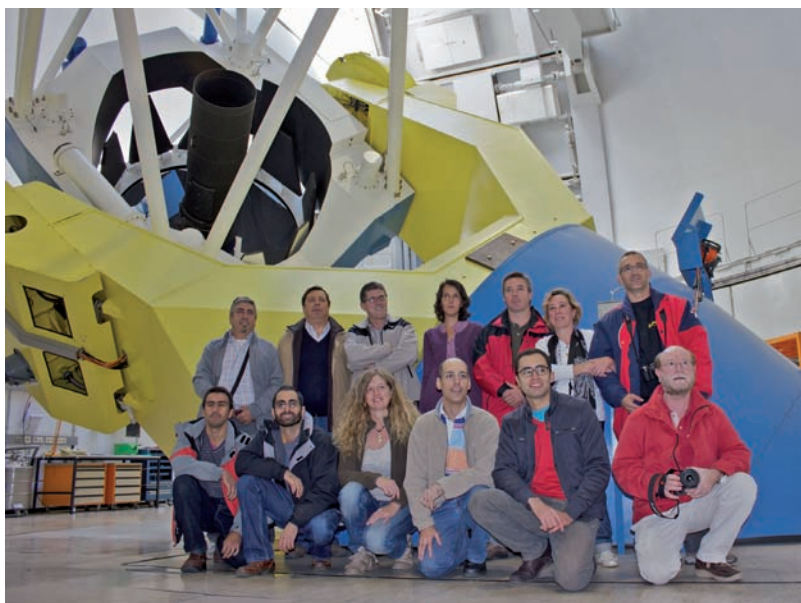


Figura 7. Grupo de asistentes al II curso de fotometría astronómica absoluta aplicada a la medida de la contaminación lumínica en el Observatorio de Calar Alto en el año 2010. (Foto J. C. Aznar)

La ventaja que tiene el SQM es que trabaja con las mismas unidades que las usadas en la fotometría astronómica, es de fácil transporte, hace las medidas en el rango espectral del filtro V , muy similar a la visión humana con un máximo de eficacia en los 550 nm y no resulta demasiado caro. Además, los observadores expertos en fotometría astronómica pueden calibrar el SQM obteniendo su punto cero con la ayuda del telescopio con el que se haya hecho la fotometría del brillo de fondo de cielo, técnica desarrollada en los cursos de fotometría aplicada a la medida de la contaminación lumínica en Calar Alto y a la que se ha dedicado la primera parte de este artículo.

Sistema Road Runner

El sistema «Road Runner» o «Correcaminos» permite automatizar las medidas obtenidas con el SQM-LU, adaptándolo al techo de un automóvil mediante una estructura imantada. Aprovechando la capacidad de comunicación externa, vía USB, de este modelo para comunicarse con un dispositivo GPS y un ordenador, recoge los resultados de las medidas mientras el vehículo circula por las carreteras.

El programa específico que permite la visualización inmediata de los datos capturados por el sistema ha sido desarrollado por miembros de la Sociedad Malagueña de Astronomía en colaboración con la Universidad de Málaga. Debido a que el sistema recoge toda la luz del cenit en un radio de 10° , los resultados son fiables cuando se circula por caminos no iluminados y sin árboles alrededor que afecten a las medidas. El método, presentado en el IV Congreso Internacional de Espacios Naturales de Cielo Oscuro (Montsec, 2011), se está aplicando con asombrosos resultados en España, Alemania y Eslovenia. Su gran

ventaja es que permite capturar miles de medidas en una sola jornada con una gran precisión.

INICIATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

En los últimos años se han puesto en marcha varias iniciativas ciudadanas para medir el brillo del fondo de cielo. La aplicación de técnicas usadas en la astronomía profesional es una forma de retorno tecnológico a la sociedad que puede ayudar a resolver el problema de la contaminación lumínica, que no ha dejado de crecer en los últimos decenios. Desde estas líneas queremos animar a la comunidad lectora de *Astronomía* a participar en ellas.

► **Curso de fotometría astronómica aplicada a la medición de la contaminación lumínica.** Dirigido a astrónomos aficionados y técnicos, está organizado por Cel FosC, Asociación contra la Contaminación Lumínica, con el apoyo del Observatorio de Calar Alto, el Planetario de Pamplona, la RAdA y la Fundación Descubre. Se celebra en el Observatorio de Calar Alto en torno a una Luna Nueva de otoño. En preparación la cuarta edición.

► **Proyecto NIX-NOX.** Dirigido a Agrupaciones Astronómicas, está organizado por la Sociedad Española de Astronomía (SEA). Se trata de identificar aquellos lugares accesibles al público, en los que el cielo nocturno tiene condiciones de oscuridad que permiten observaciones astronómicas de calidad.

► **Proyecto IACO.** Dirigido a astrónomos aficionados, docentes y público en general, cuenta con la colaboración de veinte agrupaciones astronómicas españolas. Activo cada año durante tres semanas de invierno-primavera en torno a la Luna Nueva. Un proyecto internacional con muchos puntos en común es *Globe at Night*.

Asimismo, la iniciativa *Star Light*, patrocinada por la UNESCO y el IAC requiere la realización de campañas de medición de la oscuridad del cielo nocturno, para garantizar que las *reservas Star Light* cumplen con el objetivo de preservar la oscuridad natural del cielo.

CONCLUSIÓN

El estado actual de la tecnología tanto de observación como de comunicaciones, el nivel alcanzado de concienciación entre la comunidad astronómica no profesional y el arranque de iniciativas legislativas en nuestro entorno cercano, todo ello hace que haya llegado el momento de dar el salto de lo cualitativo a lo cuantitativo. Antes era el tiempo de *divulgar para concienciar*, y a esa labor hay que seguir dedicándose sin tregua. Pero si queremos que todos nuestros esfuerzos culminen con éxito, el paso siguiente e ineludible es este: *medir para sobrevivir*. **A**