

Mapa de brillo de fondo de cielo de la Comunidad de Madrid



Berenice Pila Díez

Supervisor:

Dr. Jaime Zamorano Calvo



Índice

1. Introducción	3
2. Objetivos	5
3. Recursos y material empleado	6
4. Procedimiento	10
4.1. Adquisición de datos	10
4.2. Procesado y análisis de datos	15
5. Calibraciones	17
5.1. SQM-LE y SQM manual	17
5.2. Luxómetro y SQM-LE	21
6. Resultados	22
6.1. Mapas	22
6.2. Histogramas	26
6.3. Dependencia del brillo de fondo de cielo con la distancia a las fuentes de iluminación	28
7. Líneas de trabajo abiertas	31
8. Contribuciones y agradecimientos	32
A. Instrucciones detalladas para el procesado y análisis de datos	33
A.1. Preparación de los archivos de datos	33
A.2. Procesado y análisis de datos	33
A.3. Elaboración de los ficheros para el Google Earth	34
A.4. Elaboración de los mapas	34
A.5. Evaluación de los datos de carreteras independientes	34
B. Código de los programas implementados	36

1. Introducción

La contaminación lumínica es, en pocas palabras, el resultado de una incorrecta (por excesiva) iluminación de ciudades y carreteras. Se manifiesta a través de distintos aspectos como son la iluminación inhomogénea, el deslumbramiento, la luz intrusa, la difusión hacia el cielo, el encandilamiento y el sobreconsumo eléctrico.

El fenómeno de la contaminación lumínica ha ido cobrando importancia conforme el desarrollo y las demandas energéticas han ido alcanzando nuevas cotas, y ha comenzado a ser objeto de debate y regulación cuando su alcance ha afectado negativamente la calidad de los observatorios astronómicos y cuando los estudios medio ambientales han alcanzado un número crítico suficiente como para hacer saltar las alarmas.

En los últimos tres años y bajo el auspicio de la UNESCO con su iniciativa "Starlight (luz de las estrellas)", se han iniciado diversos programas para la concienciación y la reducción de la contaminación lumínica en pro de la biodiversidad, la economía y la conservación de los bienes científico-astronómicos y del patrimonio cultural humano que representa el cielo nocturno.

Por todo ello, desde hace tiempo el Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica II de la Universidad Complutense de Madrid viene estudiando el problema de la iluminación excesiva en los campus de la universidad, con especial interés por el efecto de la misma sobre el observatorio astronómico de la universidad (Observatorio UCM), que se ubica en el campus de Ciudad Universitaria. La continuación natural de este esfuerzo científico es la extensión de los estudios al área de la Comunidad de Madrid.

Para la evaluación de la contaminación lumínica existen diversas técnicas y magnitudes mensurables. Una de ellas es el brillo de fondo de cielo, un parámetro astronómico que da cuenta del flujo luminoso procedente desde la dirección cenital. Este parámetro permite determinar la calidad de los cielos nocturnos como función del objeto astronómico más débil que podría detectarse en ese emplazamiento (el resto quedarían enmascarados por el brillo de fondo de cielo). Éste es por tanto un parámetro objetivo para la evaluación cuantitativa de la contaminación lumínica.

Este parámetro, hasta hace poco fuera del alcance práctico de la realización de un mapa de una región debido a que requería el uso de fotómetros acoplados a telescopios, observaciones de larga exposición y un tiempo de procesado grande, se sitúa ahora como uno de los más sencillos, económicos y practicables gracias a la aparición en el mercado de dispositivos de medida portátiles de procesado integrado.

1 INTRODUCCIÓN

Así pues, dada la oportunidad de realizar una evaluación espacial del estado de la contaminación lumínica a grandes escalas de forma novedosa, la realización de un mapa de brillo de fondo de cielo de la Comunidad de Madrid y el análisis de los resultados suponen una tarea innovadora y que abundará en conclusiones variadas e interesantes, así como permitirá contrastar ideas generalmente establecidas en el ámbito de la contaminación lumínica.

2. Objetivos

De acuerdo con los aspectos más relevantes anteriormente expuestos, los objetivos de este Trabajo Académicamente Dirigido (T.A.D.) son los siguientes:

Objetivos principales:

- Elaboración de un mapa de brillo de fondo de cielo de la Comunidad de Madrid.
- Calibración de los dos instrumentos de medida del brillo de fondo de cielo de que dispone el Departamento.

Objetivos secundarios:

- Establecimiento de una metodología estándar de medida que resulte práctica para adoptarla como patrón en campañas futuras.
- Análisis de los resultados del mapa y determinación de la calidad astronómica y de iluminación de distintas áreas.
- Estudio de una posible correspondencia entre el brillo de fondo de cielo y la iluminación superficial.
- Estudio de la dependencia del brillo de fondo de cielo con la distancia a fuentes de iluminación en un entorno artificialmente iluminado; determinar si la medida entre luminarias es o no representativa del brillo de fondo de cielo con la iluminación apagada.
- Determinación de ubicaciones estratégicas para el posible emplazamiento (permanente o transitorio) de dispositivos Astmon¹.

¹Astmon es un dispositivo desarrollado por la empresa iTec Astronomica S.L., cuya finalidad básica es evaluar la contaminación lumínica desde el punto de vista astronómico, para lo cual se sirve de un montaje con cámara AllSky y de un sistema interno de control automático, de procesado y de análisis. Puede encontrarse información detallada en la siguiente dirección web: <http://astro-itec.com/pageID.8771094.html>

3. Recursos y material empleado

Los materiales empleados en el desarrollo de este T.A.D. pueden clasificarse en tres tipos: de carácter físico, de carácter informático y de carácter humano. A continuación se detallan los recursos de cada categoría.

Material físico:

- Automóvil.
- Sky Quality Meter (SQM), control y toma de datos de forma manual, alimentación autónoma por baterías. Véase la figura 1.
- SQM-Lens Ethernet (SQM-LE), control y adquisición de datos mediante conexión Ethernet.
- Batería independiente auxiliar para la alimentación del SQM-LE (entre 4V y 6V). Véase la figura 1.
- Cable para la alimentación del SQM-LE.
- Ordenador portátil (adquisición y archivo automático de los datos).
- Convertidor de corriente DC-12V a AC-230V (suministro de corriente desde la batería del vehículo hasta el portátil). Véase la figura 1.
- Cable para la alimentación del portátil.
- Cable para conexión Ethernet.
- Dispositivo GPS con alimentación autónoma por baterías.
- Cable USB (transferencia de datos desde el dispositivo GPS hasta el ordenador).
- Mapa de carreteras.

Recursos informáticos:

- SQM Reader Pro (programa de control y adquisición de datos).
- MATLAB 5.3.
- Emacs.

3 RECURSOS Y MATERIAL EMPLEADO



Figura 1: Material experimental.

- Excel(Microsoft)/Calc (OpenOffice).
- Google Earth (GE).
- GE Graph.
- Origin.
- Gimp.

Recursos humanos:

- Conductor para el automóvil.
- Responsable del control de los instrumentos y de la adquisición de datos.

Es conveniente no dejar de mencionar que las unidades SQM son unos dispositivos desarrollados por la empresa Unihedron y diseñados para evaluar el brillo de fondo de cielo por medio de un sensor de luz y de una serie de algoritmos internos. Como datos de salida proporcionan la temperatura interna del instrumento, la magnitud por arcosegundo cuadrado del brillo de fondo de cielo y la

3 RECURSOS Y MATERIAL EMPLEADO

magnitud visual aparente estimada. En la figura 2 se incluye un esquema de la estructura y funcionamiento internos del SQM-LE que puede encontrarse en su Manual del Usuario. La información puede ampliarse en la página web de Unihedron (<http://www.unihedron.com/projects/sqm-le/>) o en el propio Manual del Usuario.

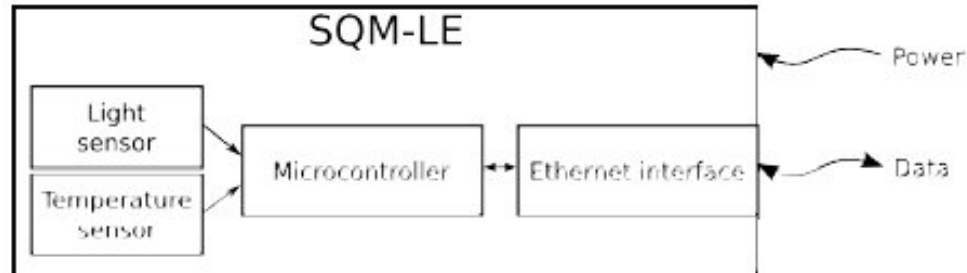


Figura 2: Esquema de operación interna del SQM-LE.

Montaje:

Para la toma de datos, el montaje operativo del instrumental de medida requiere básicamente tres instalaciones distintas.

La primera instalación es la ubicación mecánica estable del SQM-LE a la baca del automóvil y la sujeción de la misma a éste.

La segunda instalación consiste en la conexión del SQM-LE a la batería independiente auxiliar y su conexión vía cable de Ethernet al ordenador.

La tercera instalación consiste en conectar el ordenador al convertidor de corriente, y éste a su vez a la batería del automóvil. Es importante que el encendido del convertidor debe realizarse con el automóvil en funcionamiento para evitar el consumo innecesario de la batería del coche y un posible problema de inoperatividad en el arranque.

Una vez realizadas estas instalaciones y las pertinentes conexiones mecánicas, eléctricas e informáticas entre ellas, pueden encenderse las fuentes de alimentación y el dispositivo GPS, quedando el sistema listo para iniciar la toma de datos. Véase figura 3.

3 RECURSOS Y MATERIAL EMPLEADO



Figura 3: Montaje real para la toma de datos en carretera (la batería se transporta en el asiento trasero de la cabina).

4. Procedimiento

4.1. Adquisición de datos

Configuración del SQM-LE:

Para la adquisición de datos ha sido necesario configurar previamente el dispositivo SQM-LE con el ordenador de control y adquisición de datos. Es importante destacar que, por razones de diseño, el SQM-LE solamente es operativo con el ordenador para el que se ha configurado: un cambio de ordenador requiere una reconfiguración del dispositivo.

Para llevar a cabo dicha configuración se han seguido las instrucciones que a tal efecto proporciona el manual del SQM-LE. La configuración consiste básicamente en asignarle una dirección IP fija al SQM-LE, para lo cual se requieren los siguientes pasos:

- a) conexión de la unidad a un router para la asignación por parte de este de una IP;
- b) determinación de la IP asignada mediante lectura del router o empleando el software denominado Instalador de dispositivos Lantronix ("Lantronix Device Installer") y proporcionado en el CD de instalación;
- c) empleo del Asistente de configuración para el servidor de Lantronix, vía navegador;
- d) este Asistente y el proceso que indica el Manual probablemente habrán cambiado la dirección IP inicial, por lo que será necesario volver a determinarla y esta será la que se deba usar en adelante;
- e) es posible que sea necesario cambiar las Propiedades de Conexión del ordenador si éste estaba empleando la opción de "IP variable".

Una vez realizada la configuración, la comunicación entre el ordenador y el SQM-LE se realiza por medio de un cable de cruce que emplea la entrada de Ethernet al ordenador. En el programa de adquisición de datos deberá introducirse, en la casilla correspondiente, la última dirección IP obtenida para la unidad SQM-LE.

Configuración del programa de control y adquisición de datos y del dispositivo GPS:

Los requisitos prácticos de este T.A.D. exigen una alta frecuencia de medida para así optimizar la proporción entre kilómetros muestreados y tiempo empleado.

4 PROCEDIMIENTO

En términos generales se ha empleado un periodo de muestreo de 15 segundos, si bien para medidas que pretendían evaluar fenómenos concretos y no ser empleadas en la elaboración del mapa, se han empleado periodos menores y, en otras ocasiones, medidas aisladas.

La configuración de la frecuencia de medida en el dispositivo GPS es simple y directa: las opciones en el apartado de Rutas” permiten modificar el periodo entre muestra y muestra desde las horas hasta 1 segundo.

En cambio, la configuración del programa de control del SQM-LE y de adquisición de sus datos es algo más sofisticada. El programa de control y adquisición que requiere este dispositivo es el llamado SQM-Reader. La versión gratuita es una versión primitiva y no modificable cuya máxima frecuencia de muestreo es de una medida cada 5 minutos. La versión profesional de SQM-Reader (de pago pero de economía muy asequible), ofrece muchas más prestaciones, entre ellas una frecuencia de muestreo de hasta una medida por minuto.

No obstante, ésta prestación sigue siendo insuficiente para la realización del mapa objetivo en un tiempo razonable de meses con noches despejadas. Así pues, para poder incrementar la frecuencia de muestreo hasta el punto de una medida por segundo, fue necesario modificar uno de los archivos INI que crea SQM-ReaderPro en su primer uso. Éste archivo INI suele encontrarse en la siguiente ubicación en sistemas operativos Windows (o su alternativa en español), y la carpeta “Application Data” puede encontrarse oculta y existir tanto en español como en inglés en el mismo equipo:

```
C:\Documents and Settings\\Application Data\  
Knightware\SQM Reader Pro\1.0\sqmreaderpro.ini
```

o

```
C:\Users\\AppData\Roaming\  
Knightware\SQM Reader Pro\1.0\sqmreaderpro.ini
```

La modificación en cuestión consiste en incluir la línea de código: `”ntervalIsMins=0”`.

Conviene destacar, no obstante, que el tiempo de integración que emplea el programa de adquisición de datos por defecto es de 8 segundos. Por tanto, cualquier periodo de muestreo menor que 8 segundos obligará a cambiar dicho tiempo de integración e introducirá ruido en las medidas. Por tanto, no es recomendable emplear periodos de muestreo inferiores a 10 segundos salvo que otros parámetros como velocidad del vehículo o distancia de muestreo ya se hayan modificado al máximo dentro del rango admisible.

Procedimiento de medida:

Como indicábamos en secciones anteriores, una vez realizado el montaje del instrumental y activadas las fuentes de alimentación, así como asignada la IP de

4 PROCEDIMIENTO

la unidad SQM-LE e introducida en el programa de control y adquisición (SQM-ReaderPro), el sistema está listo para su uso.

Para el conjunto de medidas destinadas a la elaboración del mapa, se ha seleccionado una frecuencia de medida de 1/(15seg) tanto en la unidad GPS como en el dispositivo SQM-LE. Para la evaluación de carreteras concretas se ha usado una frecuencia de muestreo de 1/(5seg) y para la calibración de los instrumentos y la evaluación de la evolución del brillo de fondo de cielo con la distancia a una fuente de iluminación artificial se han empleado medidas aisladas activadas puntualmente mediante el ordenador.

Estas frecuencias de medida se seleccionan directamente en la sección de "utas" del GPS (como ya se ha especificado anteriormente) y en la interfaz de SQM-ReaderPro. Así mismo, en dicha interfaz puede seleccionarse el anteriormente citado tiempo de integración y la ruta y nombre del archivo donde se desea guardar la serie de datos que vaya a realizarse. Puede encontrarse una imagen de la pestaña principal de dicha interfaz en la figura 4.

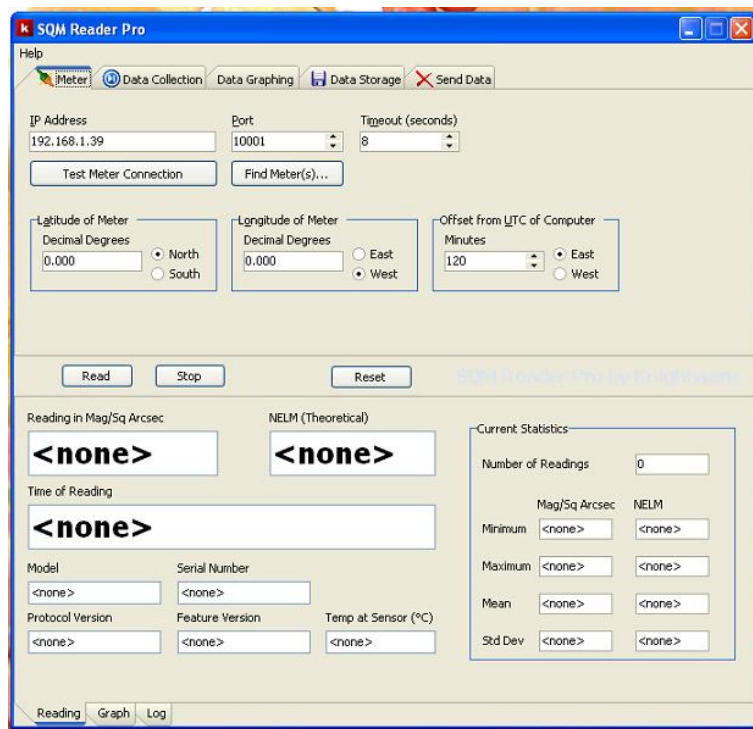


Figura 4: Interfaz del programa SQM Reader Pro.

Finalmente, para iniciar el proceso de medida se activan simultáneamente GPS y SQM-LE y, para concluirlo, se detiene la toma de medidas simultáneamente. Durante la serie de medidas se anota la hora exacta de cualquier incidencia como

4 PROCEDIMIENTO

puedan ser la presencia de estructuras físicas de carretera (por ejemplo, puentes) o de árboles sobre el SQM-LE para la eliminación posterior de las medidas afectadas. Para concluir, se descargan los datos del GPS en el ordenador y se integran en un único archivo de datos conjunto.

Puede encontrarse un resumen de la campaña completa de medición en la tabla de la figura 5.

El número total de medidas para la elaboración de los mapas asciende a 3731; además, se han tomado las medidas correspondientes a la calibración del instrumental y al brillo de fondo de cielo como función de la distancia a las fuentes de iluminación artificial.

4 PROCEDIMIENTO

Fecha	Km	Area, km ² ?	Incidencias meteorol.	Zona	Acompañante
2010/04/04	77.9	19.6		Alpedrete, Guadarrama, Puerto de los Leones, San Lorenzo del Escorial, Collado Villalba (a Villalba por carretera vieja)	Derlinda
2010/04/05	71.5	63.2	Ciurros tenues, frente de nubes tipo neblina sucia alta acercándose desde Madrid	Collado Villalba, Navacerrada, Puerto de Navacerrada, Cotos, Valdésquí, Cotos, Puerto de Navacerrada, Cercadilla, Los Molinos, Guadarrama, Collado Villalba (a Villalba por autovía)	Derlinda
2010/04/07	92.7	241		Collado Villalba, Moralzarzal, Cerceda, Manzanares el Real, Soto del Real, Guadalix de la Sierra, El Molar, San Agustín de Guadalix, Colmenar Viejo, Cercada	Derlinda
2010/04/08	101	268		Collado Villalba a Madrid por A-6, tramo de M-30 en sentido norte, tramo de M-40, carretera de Colmenar Viejo, Tres Cantos, Colmenar Viejo, Hoyo de Manzanares, Torreldones, Galapagar (a Galapagar por carretera vieja), Villalba (ídem)	Derlinda
2010/04/09	55.5	69.4		San Lorenzo del Escorial, Puerto de la Cruz Verde, Robledo de Chavela, San Martín de Valdeiglesias, Cadalso de los Vidrios, Navas del Rey, Chapinería, Brunete, Villaviciosa de Odón, Alcorcón	Derlinda
2010/04/10			Humedad en el aire (mayor que la de los días pasados)	A-4 y A-3 Pérdida de los datos del CFS.	Derlinda
2010/05/05	55.0	57.5		El Escorial, Galapagar, Monte Rozas, Villanueva del Pardillo, Villanueva de la Cañada, Valdemorillo, Galapagar, Collado Villalba	Derlinda
2010/05/15	241.5	54.2+ 442		Villaviciosa de Odón, Móstoles, Fuenlabrada, Humanes de Madrid, Parla, Pinto, Valdemoro, A-4, Aranjuez, Churruarín, Belmonte del Tajo, A-3, Perales de Tajuña, Morata de Tajuña, San Martín de la Vega, Pinto, A-4 hasta M-50, M-50 hasta Villaviciosa de Odón (tramo sup)	Derlinda
2010/05/16	22.6	1207	Luna sobre el horizonte durante la primera hora de medidas (carreteras iluminadas)	Variabilidad del brillo de fondo de cielo para varias carreteras según distancia a las farolas. M-30 desde A-6 hasta A-1 (tramo norte), A-1 desde M-30 hasta San Agustín del Guadalix, M-100 hasta Cobeneja, Algete, Fuente El Saz de Jarama, Valdehorres de Jarama, Torremoncha de Jarama, Guadalix de la Sierra, A-1 hasta puerto de Somosierra, Lozoya, Rascafría, Puerto de la Morcuera, Miraflores de la Sierra, Soto del Real, Manzanares el Real, Cercada	Derlinda
2010/05/17	22.5	630		M-40 desde El Pardo hasta A-2 (tramo norte), A-2 completa, Alcalá de Henares, Villalbilla, Torres de la Alameda, Loeches, Los Villares, Monteheumos, Perales de Tajuña, A-3 sentido Madrid, Rivas Vaciamadrid, Vella de San Antonio, Mejorada del Campo, M-203, M-30 hasta Móstoles.	Derlinda
2010/06/19				Calibración del SQM-manual y del luxómetro con respecto al SQM-LE.	Ulises

Figura 5: Resumen de la campaña completa de adquisición de datos.

4.2. Procesado y análisis de datos

Preparación de los archivos de datos:

Para el análisis y procesado de los datos ha sido necesario crear ficheros de datos que recojan las medidas proporcionadas por el SQM-LE y las proporcionadas por el dispositivo GPS. Estos ficheros deben tener el formato adecuado y estar limpios de cabeceras propias del lector de posición GPS y del SQM-ReaderPro. Además, dado el gran volumen de datos que se maneja (superior a 3000 para los mapas), se ha estimado conveniente limpiar los ficheros de datos de otras medidas como hora, altitud, magnitud visual aparente estimada, etc. para así reducir el tiempo de trabajo de los programas numéricos.

Para la limpieza de los archivos de datos y la unión de los datos de posición y los datos de magnitud de brillo de fondo de cielo se ha empleado el programa Emacs. Este programa permite por medio de varios comandos especiales añadir y eliminar columnas en un fichero txt o dat de forma automática y sin descuadrar el número de elementos de las filas; además, permite de forma similar eliminar las comas y cambiarlas por espacios, que es el formato que requiere Matlab para la correcta lectura de los datos de un fichero.

Procesado y análisis de datos:

En primer lugar conviene reseñar mediante qué proceso informático se ha generado cada formato de datos y cada tipo de resultado de los que se expondrán en la sección *Resultados*.

- El procesado de los datos (modificación del formato de las coordenadas), su análisis y la creación de gráficas (mapas, histogramas, sinusoides y curvas de calibración) se ha llevado a cabo mediante el programa de cálculo Matlab en su versión 5.3.
- La creación de imágenes que contienen la representación de los datos sobre mapas de carretera o sobre fotos de satélite nocturnas se ha realizado con el programa de tratamiento de imágenes Gimp a partir de los datos proporcionados por Matlab.
- La creación de archivos de tipo kmz para su uso en Google Earth se ha realizado por medio del programa de creación de ficheros kmz conocido como GE Graph.

En segundo lugar y en lo que se refiere al procesado de los datos, ha sido necesario transformarlos más allá de lo especificado en el apartado de "Preparación de

4 PROCEDIMIENTO

los archivos” debido a que el programa GE Graph presenta varios requisitos ineludibles en cuanto al formato de los datos. Así pues, se ha modificado el formato de las coordenadas de latitud y longitud desde grados y minutos con cifras decimales (formato del GPS) a grados con cifras decimales (formato de GE Graph). Además, ha sido necesario implementar una columna de secuenciación que numere las filas de datos pero, en contra de lo que muestra la interfaz de GE Graph (se muestra en la figura 6), esta columna no debe ser la tercera de la matriz de datos sino la primera, para que así el programa pueda leer los datos y ejecutarse correctamente. Finalmente, ha sido necesario importar los datos del archivo tipo dat generado por Matlab a un archivo tipo Calc (equivalente de Excel en Open Office) para que el copiado y pegado en GE Graph surtiera efecto de formato.

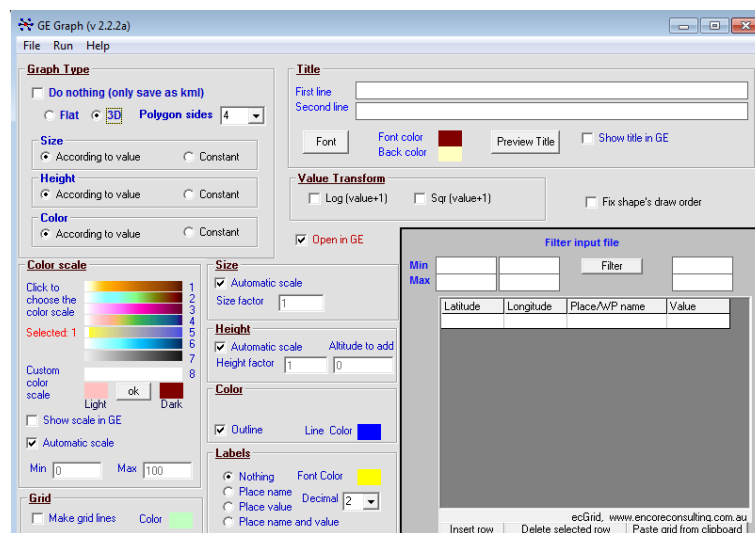


Figura 6: Interfaz del programa GE Graph.

Por otra parte, por medio de Matlab se han generado varias representaciones gráficas, a saber: la representación espacial de los datos para su implementación posterior sobre imágenes; la representación de los datos de magnitud en forma de histogramas para evaluar su distribución; la representación por separado de datos de alta frecuencia de muestreo de varias carreteras para estudiar la evolución del brillo de fondo de cielo conforme se superan las distintas luminarias; y las curvas de calibración del SQM-manual, del luxómetro y del SQM-LE. El código de los programas que generan estas gráficas, que generan los correspondientes ficheros de subgrupos de datos (con diferentes criterios de utilidad) y que analizan los datos puede encontrarse en el Apéndice de esta memoria.

NOTA: En el Apéndice A puede encontrarse un conjunto de instrucciones más detalladas, esquemáticas y prácticas para cada tarea de análisis reseñada.

5. Calibraciones

Uno de los objetivos prioritarios de este T.A.D. ha sido la calibración de los distintos instrumentos con que cuenta el Departamento para la evaluación de la calidad del cielo nocturno y el estudio de la contaminación lumínica. La importancia de esta tarea se debe a que permitirá convertir los datos y resultados de uno cualquiera de los instrumentos en datos equivalentes en las magnitudes y unidades de los otros instrumentos. Subsecuentemente, será posible comparar trabajos de diferente tipo realizados con distintos instrumentos con los trabajos realizados por el resto, optimizando de ese modo tiempo de medida y recursos tanto materiales como humanos.

Para la calibración de los tres instrumentos se ha procedido a tomar medidas con todos ellos en un mismo punto geográfico, cambiando el emplazamiento progresivamente. De este modo, se han obtenido valores para los tres dispositivos bajo diferentes condiciones de iluminación. Los resultados y su análisis se recogen en los siguientes apartados.

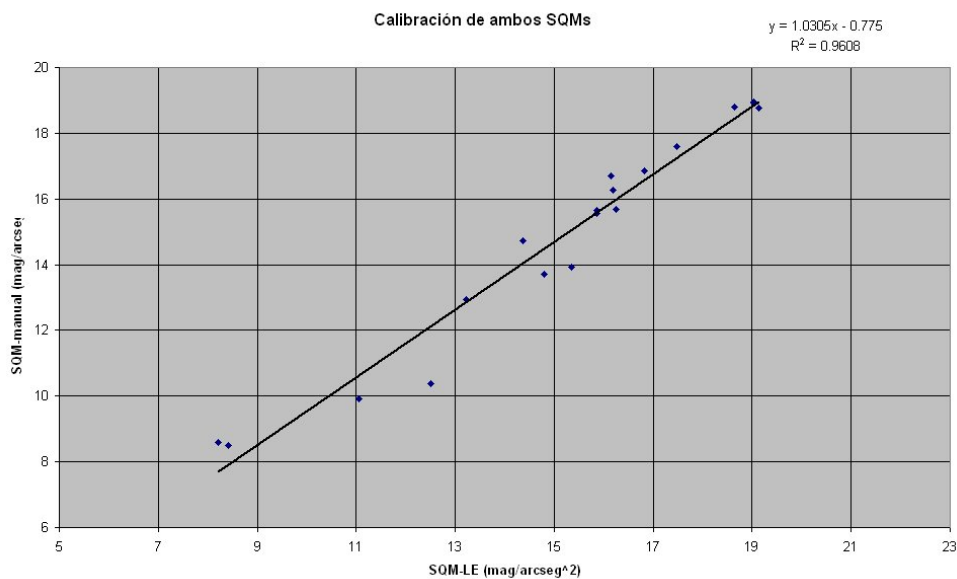


Figura 7: Representación gráfica de los datos de ambos SQMs a lo largo de distintos puntos.

5.1. SQM-LE y SQM manual

En la siguiente gráfica (figura 7) se puede encontrar la representación gráfica de la magnitud de brillo de fondo de cielo por arcosegundo cuadrado arrojada por

la unidad SQM-manual frente a la misma magnitud por arcosegundo cuadrado proporcionada por el SQM-LE.

La ecuación del ajuste lineal es: $y = 1,0305x - 0,775$, con un coeficiente de correlación lineal $r^2 = 0,9608$.

Si bien puede apreciarse una linealidad satisfactoria, conviene resaltar los tres puntos ubicados inmediatamente a la derecha del valor de 16 mag/arcseg^2 en el eje de abscisas. Dichos puntos se encuentran aglutinados en un intervalo de aproximadamente $0,3 \text{ mag/arcseg}^2$ y, sin embargo, presentan una disparidad notoria en su valor en el eje de ordenadas y contraria al sentido de la recta de ajuste.

Ante este comportamiento inesperado, se decidió hacer un estudio más detallado de la estabilidad de la respuesta del SQM-manual. Para ello se tomaron tre series de medidas en distintas condiciones de iluminación con el SQM-manual, cada serie en un mismo punto geográfico y bajo condiciones estables de iluminación. Los resultados para esas tres series de medidas se recogen en la figuras 8 a 10, así como la dependencia con la temperatura para la última serie: figura 11. Además, en el caso de la primera serie se ha incluido la respuesta del SQM-LE como referencia y comparación.

En la figura 8 puede apreciarse el offset existente entre ambos SQM. Además, puede apreciarse la gran estabilidad del SQM-LE (intervalo de $0,5 \text{ mag/arcseg}^2$ para 9 medidas) y compararlo con la del SQM-manual: las nueve medidas abarcan un intervalo de más $1,5 \text{ mag/arcseg}^2$.

En la figura 9, por contra, es inmediato notar que esta vez no hay diferencia significativa entre los valores proporcionados por el SQM-manual. En la figura 10, de nuevo se recupera el comportamiento inestable del SQM-manual, llegando a alcanzarse esta vez diferencias de hasta $3,0 \text{ mag/arcseg}^2$ en el mismo punto y bajo las mismas condiciones de iluminación.

Resulta evidente por el rango de magnitudes representado en cada caso que la inestabilidad no es función de la iluminación existente, pues la situación de estabilidad se presenta para la serie de iluminación intermedia.

Finalmente, en la figura 11 se ha representado la serie 3 en función de la temperatura que detectaba el SQM-manual en ese momento. La precisión en la temperatura ($\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) es inferior a la deseable para un estudio de este tipo. No obstante, las dos medidas para $T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ son concluyentes en cuanto a que el comportamiento inestable de la unidad SQM-manual no es, al menos en exclusiva, función de la temperatura. Por tanto cabe admitir que en esta inestabilidad hay al menos dos factores ambientales que están jugando un papel relevante o, alternativamente, que existe un defecto de fabricación en la unidad. Se recomiendan estudios más detallados a este respecto en un futuro cercano.

En suma, a la luz de estos resultados puede concluirse que existe una linealidad razonable general en la relación entre el comportamiento del SQM-LE y el del

5 CALIBRACIONES

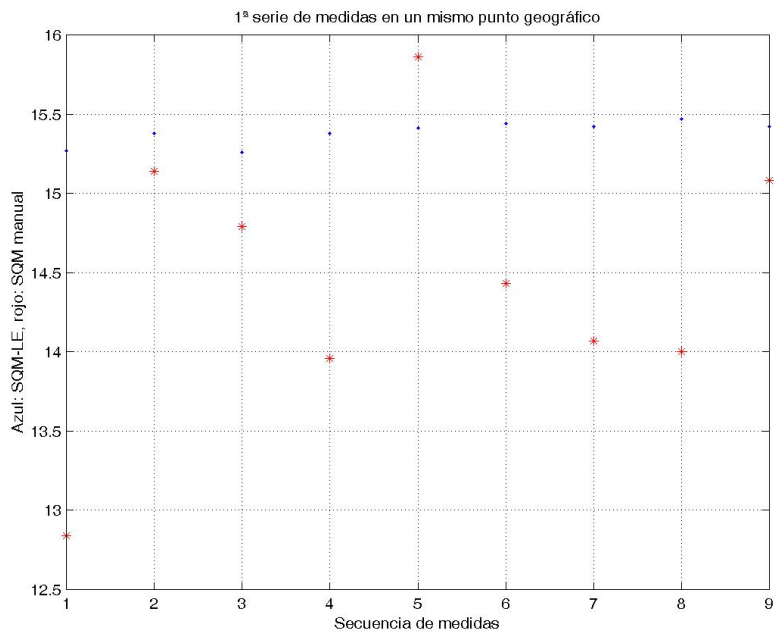


Figura 8: Primera serie de medidas en un mismo punto geográfico

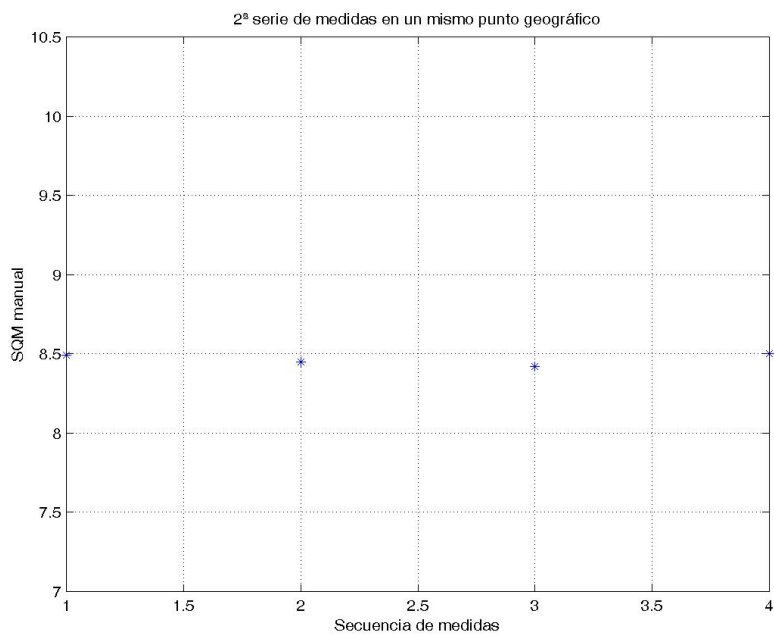


Figura 9: Segunda serie de medidas en un mismo punto geográfico

5 CALIBRACIONES

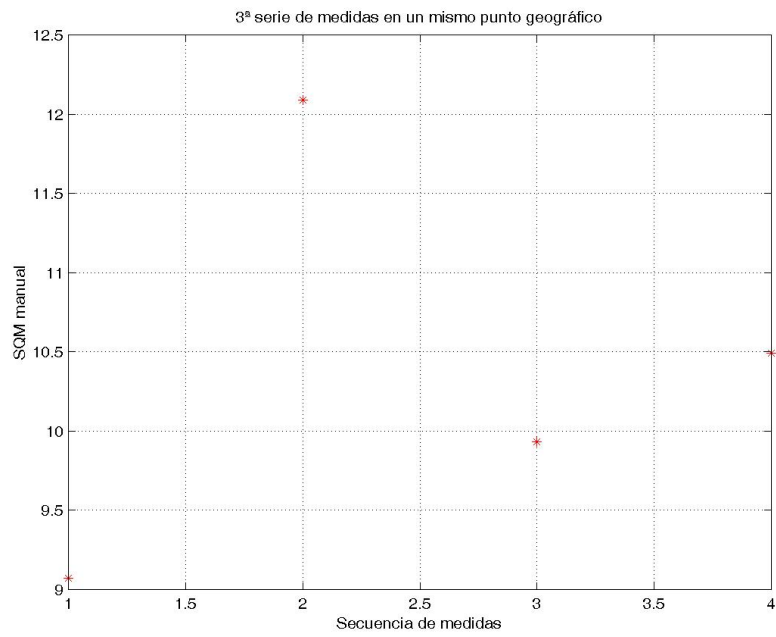


Figura 10: Tercera serie de medidas en un mismo punto geográfico

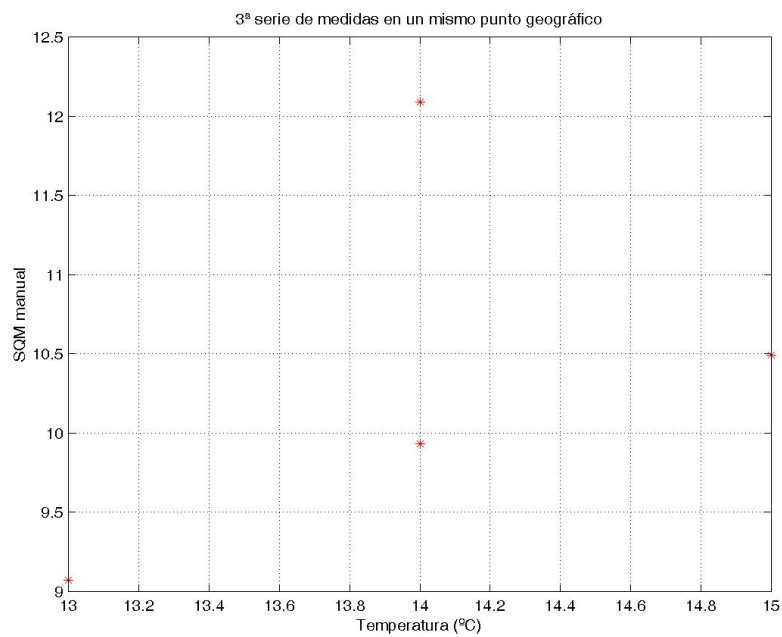


Figura 11: Tercera serie de medidas frente a la temperatura

5 CALIBRACIONES

SQM-manual. No obstante, éste último no es estable en su respuesta temporal y, por tanto, una conversión entre las medidas de uno y las de otro no es viable sin incurrir en errores significativos. El estudio de las posibles causas de esta inestabilidad en la respuesta temporal (ζ temperatura, iluminación?) no es concluyente y requiere un estudio más detallado.

5.2. Luxómetro y SQM-LE

En la siguiente gráfica (figura 12) puede encontrarse la representación gráfica de la iluminancia detectada por el luxómetro (luxes o $\text{lúmenes}/\text{m}^2$) frente a la magnitud de brillo de fondo de cielo por arcosegundo cuadrado proporcionada por el SQM-LE.

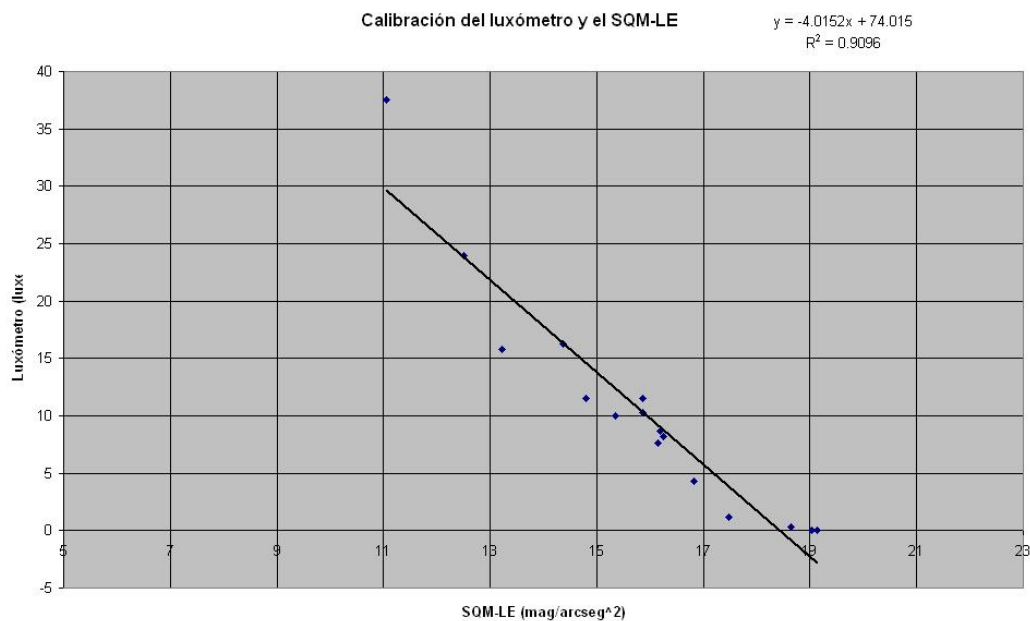


Figura 12: Calibración del luxómetro y el SQM-LE.

La ecuación del ajuste lineal es: $y = -4,0152x + 74,015$, con un coeficiente de correlación lineal $r^2 = 0,9096$. La linealidad obtenida es satisfactoria y, por tanto, puede concluirse que es viable la conversión de datos entre el SQM-LE y el luxómetro en ambos sentidos. No obstante cabe recomendar la realización de una calibración más exhaustiva antes de realizar dichas conversiones de modo definitivo.

6. Resultados

6.1. Mapas

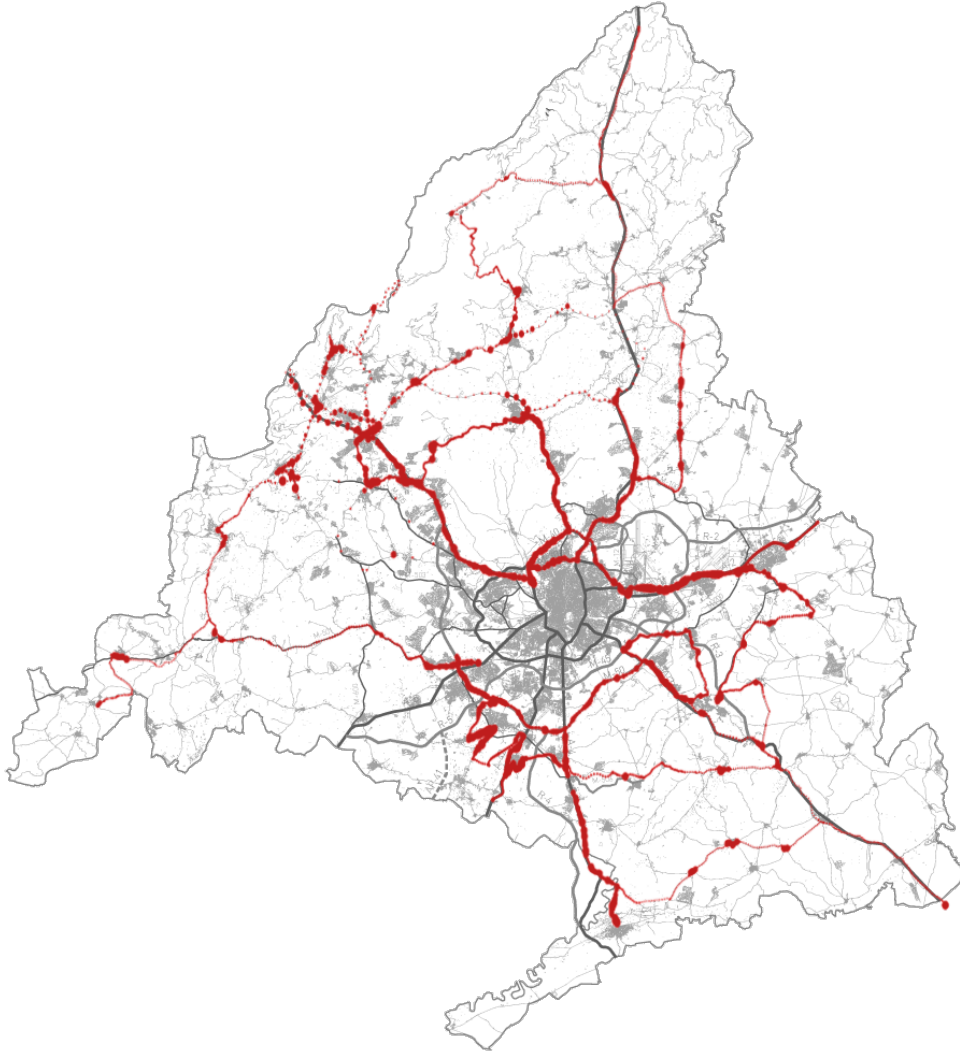


Figura 13: Mapa de carreteras. Formula utilizada para el grosor de los puntos:
$$\left(\frac{\text{mag}_{\max} - \text{mag}_i}{\text{mag}_{\max} - \text{mag}_{\min}} \right)^2$$

A partir de los datos de posición y de brillo de fondo de cielo, se han elaborado mediante Matlab y Gimp imágenes que contienen la representación de los datos y, en una capa inferior, un diagrama de la red de carreteras de la Comunidad de Madrid o una foto nocturna de satélite de la Comunidad de Madrid. Para estas

6 RESULTADOS

imágenes se ha escogido una representación de los datos que emplea puntos de distinto tamaño en función de la $\text{magnitud}/\text{arcseg}^2$. Así, las magnitudes menores (las de mayor brillo) se han representado con puntos de mayor tamaño, y las magnitudes mayores (las de menor brillo de fondo de cielo), con los tamaños más pequeños. El caso de la representación sobre el mapa de carreteras puede observarse en la figura 13.

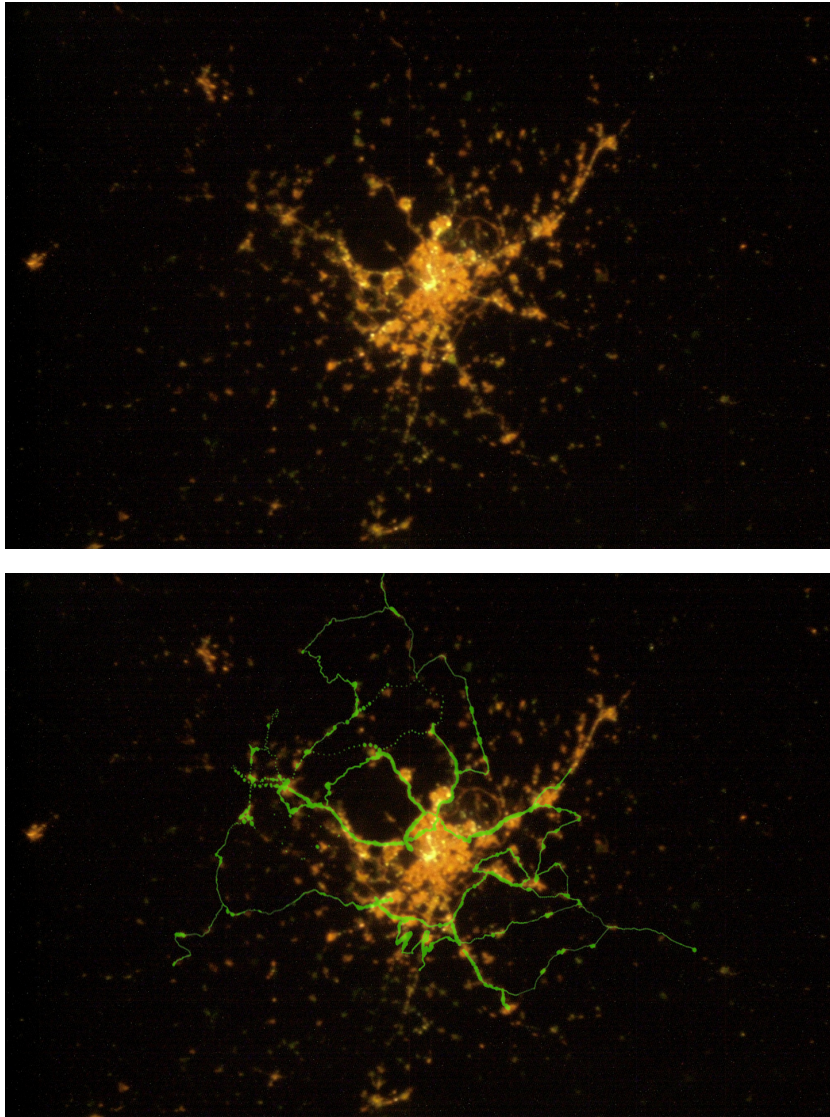


Figura 14: Superposición de las medidas con anchura proporcional sobre una foto desde órbita.

Esta representación permite la comparación cualitativa directa de los datos de brillo de fondo de cielo con las imágenes orbitales nocturnas, en tanto que las

zonas con mayor emisión de luz hacia el cielo saturan los píxeles de la cámara más que las zonas poco iluminadas, mostrándose en la imagen resultante como zonas iluminadas más gruesas. Véase la figura 14.

Del análisis de esta comparación entre grosor de las carreteras en fotografías tomadas desde órbita y grosor de las carreteras para brillo de fondo de cielo evaluado desde el suelo, se puede deducir si, en las escalas que puede detectar una cámara fotográfica, existe diferencia entre las medidas desde tierra del brillo de fondo de cielo y las medidas desde órbita de la emisión en tierra.

A la vista de ambas figuras, puede concluirse que en términos cualitativos ambos sistemas de medida reflejan de manera equivalente los dos fenómenos. Por tanto, resulta plausible esperar la viabilidad de un método cuantitativo de análisis de fotografías orbitales para la evaluación del brillo de fondo de cielo en $\text{mag}/\text{arcseg}^2$.

Finalmente, se han elaborado también mapas con las medidas de máximo valor de la magnitud (mínimo brillo de fondo de cielo) a fin de determinar las áreas con mejor calidad de cielo en la Comunidad de Madrid. Los resultados para valores de magnitud iguales o superiores a $20,0 \text{ mag}/\text{arcseg}^2$ y $21,0 \text{ mag}/\text{arcseg}^2$ se recogen en la figura 15. En dichas imágenes puede comprobarse que las zonas de menor brillo de fondo de cielo son aquellas con baja densidad de ocupación humana y máximamente distantes de la capital.

Por último, se ha generado el archivo de tipo **kmz** para Google Earth correspondiente a la totalidad de los datos, que puede encontrarse en el CD adjunto.

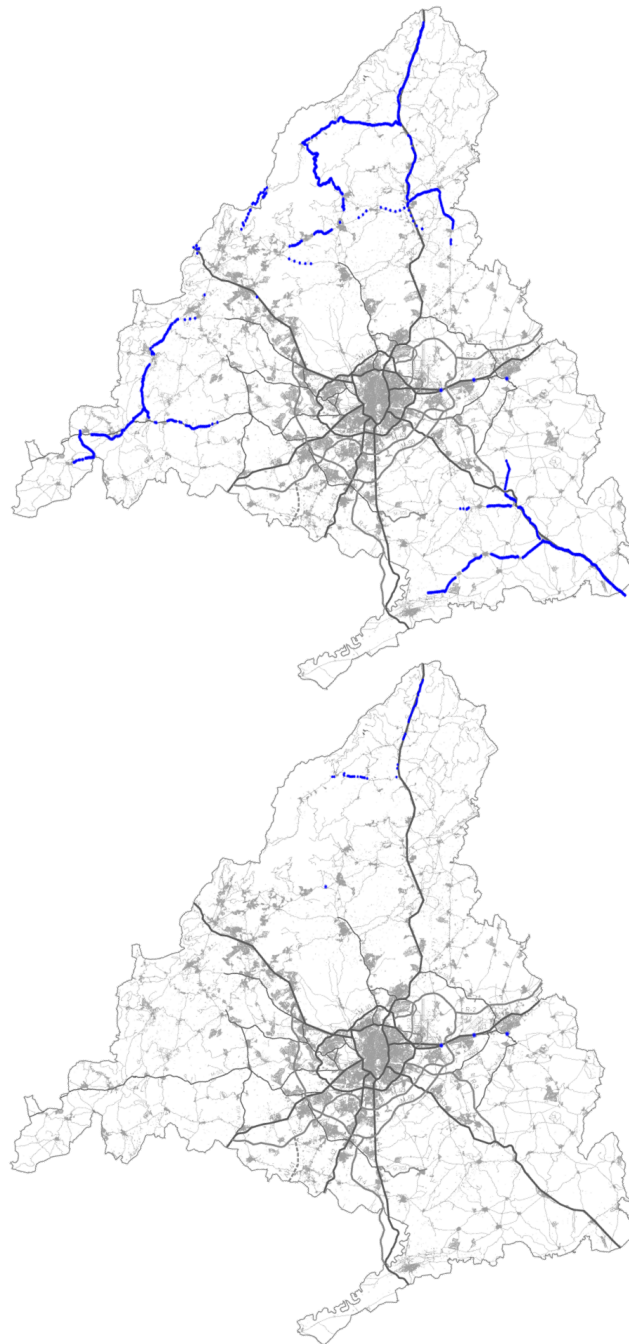


Figura 15: Magnitud iguales o superiores a $20,0 \text{ mag/arcseg}^2$ (arriba) y $21,0 \text{ mag/arcseg}^2$ (abajo).

6.2. Histogramas

A partir de los datos de brillo de fondo de cielo y por medio de Matlab, se han elaborado varios histogramas para el estudio de la distribución de frecuencias de las medidas. En la figura 16 se recogen dos de estos histogramas, correspondientes a 33 y 60 marcas de clase respectivamente.

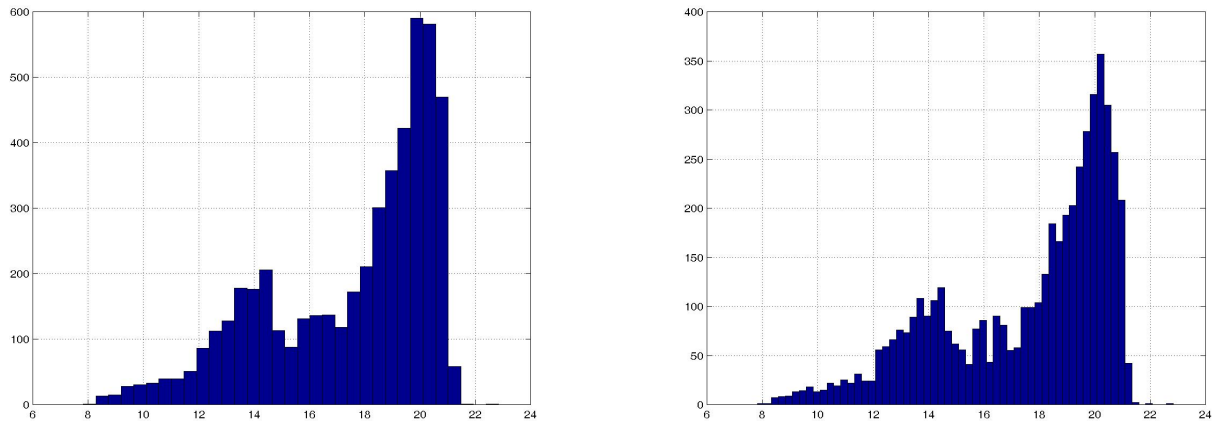


Figura 16: Histogramas para el brillo de fondo de cielo, con 33 marcas de clase (izquierda) y 60 (derecha).

En estos histogramas se detecta claramente la presencia de dos poblaciones estadísticas distintas, poblaciones que resultan consistentes estudiando el resto de histogramas desarrollados (hasta 240 marcas de clase).

Para comprobar la distribución espacial de las carreteras pertenecientes a cada una de las dos poblaciones, se han representado en dos colores sobre el mapa de la figura 17. En rojo se ha representado la población de datos con mayor brillo de fondo de cielo, y en azul, la población con menor brillo de fondo de cielo. Los valores límite escogidos para la representación gráfica espacial de cada población son, respectivamente: de 11.00 a 15.70 y de 18.00 a 22.85 $\text{magnitud}/\text{arcseg}^2$.

Queda patente por medio de esta imagen que las carreteras más próximas a la capital, que son precisamente las que disponen de iluminación artificial, son las que componen la población más brillante, junto con los núcleos urbanos distantes inadecuadamente iluminados y junto con las carreteras de acceso a los mismos. Por contra los tramos menos contaminados luminosamente son aquellos en que las carreteras no disponen de iluminación artificial y que se encuentran fuera de la influencia inmediata de los núcleos urbanos.

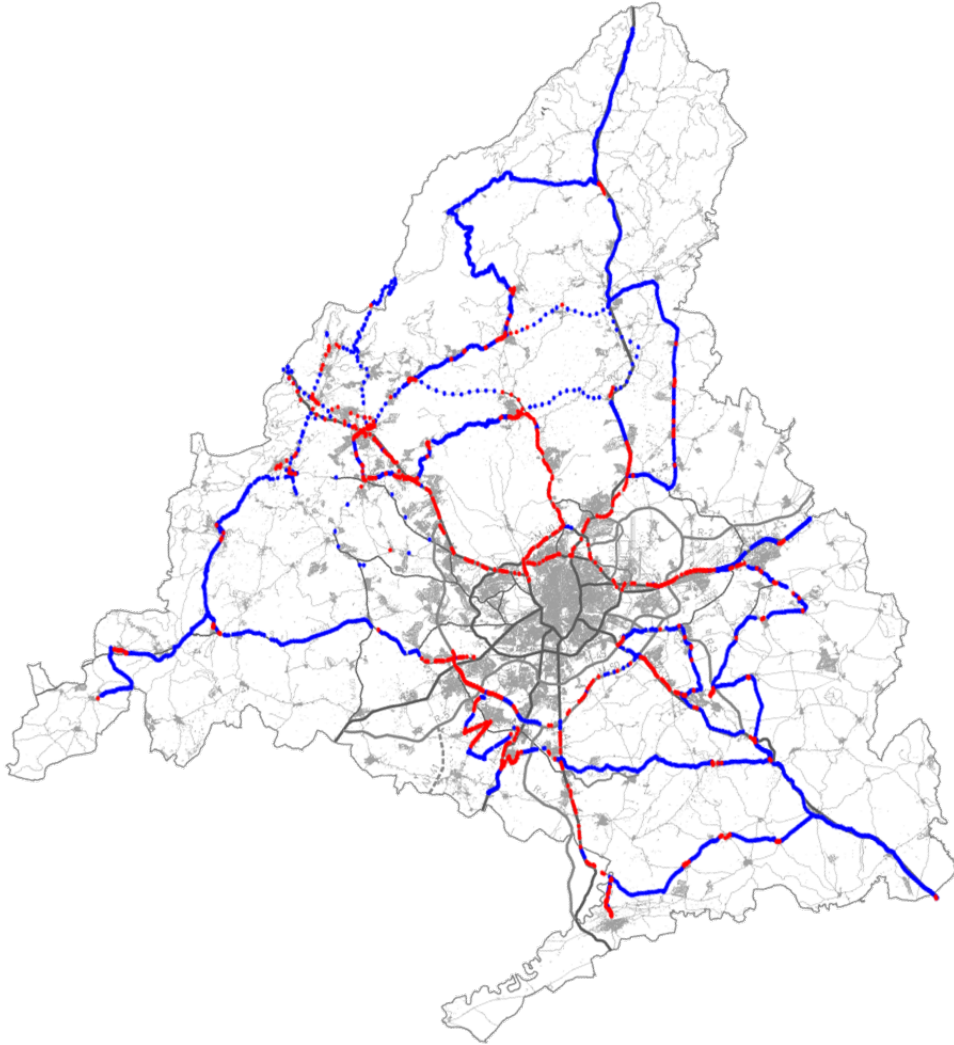


Figura 17: Representación espacial de las dos poblaciones detectadas en los histogramas.

6.3. Dependencia del brillo de fondo de cielo con la distancia a las fuentes de iluminación

Finalmente, se ha querido estudiar la dependencia del brillo de fondo de cielo con la distancia a las fuentes de iluminación y, paralelamente, cómo las luminarias en una carretera modifican el brillo de fondo de cielo de la zona con respecto a la situación en ausencia de esta iluminación directa.

Para ello, por un lado se ha pretendido estudiar la evolución de la $\text{magnitud}/\text{arcseg}^2$ a lo largo de varias carreteras con iluminación artificial equiespaciada. Los resultados para cierto tramo de la A-6 y para dos muestreos de la carretera Alpedrete-Collado Villalba se muestran en la figura 18.

En estas gráficas puede apreciarse un comportamiento oscilatorio de las medidas; sin embargo, de ellas se concluye que la relación entre velocidad del automóvil y frecuencia de muestreo empleada para esta tarea, $1/5_{\text{seg}}$, es insuficiente para la precisión que se pretende conseguir. Por tanto, si se desean obtener datos relevantes en este sentido será necesaria una circulación mucho más lenta del vehículo (inferior a 40 km/h para luminarias equiespaciadas en intervalos de 20 m e inferior a 60 km/h para luminarias equiespaciadas en intervalos de 50 m) y una frecuencia de muestreo mayor, o bien una toma de medidas pedestre con las adecuadas precauciones de seguridad vial.

Cabe destacar que para la carretera de Colmenar Viejo (Madrid-Tres Cantos-Colmenar Viejo) se ha detectado un valor típico para las medidas mínimas de $(15,5 \pm 0,2) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$, mientras que para varios casos en que dos lámparas consecutivas se encontraban inoperativas, el valor medio fue de $(17,5 \pm 0,2) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$. Así mismo para la M-40, tramo norte, el valor medio de las medidas mínimas es de $(14,5 \pm 0,2) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$, mientras que para dos luminarias consecutivas apagadas se alcanzó un valor de $(17,6 \pm 0,2) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$. De esto puede deducirse que, si bien como veremos más adelante es posible hallar una distancia a las luminarias para las que la medida de brillo de fondo de cielo es representativa de la medida en ausencia de luminarias, esa distancia crítica es mayor que la mitad de la distancia típica entre farolas de una vía rápida altamente iluminada.

Por otro lado, y en una línea de aproximación al tema más directa, se ha evaluado la dependencia del brillo de fondo de cielo con la distancia a la fuente de iluminación artificial para el caso de una luminaria relativamente aislada, con lámpara de mercurio, emisión horizontal y estructura de aproximadamente 3 metros de altura. El resultado para este conjunto de datos ha resultado extraordinariamente ajustado a las previsiones y se muestra en la figura 19.

Conviene señalar que el valor de la medida obtenido con la lámpara apagada es de $(18,85 \pm 0,01) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$ y el valor con la lámpara encendida tanto a 25 metros como a 40 metros es de $(18,88 \pm 0,01) \text{ mag}/\text{arcseg}^2$.

A esto respecto, pues, los resultados son completamente precisos y prueban

6 RESULTADOS

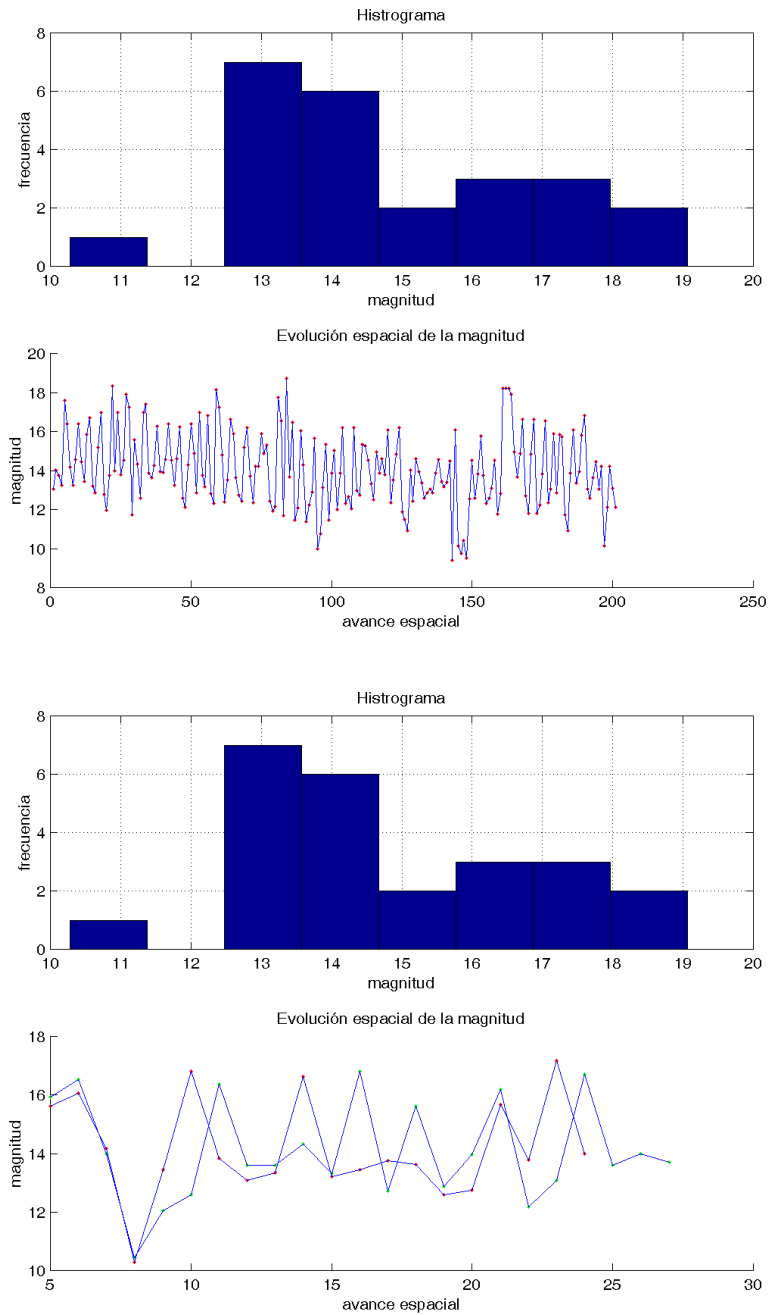


Figura 18: Histogramas y evolución del brillo de fondo de cielo a lo largo de 2 carreteras, A-6 (tramo) (superior) y carretera Alpedrete-Villalba (inferior).

6 RESULTADOS

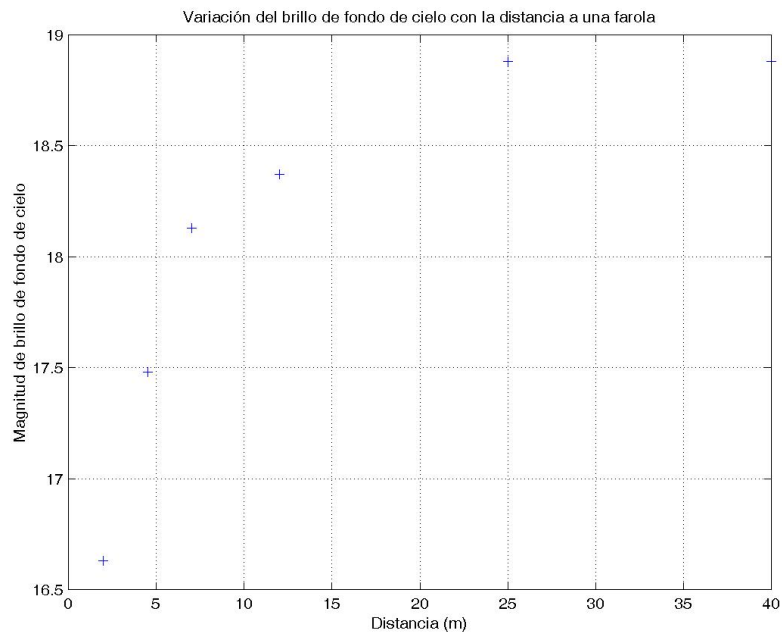


Figura 19: Relación entre brillo de fondo de cielo y distancia a una fuente de iluminación artificial (lámpara de mercurio, emisión horizontal, 3 m de altura).

que, en un margen razonable de distancias a las fuentes de iluminación directas, es posible obtener un valor del brillo de fondo de cielo con presencia de iluminación artificial directa que sea representativo del valor del brillo de fondo de cielo en ausencia de dicha clase de iluminación.

7. Líneas de trabajo abiertas

A raíz de todos los resultados obtenidos y de las valoraciones realizadas de los mismos, surgen de manera inmediata y natural las siguientes vías de trabajo y de análisis:

- I) Realización de medidas por el procedimiento establecido para aportar una cobertura más detallada al mapa de brillo de fondo de cielo resultado de este trabajo.
- II) Estudio detallado de la inestabilidad de la unidad SQM-manual, ya sea como dependencia de la iluminación y de la temperatura así como de cualquier otra variable o como error de fabricación; comparación de esta inestabilidad con la reportada en foros astronómicos por propietarios de otras unidades SQM de tipo manual.
- III) Conversión de los datos del SQM-LE (datos de brillo de fondo de cielo) en datos de iluminancia (datos proporcionados por el luxómetro) y viceversa, para completitud de los resultados obtenidos hasta ahora con ambos instrumentos.
- IV) Realización de una campaña de medidas con mayor frecuencia de muestreo de la empleada hasta ahora en tramos de carreteras con iluminación artificial, a fin de determinar si la medida mínima de brillo de fondo de cielo entre farolas es representativa del brillo de fondo de cielo en esa carretera en ausencia de iluminación. Estudiar los requisitos de distancia transversal a las fuentes de iluminación directa según naturaleza de la lámpara, altura de la luminaria y frecuencia longitudinal de las mismas.

8. Contribuciones y agradecimientos

En este Trabajo han contribuido de forma relevante las siguientes personas, a las que desde estas páginas se les quiere dar crédito y agradecimiento:

- Don Alejandro Sánchez de Miguel (por su ayuda con la calibración del SQMLE y por la cesión del mosaico de imágenes tomadas desde la ISS por el astronauta Soichi Noguchi).
- Doña Derlinda Díez Moreno (por su labor como asistente y técnico de soporte en la toma de datos).
- Don Jesús Torrado Cacho (por la modificación de determinados archivos en Linux y por su ayuda con la implementación de datos e imágenes en Gimp).
- Don Phyllis Lang de Knightware, LLC (por sus indicaciones para modificar el programa de control y adquisición de datos).
- Don David Paredes Barato (por sus conocimientos y consejos sobre GNUplot).
- Don Ulises Pila Díez (por su labor como asistente en las calibraciones del instrumental).

Y en último lugar si bien con el papel más relevante:

- Don Jaime Zamorano Calvo, por su paciencia, su guía y su buen saber hacer.

A. Instrucciones detalladas para el procesado y análisis de datos

A.1. Preparación de los archivos de datos

Tomar el archivo de datos diario del GPS y, mediante Emacs, quedarse solamente con las columnas de latitud y longitud, eliminando también las indicaciones de N ó S y de E u W pero introduciendo los signos correspondientes a estas especificaciones. Guardar el resultado. Copiarlo y pegarlo al final del archivo general de datos del GPS (ojo, previamente puede ser necesario cotejar el número de datos con el número de datos del SQM pues a veces el GPS toma varias medidas de inicio o uno lo apaga más tarde que el SQM). Este archivo tendrá cuatro columnas porque el GPS proporciona latitud y longitud en grados y en minutos más la columna correspondiente al signo de la longitud (se ha obviado el signo de la latitud por encontrarnos en el hemisferio norte).

Tomar el archivo de datos diario del SQM-LE y, mediante Emacs, quedarse solamente con la columna de magnitud. Copiarlo y pegarlo al final del archivo general de datos del SQM.

Mediante Emacs, generar un archivo conjunto de los datos del GPS y del SQM (bien juntando los dos archivos generales o bien añadiendo al archivo conjunto de días pasados los datos diarios de ambos instrumentos). Este archivo contendrá 5 columnas: dos para latitud, dos para longitud y la magnitud de brillo de fondo de cielo.

A.2. Procesado y análisis de datos

Ejecutar el programa hist_SQM de Matlab (u otro análogo) sobre el archivo general de datos del SQM. Se obtendrá un histograma de la totalidad de los datos con diferente grado de resolución (distinto número de marcas de clase). El número de marcas de clase puede seleccionarse modificando el código.

Ejecutar el programa transf_coord de Matlab (u otro análogo) sobre el archivo general de datos conjuntos del GPS y del SQM. El archivo de salida que se obtendrá constará de 4 columnas en lugar de las 5 previas, pues habrá convertido latitud y longitud a grados, sin pérdida de precisión, y habrá añadido una columna de numeración de las filas. Es relevante que el orden de las columnas sea el siguiente: numeración, latitud, longitud y magnitud; de otro modo, GE Graph tendrá problemas para generar el fichero. Este programa proporciona un archivo tipo dat con los datos de salida y un archivo tipo txt como resumen de los datos.

A INSTRUCCIONES DETALLADAS PARA EL PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

A.3. Elaboración de los ficheros para el Google Earth

Importar el archivo tipo dat proporcionado por el programa transf_coord de Matlab al programa Calc (versión de Open Office para el Excel de Microsoft). Se recomienda usar Calc en lugar de Excel porque genera menos problemas a la hora de establecer sin errores las columnas de los datos.

Una vez importados los datos como tabla en Calc, copiarlos y pegarlos en la tabla de la interfaz de GE Graph. Seleccionar las opciones que se deseen para la presentación del fichero (se recomienda no emplear la escala automática). Para los valores mínimo y máximo de la magnitud que se van a representar puede consultarse el archivo resumen que ha generado Matlab junto con el archivo de datos.

Abrir este nuevo archivo conjunto de GPS y de SQM con GE Graph para generar el correspondiente archivo de Google Earth (extensión `kh1`, creo).

A.4. Elaboración de los mapas

Crear mediante Matlab (u otro programa análogo) una imagen con la representación espacial de los datos. Se recomienda representarlos con distinto grosor de acuerdo con la expresión $\left(\frac{\text{mag}_{\max}-\text{mag}_i}{\text{mag}_{\max}-\text{mag}_{\min}}\right)^2$. Implementación mediante el programa de tratamiento de imágenes Gimp de esta imagen como capa superpuesta a la imagen de fondo deseada: ya sea un mapa de carreteras o una fotografía nocturna de satélite de la Comunidad de Madrid.

Para la elaboración del mapa que representa las dos poblaciones que se detectan en los histogramas, bastan con ejecutar el programa de Matlab denominado `map_poblaciones`; en el código de este programa se habrán modificado previamente los valores extremos que acotan cada una de las dos poblaciones, los cuales se habrán determinado visualmente sobre el histograma o por medio de técnicas estadísticas. El programa proporcionará el archivo de datos para su representación e implementación como imagen o para su incorporación a GE Graph de acuerdo con los dos procedimientos anteriormente descritos.

Si se desea elaborar un mapa que recoja las medidas de magnitud máxima (mínimo brillo de fondo de cielo), ya sea como imagen o como fichero `kmz`, puede ejecutarse el programa de Matlab `map_mag_sup`, que devolverá las medidas de magnitud superior o igual a un valor dado (para determinar dicho valor, debe modificarse en el código fuente).

A.5. Evaluación de los datos de carreteras independientes

Introducir el archivo de datos con el formato preparado (GPS + SQM en 5 columnas) en el programa de Matlab denominado `sinusoide`. El programa se en-

A INSTRUCCIONES DETALLADAS PARA EL PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

cargará de proporcionar la gráfica deseada; el usuario sólo deberá guardarla como archivo tipo fig o jpeg.

B. Código de los programas implementados

Lista de rutinas cuyo código se incluye a continuación:

- transf.coord
- map.mag_sup
- hist_SQM
- map.poblaciones
- calibracion
- senoide