



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE ASTROFÍSICA Y CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes: Metodología y resultados

Dirigida por:

D. Jaime Zamorano Calvo D. Jesús Gallego Maestro
Profesor Titular *Profesor Titular*
UCM UCM

Memoria presentada por
D. Alejandro Sánchez de Miguel
para aspirar al grado de
Doctor en Ciencias Físicas
Madrid, Febrero 2015

© 2015 Alejandro Sánchez de Miguel

Reconocimiento - NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.

Primera edición: junio 2015 (40 ejemplares)

Segunda edición: julio 2015

Portada: Image courtesy of the Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center
ISBN-13-978-84-606-8810-5

Familia Sánchez de Miguel,
Madrid, España
alejasan dot press (at) ucm dot es

Dedicado a mis maestros.

Notas de la edición: La primera edición es la tesis tal y como fue presentada. Esta segunda edición consta, además de algunas correcciones, de un anexo fruto de las discusiones con el tribunal.

Índice general

Introduction	3
1. Introducción	7
2. Imagen nocturna con satélites de observación de la Tierra	13
2.1. Introducción	13
2.2. La contaminación lumínica desde el satélite DMSP/OLS	17
2.2.1. Variación del gasto en alumbrado público en España	19
2.3. Medidas VIIRS/DNB del satélite SUOMI/NPP	36
2.3.1. Fotometría e intercalibración VIIRS/DNB y otros sensores	39
2.3.2. Aplicaciones	44
2.4. Resultados	51
3. Medida de contaminación lumínica usando imágenes ISS	53
3.1. Introducción	53
3.2. Las imágenes nocturnas desde la ISS	54
3.3. Decodificación de las imágenes	57
3.3.1. Características de los datos	58
3.3.2. Caracterización espectral de la cámara	59
3.4. Calibración fotométrica	61
3.4.1. Introducción	61
3.4.2. Corrección de iluminación	63
3.4.3. Calibración Astrométrica	64
3.4.4. Medidas fotométricas	65
3.4.5. Fotometría sintética	65
3.4.6. Transmisión de las ventanas de observación	68
3.4.7. Calibración fotométrica	72
3.4.8. Efecto de la extinción	74
3.4.9. Verificación de la calidad de la Calibración	79

3.5. Corrección de linealidad: Efecto del Anti-blooming	83
3.6. Clasificación de fuentes de contaminación lumínica mediante diagramas de color	84
3.6.1. Aplicación a la isla de la Palma	86
3.6.2. Aplicación a la corona metropolitana de Madrid	89
3.6.3. Aplicación a 6 capitales europeas	97
3.7. Usos de las imágenes nocturnas de la ISS	102
3.8. Resultados	104
4. Catálogo de imágenes ISS multiespectrales	113
4.1. Introducción	113
4.2. Catálogo de la selección manual y semiautomática	114
4.3. Programa de ciencia ciudadana: Cities at Night	116
4.3.1. Plataforma Crowdcrafting.org	117
4.3.2. Aplicaciones web	118
4.3.3. Divulgación de los resultados y captación de voluntarios	123
4.4. Resultados	124
5. Técnicas aéreas de teledetección de fuentes de contaminación lumínica	127
5.1. Introducción	127
5.2. Imágenes aéreas con cámara hiperespectral	128
5.2.1. Vuelos sobre Madrid	128
5.2.2. Calibración de ISS/D3S mediante radiancias INTA-AHS DESIREX 2008	129
5.3. Imágenes aéreas con cámara multiespectral	138
5.3.1. Vuelo sobre la Ciudad de Berlín	139
5.3.2. Vuelos sobre la Ciudad de Madrid	142
5.4. Comparativa de técnicas de teledetección de fuentes de contaminación lumínica	145
5.5. Resultados	150
6. Brillo de cielo en la Comunidad de Madrid	153
6.1. Introducción	153
6.1.1. Desarrollo histórico del estudio del brillo de cielo	153
6.1.2. Importancia astronómica de la contaminación lumínica en Madrid	155
6.1.3. Madrid y el Observatorio UCM como punto de referencia	157
6.2. Instrumentos de medida de brillo de cielo	159
6.2.1. Fotómetros SQM	159
6.2.2. Monitor astronómico AstMon	161
6.2.3. Espectrógrafo SAND	162

6.3.	Brillo de cielo en la ciudad de Madrid	164
6.3.1.	Variación temporal	164
6.3.2.	Variación en color	169
6.3.3.	Variación horaria del espectro del cielo	170
6.4.	Variación temporal del brillo de cielo en la red SQM-UCM	173
6.5.	Variación espacial de brillo de cielo	177
6.5.1.	Introducción	177
6.5.2.	Adquisición automática de datos	178
6.5.3.	Viabilidad e implementación	180
6.5.4.	Campañas	188
6.5.5.	Repetibilidad	189
6.5.6.	Mapa de brillo de cielo	191
6.6.	Resultados	191
7.	Relación entre el brillo de cielo y la radiancia medida en las imágenes de satélite	195
7.1.	Relación entre la emisión difusa en imágenes de DMSP, VIIRS y ISS con el brillo de cielo en la Comunidad de Madrid	195
7.2.	Ánálisis espectro-espacio-temporal de la emisión nocturna en rango visible de Madrid	198
7.3.	Resultados	201
8.	Conclusiones y trabajo futuro	207
	Agradecimientos	213

Introduction

The light pollution is considered as the introduction of artificial light on the environment. This light produces undesired effects (Alfaro Navarro et al. 2009). The public image of the light pollution has changed, from an “astronomers problem” to a general problem due to the clear evidence of its negative effect on the economy (Gallaway et al. 2010; Kyba et al. 2014b), cultural heritage (Marin 2009; Valls-Gabaud 2009; Ruggles & Cotte 2011), the nocturnal ecosystem (Pawson & Bader 2014) and biological rhythms of human (Bonmati-Carrion et al. 2014).

The astronomers were the pioneers on the characterization of this phenomenon, with non-astronomical origin, but that its negative effects on the observation have produced the massive escape of astronomers to new observatories far from the light pollution of the cities. The classical observatories built inside the cities, are now just museums. Even some of the mountain observatories have been affected by the growth of the light pollution. The new metropolis are behind of what have made that the observatories can't be used for the purpose that they were built.

Some examples of this are the Mount Wilson observatory in California (Teare 2000), or other seriously affected as the Palomar Observatory (Aubé et al. 2005)¹.

One of the quality criteria of the professional observatories is the sky brightness. That's why this parameter is measured carefully during the site testing. On the actual observatories it is also measured to detect the degradation of the sky quality because of the light pollution.

The authorities create protection laws to avoid human activities ruining the sky (for example, Xinglong Station (Liu et al. 2003) or Calar Alto (Sánchez et al. 2007)). This observatories have a long time line of measurements that can be compared with the human activity nearby. But, as it will be shown on this work, those places are not the best ones to study the light pollution, because they were built to avoid it.

The light pollution had born with the civilization: since the invention of the fire by the humans, the control of the nature by artificial ways has been a constant on the human history. On any kind of pollution the doses is a key factor. In this case, it is not until the massive growth of the public illumination with the industrialization when it became a problem for the

¹<http://lcogt.net/user/apickles/dev/Palomar/SkyBright/Aube.html>

astronomy.

However, the real problem came with the demographic explosion and the popularization of the electric energy. It takes the light to most of the cities. Actually, the population has doubled since the 50's of the XX century, and this growth has its consequences (DeFries et al. 2010). It has made that the total amount of light injected on the atmosphere has been increased dramatically.

The energy consumption also has been incremented and now we use more than the double of energy than on the 70's (ENCY 2014). At the same time, it has been produced several jumps on the lighting technology on the last few years, that produce that the possibilities of emission of light have been increased on several orders of magnitude. We have come from the "domesticated stars" gas lights of Robert Louis Stevenson (Stevenson 1881) to the new LED lamps (Schubert & Kim 2005) in one century and a half of technological evolution.

Although, on illumination occurs a paradox. What we found bright yesterday, today looks dark. Berlin, Paris or London were the bright cities of lights of the past (Schlör 1998). But now those cities are faint examples in comparison with others like Madrid (Kyba et al. 2014a).

This arms race have been produced by our ancestral fear of darkness. This fear is very inside of the human psychology (Schaller et al. 2003). Although, the objective data show that the effectiveness of the illumination on the crime reduction is at least questionable (Marchant 2010).

Even the true efficiency of the illumination on the road safety it's questioned now (Wanvik 2009). Now the illumination studies indicate that the street lighting should be focused on the pedestrians and cycling safety and not on cars, because they are much more vulnerable.

Now, it is found that the most of the illumination that produces the light pollution is due to a deficient design or a power excess.

Some of the consequences of those massive illuminations are effects that are not considered as important as the impossibility of observing the stars or the vanishing of the milky way of the lives of most of the urban population (Cinzano et al. 2001a; Smith 2008), or it's important has not well known until recent times as the destruction of the habitat of many species (Hölker et al. 2010) or it's effects on the human health (Stevens et al. 2013).

Recently, the greater efforts to reduce light pollution came from the side of the austerity, trying to solve the enormous waste of energy made on the street lighting. In Europe it cost more than 6.300 millions of euros each year.

The politicians are starting to pay attention on the control of the waste on street lighting. Due to this, new regulations had appeared in Europe on the last twenty years. The first ones just with the goal of protecting the sky of the Canary islands (BOE (Ley 31/1988) and the 13th of march of 1992 the regulations that controls that law (R.D. 243/1992) or the new Andalusia law

Decreto 357/2010, of 3rd of August.

Although, until now there are only two laws in Spain with global frame: the R.D. 1890/2008, 14th of November, it were appear the new regulations of energy efficiency on outdoor lighting and Ley 34/2007, 15th of November, about the air qualiy and the protection of the atmosphere, but the second one doesn't have any specific regulation, giving just general guidelines. For other legislations out of Spain read Meier et al. (2014), but as the main of the case of studies of this thesis the principal resorsce will be the spanish ones.

The International Astronomical Union, commission 50 section B is in charge of the protection of the existing observatories and potential ones. Although, without measurements they are impossible to be protected. Even, the sky should not be protected just for the astronomers, also for the rest of the humans and living things on earth. So it needs to be protected for all the humanity as appears on the Starlight declaration of La Palma.

The main goal of this thesis is to determine how it is possible to use the techniques of teledetection to control the growth of the light pollution and to determine the sky brightness. For this reason, this thesis consists of two parts. The first part, chapters 2 to 5, where the tools of remote sensing are discussed for measuring the emission of light pollution sources. Second part, Chapter 6 where astronomical ground base techniques are discussed, necessary to measure sky brightness variation and relate with the techniques already discussed. This relationship is detailed in Chapter 7.

In detail other objectives are:

- Create the bases to change the way of taking measurements on light pollution from pin point measurements on the space, time and band to a surface of measurements, on a range of time and multiple spectral channels. The goal is to know which is the trend of the sky brightness for an effective protection of the sky.
- To achieve this goal, existing data of the DMSP/OLS satellites and SNPP/VIIRS have been used. But this thesis will use by first time the multispectral data of the ISS.
- Also, aerial techniques (multispectral and hyperspectral) have been explored other with the goal of determine the capacities on the determination of the illumination variables like the spectral type of the illumination or the illumination levels.
- It have been developed experiments where the variation of the light pollution its clear on different ways (spectral, temporal and spatial) and different scales.
- Finally, the relation between the diffuse light detected by the ISS and the VIIRS with sky brightness has been analyzed. It will be shown how they are directly related, so the

satellite data can complement the models on the bright parts (radiance greater than 0.2 $nW/cm^2/sr$).

On that way we describe new techniques to estimate the amount of light pollution and how it evolves with the time.

On the Chapter 2 describes how it's possible to determine the evolution of the energy consumption on a global, regional and local scale using the data from the DMSP and SNPP. This consumption is directly related with the light that is injected on the atmosphere.

On the Chapter 3 it is shown how can be used the ISS images taken by the astronauts on the International Space Station to study the light pollution with the possibility of detection of different lighting technologies and a detailed evolution of the emission of the cities.

On the Chapter 4 it is described the methodology used to create the major and only catalog of nocturnal multispectral images available openly. This catalog is need it to apply the previous techniques to the whole world.

The Chapter 5 is dedicated to other aerial techniques (multispectral and hyperspectral) for the acquisition of information with higher resolution or comparable of one meter. It's basic to be able to have reliable data of illumination levels, avoid the lamps mixture, land use analysis and other topics, like the human perception of the urbanscape. This topics will not be trated on this thesis but on this chapter we will present the experiments that have been done. Even if the full scientific analysis it is not finished, the actual results permit us know which are the limitations of each method.

With the goal of finding the relationship between the effect on the sky brightness of the sources of light pollution, on the chapter 6 have been made an spectro-spatial-temporal analysis of the Madrid sky brightness.

Finally, on the chapter 7 is established a relationship between the sky brightness and it's counterpart on the satellites images (the diffuse light).

The study of the variations allow us try to estimate the causes that are behind the light pollution. So, after the development of the method, it have to be applied to verify if the experiment is sensitive to the variations that can explain the existence of the light pollution.

Capítulo 1

Introducción

Se entiende por contaminación lumínica la introducción de luz de manera artificial que produce efectos adversos (Alfaro Navarro et al. 2009). La contaminación lumínica ha pasado en los últimos años de ser “un problema de astrónomos” a ser objeto de estudio para diversas disciplinas debido a la evidencia cada vez más clara de que la contaminación lumínica afecta negativamente a la economía (Gallaway et al. 2010; Kyba et al. 2014b), al patrimonio cultural (Marin 2009; Valls-Gabaud 2009; Ruggles & Cotte 2011), al ecosistema nocturno (Pawson & Bader 2014) y a los ritmos biológicos de los humanos (Bonmati-Carrion et al. 2014).

Los astrónomos fueron los pioneros en la caracterización de este fenómeno, no astronómico en su origen, pero cuyo efecto muy negativo en la observación impulsó la construcción de observatorios astronómicos en lugares apartados para evitar en lo posible la contaminación. Actualmente los observatorios astronómicos clásicos, construidos en el interior de las ciudades, son museos e incluso otros situados en zonas de montaña se han visto tan afectados por el aumento de la contaminación lumínica resultado del crecimiento desmesurado de núcleos urbanos próximos que no pueden cumplir las funciones para las que fueron construidos. Sirva como ejemplo el observatorio de Monte Wilson en California (Teare 2000), u otros seriamente contaminados como Monte Palomar (Aubé et al. 2005)¹. Uno de los criterios de calidad de los observatorios astronómicos profesionales es el brillo de cielo nocturno y por eso este parámetro se mide cuidadosamente antes de seleccionar un lugar idóneo para instalar uno nuevo dentro de las campañas de caracterización del sitio. En los observatorios que se encuentran en funcionamiento también se monitorea el brillo de cielo para detectar si la evolución de la contaminación lumínica degrada la calidad astronómica del sitio. Las autoridades dictan leyes de protección para evitar que el desarrollo de actividades cercanas a los observatorios arruinen su cielo (véanse, por ejemplo, los casos de Xinglong Station (Liu et al. 2003) o Calar Alto (Sánchez et al. 2007)). Los observatorios astronómicos de montaña cuentan con un largo registro de medidas

¹<http://lcogt.net/user/apickles/dev/Palomar/SkyBright/Aube.html>

de brillo de cielo nocturno que pueden ser comparados con la evolución de la actividad humana en sus proximidades. Sin embargo, como se mostrará a lo largo de este trabajo, no son los lugares ideales para estudiar la contaminación lumínica, precisamente por que están situados en lugares en principio poco afectados por la misma.

La contaminación lumínica surge con la civilización: desde la invención del fuego por el hombre, el dominio de la naturaleza por medios artificiales ha sido una constante en la historia de la humanidad. En cualquier tipo de contaminación es muy importante la dosis de la misma y en el caso que nos ocupa, no es hasta la masiva introducción de la iluminación pública con la industrialización que esta empieza a ser un problema para la astronomía. Sin embargo, el verdadero detonante surge con la explosión demográfica y la popularización de la energía eléctrica, que lleva la luz a las calles de la mayor parte de los núcleos población.

En el momento actual la población mundial se ha doblado desde los años 1950, el crecimiento de la población urbana (con sus consecuencias (DeFries et al. 2010)) y por ello la cantidad de luz injectada en la atmósfera ha aumentado dramáticamente. El gasto en energía también se ha incrementado notablemente y de manera constante siendo ahora mismo el gasto más del doble que en los años 70 (ENCY 2014). Al mismo tiempo se ha producido una serie de saltos en tecnología de iluminación en los últimos años que han multiplicado por varios órdenes de magnitud las posibilidades de emitir luz desde las “estrellas domesticadas” lámparas de gas de Robert Louis Stevenson (Stevenson 1881) a las nuevas lámparas de LED (Schubert & Kim 2005) más de siglo y medio de evolución tecnológica. Sin embargo, en iluminación se da la paradoja de que lo que fue brillante ayer, hoy nos parece oscuro, así Berlin, París o Londres eran las brillantes ciudades del pasado (Schlör 1998) pero en la actualidad estas mismas ciudades son pálidos reflejos comparadas con otras como Madrid (Kyba et al. 2014a).

Esta escalada ha sido provocada por el ancestral miedo a la oscuridad que está profundamente enraizado en la psicología humana (Schaller et al. 2003). Sin embargo, los datos objetivos indican que la efectividad de la iluminación en detener el crimen es cuanto menos cuestionable (Marchant 2010). Incluso la verdadera eficacia de la iluminación vial también está siendo cuestionada actualmente (Wanvik 2009) indicando que el alumbrado debería de estar enfocado principalmente a garantizar la seguridad de los peatones y ciclistas y no la de los coches, donde el efecto es significativamente menor. Nos encontramos actualmente que una parte importante de la iluminación produce contaminación lumínica bien por su deficiente diseño o por su exceso de potencia.

Algunas de las consecuencias de esta masiva iluminación son efectos que o bien no se consideran importantes como la imposibilidad de observar las estrellas o la desaparición de la Vía Láctea en la vida de la mayor parte de la población urbana (Cinzano et al. 2001a; Smith 2008), o cuya importancia no ha sido conocida hasta épocas recientes como el peligro de des-

trucción del hábitat de muchas especies (Hölker et al. 2010) o su negativo efecto en la salud humana (Stevens et al. 2013).

Recientemente, los mayores esfuerzos en reducción de la contaminación lumínica surgen del intento de paliar el tremendo gasto en alumbrado público que, por ejemplo, asciende a más de 6.300 millones de euros anuales en Europa (este trabajo). Las autoridades se empiezan a tomar en serio la realización de medidas de control del gasto en alumbrado público. Por ello los últimos años se ha tomado diversas iniciativas legislativas. Las primeras para prevenir el efecto de la contaminación lumínica sobre los observatorios astronómicos como la pionera ley del cielo de Canarias (BOE (Ley 31/1988) y el 13 de marzo de 1992 el Reglamento que la regula (R.D. 243/1992) o La ley andaluza Decreto 357/2010, de 3 de agosto. Sin embargo, hasta el momento la única ley de ámbito estatal es el R.D. 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. Sobre otras legislaciones de otros países se puede leer Meier et al. (2014), pero dado que la mayoría de los casos de estudio son en España, la legislación española es nuestra principal referencia.

Por otro lado, la comisión 50, sección B de la Unión Astronómica Internacional (IAU) se encarga de la protección de los observatorios existentes y potenciales. Sin embargo, sin medidas es imposible garantizar la protección de los mismos, sin contar que el cielo no solo debe ser preservado para los astrónomos sino como derecho de toda la humanidad como marca la Declaración Starlight.

El objetivo principal de esta tesis es determinar como es posible utilizar las técnicas de teledetección para controlar el crecimiento de la contaminación lumínica y determinar el brillo de cielo a partir de técnicas de teledetección. Por ello esta tesis tiene dos partes bien diferenciadas, la primera, del capítulo 2 al 5, en que se discuten las herramientas necesarias de teledetección para medir la emisión de las fuentes de contaminación lumínica, y el capítulo 6 donde se tratan las técnicas astronómicas en tierra necesarias para medir la variación del brillo de cielo y poder relacionarlos con las técnicas ya tratadas. Esta relación se detalla en el capítulo 7.

Pormenorizadamente otros objetivos son:

- Poner la bases para pasar de un sistema de medidas de contaminación lumínica puntuales en el espacio, el tiempo y una sola banda a medidas de una superficie, en rango temporal y para diferentes bandas con la finalidad de conocer como es el cambio en el brillo de cielo para la poder en un futuro realizar una protección efectiva del cielo.
- Para ello se van a tener en cuenta los datos ya disponibles de los satélites DMSP/OLS y SNPP/VIIRS y se van explotar científicamente los datos obtenidos desde la ISS, dando por primera vez datos multiespectrales calibrados en radiancia.

- Además de los datos de satélite se han explorado las posibilidades de medida de las técnicas aéreas multiespectrales e hiperespectrales, con el objetivo de determinar sus capacidades para la determinación de variables de importancia como son los niveles de iluminación, espectro de las fuentes o distribución de intensidades con gran rango dinámico. Estas técnicas son básicas para poder tener datos fiables de los niveles de iluminación, evitar la mezcla de lámparas, el análisis de uso del suelo y otros temas, como la percepción humana del paisaje urbano. Estos temas no serán tratados en esta tesis, pero en este capítulo se presentarán los experimentos que hemos realizado. Incluso si el análisis científico completo no ha finalizado, los resultados actuales permiten conocer cuales son las limitaciones de cada método.
- Desarrollar experimentos en que se pongan de manifiesto las variaciones de la contaminación lumínica en todos sus aspectos (espectral, espacial y temporal) a diversas escalas.
- Finalmente se pretende establecer la relación entre la emisión difusa detectada en VIIRS y ISS con las medidas de brillo de cielo. Se verá cómo esta emisión está directamente relacionada con el brillo de cielo y por tanto los datos de satélite pueden suplir a los modelos en las zonas más brillantes (radiancia mayor de $0.2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$).

Para ello en esta tesis vamos a describir nuevas técnicas para estimar la cantidad de contaminación lumínica y cómo evoluciona ésta con el tiempo. En el capítulo 2 describiremos como es posible determinar la evolución en el gasto energético a nivel global y regional usando los datos del satélite DMSP y global, regional y local con los datos del satélite SNPP, que como veremos, está relacionado linealmente con la cantidad de luz en la atmósfera. En el capítulo 3 mostramos como es posible utilizar las imágenes tomadas por los astronautas en la Estación Espacial Internacional para el estudio detallado de las diferentes tecnologías de iluminación y el estudio detallado de la evolución de la emisión en ciudades. En el capítulo 4 describimos la metodología empleada para crear el mayor catálogo de imágenes multiespectrales nocturnas disponible de manera abierta, fundamental para extender las técnicas desarrolladas en el capítulo anterior a todo el globo. En el capítulo 5 analizamos otras técnicas multiespectrales e hiperespectrales para la adquisición de información con resolución inferior o comparable al metro, estas técnicas nos permiten estudiar la emisión a escala humana. Con el objetivo de relacionar las fuentes de emisión y su efecto en el brillo de cielo, en el capítulo 6 se realiza un análisis espectro-espacio-temporal del brillo de cielo en Madrid y región de influencia. Y finalmente en el capítulo 7 establecemos la relación entre el brillo de cielo y su contrapartida en las imágenes de satélite.

El estudio de las variaciones nos permite hipotetizar sobre cuales son las causas que están detrás de la contaminación, por lo que una vez desarrollado el método, ha de ser aplicado para

comprobar si el experimento es sensible a las variaciones que explican la existencia de la propia contaminación.

Capítulo 2

Imagen nocturna con satélites de observación de la Tierra

2.1. Introducción

El alumbrado exterior, ya sea para alumbrado público, publicitario y ornamental, es el causante de la contaminación lumínica. Su uso está ampliamente extendido por diversos agentes, tanto públicos como privados, así como por diversos sectores económicos. Si se desea una eficaz regulación deben identificarse sus productores y cuantificar su impacto. Por ello es necesario localizar y medir las fuentes de contaminación lumínica y asignarla a los diferentes agentes. El estudio de la contaminación lumínica está lleno de dificultades y resulta muy lento y limitado si se realiza con medidas locales. En esta introducción se justifican las razones del uso de imágenes de satélite y sus ventajas.

En primer lugar existe el problema en la naturaleza de los elementos involucrados en la física del problema. El foco emisor de luz, salvo excepciones, realiza su emisión de manera anisótropa. Además, en la mayoría de las ocasiones, los focos están modificados por luminarias que redirigen la luz, en teoría, a la zona de interés (el suelo, el monumento o el objeto). Por otra parte existen elementos que intervienen en la distribución de luz como los obstáculos circundantes (edificios, árboles, montañas, ...), la luz reflejada en ellos y en el propio suelo. También existen otras fuentes de contaminación lumínica poco estudiadas, como los faros de los vehículos o la iluminación de las casas que escapa por las ventanas (Darula 2013). Una vez que la luz ha superado todos los obstáculos escapa hacia la atmósfera donde se dispersa en todas direcciones y, con cierta probabilidad, hacia el suelo produciendo un aumento del brillo de cielo. Este brillo de cielo aumenta el fondo de las observaciones astronómicas y es, en algunos casos, el mayor contribuyente al fondo luminoso, provocando problemas de contraste especialmente en las fuentes de bajo brillo superficial.

Los efectos de la contaminación lumínica son más importantes en sus lugares de origen pero se aprecian a grandes distancias de los focos que la producen. Los observatorios astronómicos de calidad se sitúan huyendo de la contaminación lumínica lo más posible y generalmente en alturas superiores a los 2.000 m para disminuir los efectos de la atmósfera. Las noches concedidas a los diferentes proyectos de observación son asignadas de acuerdo al brillo de cielo necesario para llevarlas a cabo: noches oscuras en las que no hay Luna, noches brillantes en fase cercana a luna llena y noches grises en los cuartos. La Luna es la fuente natural más importante de brillo de cielo nocturno. Lejos de los grandes núcleos de población, donde se concentran las fuentes de contaminación lumínica, la variación del brillo del cielo nocturno está marcada por la lunación (edad o fase de la Luna) y la posición de la Luna en el cielo. Este es el caso de los cielos naturales de los lugares remotos o, en menor medida, del mundo rural. Aunque los lugares en que se realizan mejores medidas de brillo de cielo, y donde se dispone de registros más largos, son los observatorios astronómicos profesionales, no son los lugares idóneos para estudiar la relación general entre contaminación lumínica y el brillo de cielo nocturno. Esto es debido a su lejanía de las fuentes, a su peculiar microclima y su gran altitud.

Antiguamente en astronomía todo se consideraba estático e imperturbable pero en la actualidad se mide la variación de brillo de las estrellas desde los segundos a las décadas. La medida de las fuentes de contaminación lumínica a través de sus efectos en el brillo de cielo nocturno es necesariamente un estudio afectado fuertemente por la variación temporal de los factores que entran en juego. El mundo urbano es cambiante ya que crece en extensión con el paso del tiempo, se desarrolla y su alumbrado se modifica. Además el alumbrado viario y ornamental y otras fuentes de la actividad como el tráfico cambian a lo largo de la noche. La atmósfera es el paradigma de la variabilidad y por eso, de todos los factores involucrados, la atmósfera es el más cambiante y el que más afecta a la variación del brillo de cielo (Kocifaj 2007).

La observación de la contaminación lumínica desde el espacio ofrece muchas ventajas y también algunas limitaciones. La principal ventaja es la posibilidad de observar de manera simultánea grandes áreas de superficie terrestre, con lo que se pueden trazar mapas de emisión (variación espacial), frente a las medidas puntuales que se pueden realizar del brillo de cielo desde una localización en tierra. Otra ventaja es que al observar las fuentes de manera directa, el efecto de la atmósfera es menor (como se verá más adelante en el capítulo 3), salvo cuando la cobertura nubosa impide la observación. Otro aspecto a tener en cuenta es que, salvo para las imágenes tomadas desde la Estación Espacial Internacional, en general las medidas se obtienen desde el nadir del satélite que no es una medida completa de la verdadera emisión del foco. Este apuntado vertical puede ser el de menor emisión (salvo para focos apuntados directamente en vertical) y siempre, el de menor masa de aire disponible para su dispersión.

Una limitación importante hasta ahora ha sido la falta de instrumental diseñado específicamente para la medida de la contaminación lumínica. Hasta la llegada del satélite SUOMI-NPP(*National Polar-orbiting Partnership*) (Mills et al. 2010) las medidas de satélite solo podían ser realizadas por los satélites DMSP(*Defense Meteorological Satellite Program*) , que es una constelación de satélites meteorológicos para la defensa de Estados Unidos (Elvidge et al. 1999). Las cámaras OLS de estos satélites (Elvidge et al. 1999) diseñados para la observación diurna, resultaron sensibles a las luces artificiales procedentes de los asentamientos humanos y se ha explotado este potencial para estudios de población. Como subproducto de los datos meteorológicos producidos por estos satélites se han realizados varios mapas de fuentes de contaminación lumínica del mundo que han sido utilizados para las más diversas aplicaciones como distribución de población (Lo 2001), consumo energético (Letu et al. 2009), actividad económica (Gillespie et al. 2014), epidemiología (Kloog et al. 2009) y muchos otros. Existen varios intentos de hacer mapas de brillo de cielo (Tapissier 2010; Lorenz 2013) pero el único testado científicamente es Cinzano et al. (2001a) (para la verificación ver Kyba et al. (2013)).

La cámara OLS de los DMSP proporciona unos datos muy interesantes pero su instrumentación fue diseñada en los años 70 del siglo pasado y debemos ser muy cuidadosos a la hora de trabajar con estos datos. Para solucionar algunos de los problemas más importantes de estos sistemas como pueden ser la calibración fotométrica, la saturación, la ausencia de bandas espectrales etc, se diseñó un satélite dedicado a la observación nocturna de la tierra en varias bandas, el NightSat (Elvidge et al. 2007), que sólo existe en concepto pero para el que no se han asignado fondos y no ha llegado a realizarse. El incremento reciente del interés científico de las imágenes nocturnas de satélite (Huang et al. 2014) nos hace ser optimistas sobre el desarrollo próximo de instrumentación específicamente diseñada para el estudio de la contaminación lumínica.

De manera general existen pocos estudios que relacionen la contaminación lumínica y sus efectos sobre el brillo de cielo con las imágenes de satélite. Los trabajos de Pier Antonio Cinzano y Fabio Falchi son los más importantes: Cinzano et al. (2000, 2001a,b); Cinzano (2000); Cinzano et al. (2006). En ellos utilizan las imágenes del DMSP/OLS como fuente para el cálculo para determinar el resultante brillo de cielo. Los modelos son corregidos mediante observaciones complementarias realizadas desde tierra. En los modelos desarrollados por Aubé & Kocifaj (2012), se utilizan además datos de espectroscopía y las imágenes del DMSP/OLS para sus cálculos de brillo de cielo, afectación y sensibilidad. La versión actual de los mismos ya involucra datos de VIIRS además de realizar un exhaustivo análisis de la sensibilidad de los factores interviniéntes en el modelo (Aubé 2015).

Existe sin embargo abundante bibliografía con respecto al uso de los datos del DMSP/OLS para la estimación del consumo total en energía eléctrica de diversos países (por ejemplo Elvid-

Variable	DMSP-OLS	SNPP-VIIRS
Constructor/Operador	U.S. Air Force	NASA - NOAA Joint Polar Satellite System(JPSS)
Órbita	Polar - 850 km de altitud, 98.9 grados de inclinación, 102 minutos.	Polar - 827 km de altitud, 98.7 grados de inclinación, 102 minutos.
Línea de observación	3000 km	3000 km
Instante de paso nocturno	19:30	01:30
Banda de observación	Pancromática 0.5 a $0.9\mu m$	Pancromática 0.5 a $0.9\mu m$
Tamaño del pixel	$5km \times 5km$ en el nadir	$742m \times 742m$
Cuantización	6 bits	14 bits
Saturación	Común en centros urbanos	No saturación
Límite de detección	$\sim 5E - 10 \text{ Watts/cm}^2/\text{sr}$	$\sim 2E - 11 \text{ Watts/cm}^2/\text{sr}$
Calibración	Ninguna para la banda de baja iluminación	La difusión solar es usada para calibrar durante el día. La calibración se extiende en el modo de baja iluminación.
Continuidad futura	Los dos últimos satélites volarán en órbitas de amanres/atardecer	JPSS está construyendo un segundo VIIRS y planes de un tercero. Ambos volarán en órbitas de medianoche.

Tabla 2.1: Comparación entre el satélite DMSP y SNPP (Elvidge et al. 2013)

ge et al. (1997c, 1999), Letu et al. (2009), Ghosh et al. (2013)). También se han utilizado estas imágenes para la determinación de población, encontrándose correlaciones muy claras entre iluminación y población (por ejemplo Lo (2001)). Sin embargo, dada la baja resolución de las imágenes y la ausencia de bandas espectrales, no existen apenas estudios sobre la naturaleza de la emisión, tan solo relaciones estadísticas entre el brillo medido y la población o el consumo eléctrico total. Sólo en Kuechly et al. (2012) tienen en cuenta este problema de resolución como ejemplo del uso de las imágenes aéreas frente a las imágenes de satélite para el estudio de la contaminación lumínica.

En la actualidad la cámara *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band* (VIIRS/DNB) del satélite SUOMI-NPP es el instrumento más potente disponible en satélites de observación de la tierra que pueden trabajar de noche. Este instrumento es capaz de distinguir las unidades básicas de las ciudades, tales como aeropuertos, barrios o complejos industriales, aunque aun no es capaz de distinguir calles. VIIRS/DNB tiene un área de pixel 45 veces inferior a la del DMSP/OLS, lo que abre una puerta nueva a la observación nocturna (ver tabla 2.1).

2.2. La contaminación lumínica desde el satélite DMSP/OLS

Los satélites DMSP llevan operando desde los años 60 y desde el año 1976 estos satélites cuentan con una cámara OLS u Operational Linescan System. Esta cámara es un radiómetro de barrido habitual en teledetección. Consiste en un sensor y un espejo basculante que barre la dirección longitudinal, mientras el desplazamiento del satélite hace que se recorra la dirección vertical (en la figura 2.1 pueden verse ejemplos de diferentes tipos de radiómetros. El de la cámara OLS corresponde al primer tipo). El sensor de la cámara OLS es un tubo fotomultiplicador. La cámara es sensible en el rango de los 440 a los 940 nm. La cámara adquiere tiras de aproximadamente 3000 km. de largo con un tamaño de pixel de 0.56 km (Elvidge et al. 1997b), sin embargo, después este pixel es suavizado hasta llegar a los $5 \times 5 \text{ km}^2$. Posteriormente se reprojeta toda la información en una malla de celdas de $30'' \times 30''$. El tratamiento de las imágenes de esta cámara corre a cargo del grupo de observación de la tierra (EOG) dentro de Servicio Nacional de datos geofísicos, parte del servicio de datos de satélite y servicios de información (NESDIS) del Servicio meteorológico y oceánico de Estados Unidos (NOAA). Este grupo publica varios productos relacionados con esta cámara. En concreto, son de interés de este trabajo los mosaicos globales de luces estables desde 1992 hasta 2012 (no calibrados en flujo) (Baugh et al. (2010) y Small & Elvidge (2013)) y mosaicos calibrados en flujo. Hasta este año (2014) solo estaban disponibles dos imágenes de este tipo: las correspondientes a los períodos 1996/97 (Elvidge et al. 1999) y 2006 (Ziskin et al. 2010). Actualmente se disponen de datos calibrados o pre-calibrados desde 1996 a 2011, sin embargo no hay aun ninguna publica-

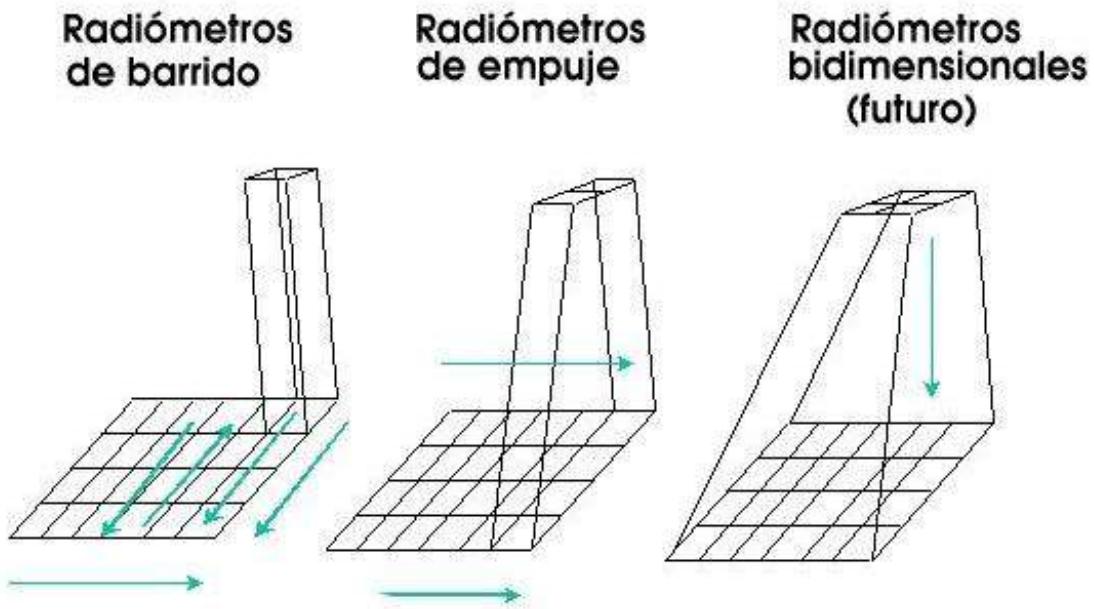


Figura 2.1: Ejemplos de diferentes tipos de radiómetros. La cámara OLS corresponde al primer tipo, un radiómetro de barrido, y VIIRS al segundo tipo. La cámara Nikon D3S operada desde la ISS podría considerarse un radiómetro primitivo bidimensional. Fuente: SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia (prof. Francisco Alonso Sarría) <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>

ción definitiva sobre el método de calibración EOG et al. (2014) salvo la preliminar Baugh et al. (2013).

Las características de la cámara determinan la naturaleza de los datos, pero es importante conocer algunos aspectos relacionados con la operación del propio satélite. En particular hay que destacar que los pasos de los satélites DMSP son típicamente a las $\sim 19 : 30$ hora solar del lugar de observación. Este hecho es de gran importancia ya que como podemos ver en el gráfico 3.38 la variación temporal durante la noche puede llegar a ser muy acusada. Por ejemplo, el satélite SUOMI-NPP pasa sistemáticamente sobre las 1:30 hora solar, por lo que los satélites están observando momentos totalmente diferentes en cuanto a la actividad de las ciudades (Elvidge et al. 2013). El futuro es que los próximos satélites continúen en órbitas de amanecer/atardecer.

2.2.1. Variación del gasto en alumbrado público en España

Introducción

Las imágenes de satélite nocturnas han revolucionado nuestra imagen de la tierra y se ha convertido en un ícono de la lucha contra la contaminación lumínica. Hasta ahora existen muchos trabajos que han relacionado la emisión que es posible ver por los satélites DMSP y su instrumento OLS con diferentes parámetros tales como la distribución de la población, consumo energético, actividad económica y otros (Elvidge et al. (1997a,b,c, 1999, 2009); Zhao et al. (2012); Pandey et al. (2013), ...). Los efectos de esa emisión en la contaminación lumínica fueron tratados por Cinzano et al. (2000, 2001a,b); Cinzano (2000); Cinzano et al. (2006).

Sin embargo, hay pocos trabajos que traten el gasto energético en alumbrado público, que es la principal fuente de contaminación lumínica (Elvidge et al. (2007), Gallaway et al. (2010), Kuechly et al. (2012)). El Grupo UCM de Astrofísica Instrumental y eXtragaláctica¹ lleva varios años trabajando para determinar la manera de comparar la eficiencia energética entre países y su verificación mediante de imagen de satélite (Sánchez de Miguel (2007); Sánchez de Miguel & Zamorano (2010); Sánchez de Miguel et al. (2010, 2013a)). El objetivo es establecer una metodología que permita comparar el gasto energético en alumbrado público entre los diversos países y regiones de Europa y si es posible el mundo. Este trabajo es tan solo un primer paso, ya que para realizar un estudio completo es necesario disponer información espectral o al menos en varias bandas para poder conocer mejor la fuente emisora (Elvidge et al. (2007)), pero otro método alternativo es realizar una calibración empírica basada en estadísticas de gasto energético en alumbrado público. Es relativamente difícil encontrar esas estadísticas desglosadas y particularizadas para el caso de el gasto energético en alumbrado público. En nuestro caso sólo hemos podido acceder al informe VITO (Van Tichelen et al. (2007)), unos pocos datos sobre Italia (Pindar & Papetti (2002)) y varios documentos dispersos del Ministerio de Industria Español. En este trabajo intentamos utilizar las estadísticas más completas sobre consumo eléctrico en alumbrado público a las que hemos podido tener acceso para calibrar empíricamente las imágenes del DMSP/OLS y dar una estimación de como habría sido la evolución temporal relativa de cada provincia y un valor absoluto del consumo eléctrico esperado según las imágenes calibradas.

¹A pesar de ser un grupo de investigación básica e instrumentación, este trabajo es una clara aplicación al mundo terrestre de las mismas técnicas de análisis realizadas en la investigación en galaxias <http://guaix.fis.ucm.es/DarkSkies>

Las imágenes del DMSP utilizadas

Como fuente principal de información se han usado las imágenes calibradas en radiancia correspondientes a los años 1996-1997 (Elvidge et al. (1999)) y 2006 (Ziskin et al. (2010)), imágenes no calibradas del DMSP/OLS 1992-2010 (Elvidge et al. (1997b, 1999, 2009), Baugh et al. (2010)). Adicionalmente se ha trabajado con datos de Suomi/VIIRS; todas estas imágenes proporcionadas por el Earth Observation Group, NOAA National Geophysical Data Center. Como contraste usamos las imágenes tomadas por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional (Zamorano et al. (2011a), Sánchez de Miguel et al. (2013b)).

Las estadísticas disponibles

Las estadísticas de consumo eléctrico han sido tomadas de MIEYC (2009) publicadas en la página web del Ministerio de Industria, Energía y Turismo y proporcionan información por sectores de actividad. Desde el año 1958 al año 2007, hay datos de consumo eléctrico en alumbrado público para todo el país. Entre 1975 y 2007 además, pueden consultarse datos de consumo eléctrico por provincias. A partir de 2007, no está disponible información desglosada sobre consumo eléctrico en alumbrado público debido a que en el cambio del CNAE 93 (BOE (1992)) al CNAE2009 (BOE (2007)), dicho gasto pasa a incluirse dentro de consumo eléctrico del resto de servicios públicos. Estos datos se elaboran mediante el envío de cuestionarios a las empresas comercializadoras². Estos datos presentan algunas deficiencias. Como se puede apreciar en la figura 6 de Sánchez de Miguel & Zamorano (2010). Para algunas provincias existe una caída muy importante del consumo entre los años 1985 y 1992. Esto se traduce en que aparentemente no crece el consumo en alumbrado público en España durante esos años y vuelve a crecer de manera constante a partir de entonces. Gracias a los datos del libro del mismo ministerio La Energía en España 2004 MITYC (2005) y a los datos de archivo del Instituto Nacional de Estadística(INE) que dispone de datos de consumo eléctrico entre los años 1936 y 1957, pudimos en Sánchez de Miguel et al. (2010) demostrar que gran parte de los datos entre 1985 y 2006 efectivamente eran erróneos. Entre junio y noviembre de 2010 el ministerio publicó los datos correspondientes a 2007 y a la revisión de 2005 y 2006 en la que se ve cómo efectivamente existía ese error. En las figuras 2.4 y 2.13 se pueden ver en color negro los datos correspondientes a estos datos MIEYC (2009).

Se localizó el origen de los errores tras realizar una entrevista con un funcionario del servicio de estadísticas del ministerio. La estadística se realiza mediante la encuestas a los productores de energía sobre las actividades económicas relacionadas con los contratos de electricidad.

²http://www.mineco.es/energia/balances/Estadisticas/Cuestionarios/Electricas/Mod_eed_comercializadoras_2012.doc

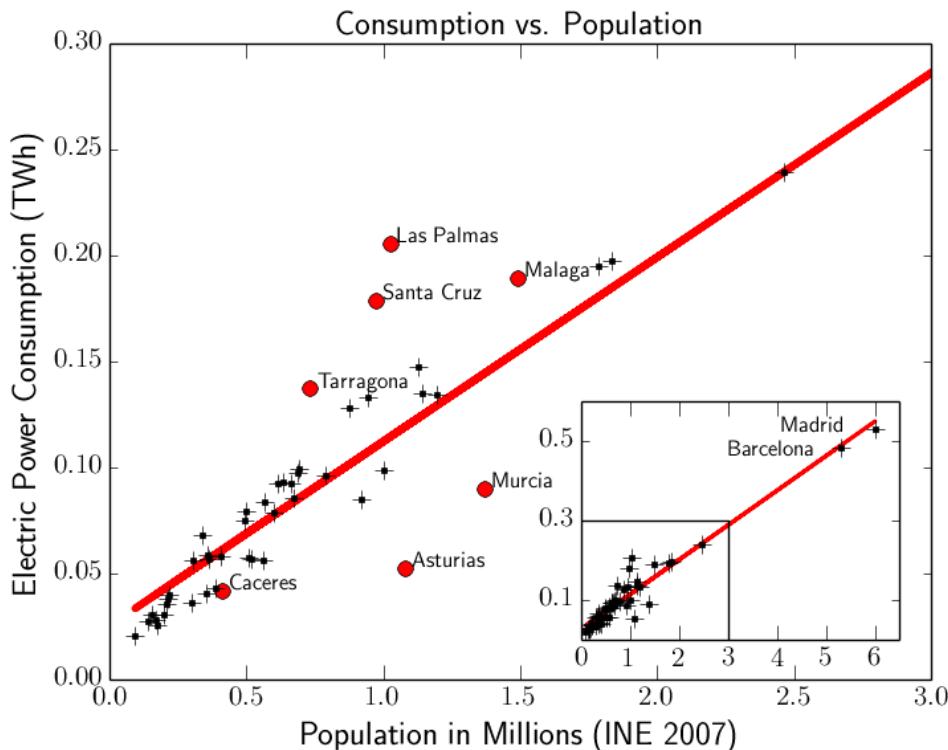


Figura 2.2: Consumo eléctrico en alumbrado público frente a la población. Esta relación puede ser comparada con las halladas por otros autores como Elvidge et al. (1999) o Kyba et al. (2014a).

Se comprobó cómo en los cuestionarios además del tipo de actividad a la que se dedicaba el cliente, también se consultaba el tipo de tarifa. Hasta 2006 existía una tarifa especial de alumbrado público y hasta esa fecha se forzaba a que los datos correspondientes a uso de la electricidad *Alumbrado público* casaran con los de la tarifa especial de alumbrado público B.0.(Lillo Bravo et al. 2007). Sin embargo, para los municipios más grandes, tales como Madrid, Barcelona o Valencia, era mucho más económico el uso de otras tarifas (2.0.N. por ejemplo). Para las provincias que no tenían municipios grandes, por tanto, las estadísticas son fiables. Para contrastar la calidad de los datos del año 2007, se han comparado los datos de consumo, población y radiancia acumulada tal y como hace Elvidge et al 1999. En la figura 2.2 puede verse cómo el ajuste lineal a los datos de 2007 es muy bueno ($R^2 = 0.93$) frente los ajustes de los años 1990 o 2000 con un $R^2=0.68$ y $R^2=0.58$ respectivamente. Para el año 1980 en cambio el ajuste es tan bueno como el del año 2007.

La buena correlación en población, aun así presenta algunos valores atípicos (outliers en rojo), tales como Las Palmas, Santa Cruz, por exceso y por defecto Murcia, Asturias y

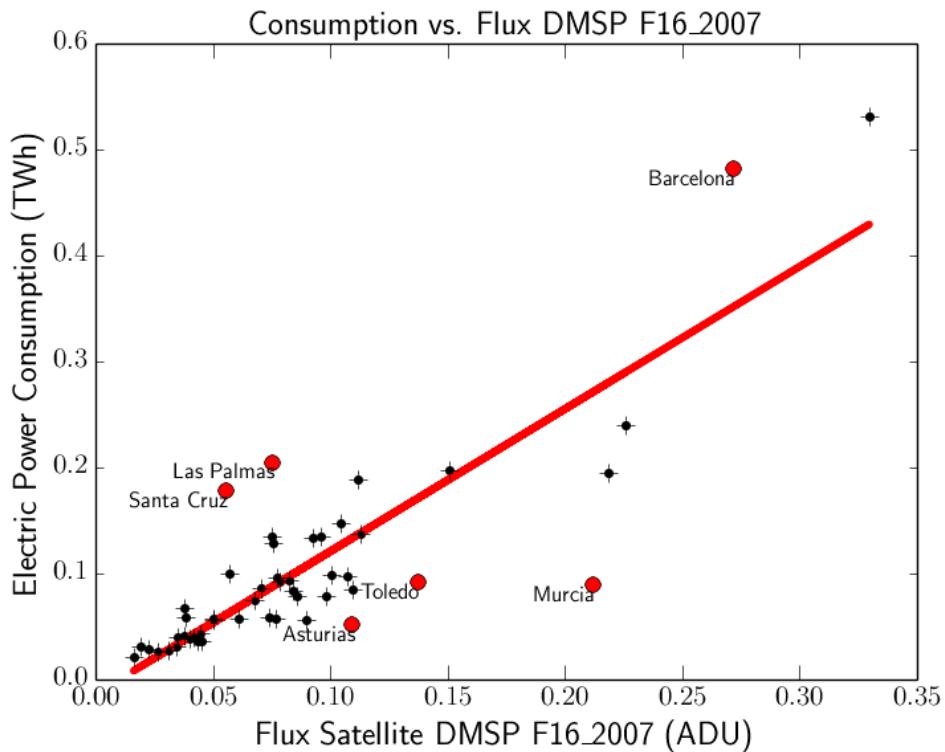


Figura 2.3: Consumo eléctrico en alumbrado público frente al flujo de la imagen F16_2007. Madrid y Barcelona, arriba a la derecha, claramente saturadas, ya que el flujo en unidades adimensionales es significativamente menor de la tendencia general.

Pontevedra. En la figura 2.3, puede verse cómo para Santa Cruz, Las Palmas, y La Rioja también parece haber un exceso de consumo tanto para la población como para el flujo medido en la imagen de satélite correspondiente a dicho año. Esto nos hace pensar que para esas provincias el dato de consumo eléctrico sea poco fiable. Aun así, es de esperar una natural dispersión entorno a la línea de tendencia debido a la diferente densidad de población (Sánchez de Miguel & Zamorano 2010), tipo y edad de las lámparas, además de causas económicas. Pero, tanto la población como el consumo son magnitudes extensivas y por tanto, en regiones suficientemente grandes y homogéneas, tenderán a crecer de la misma forma.

Para algunas de las provincias grandes, tales como Madrid, Barcelona o Valencia, disponemos de estadísticas adicionales. En este sección, por simplicidad, explicaremos las estadísticas que disponemos para el caso de Madrid que es el más completo (ver figura 2.4). Para la región de Madrid disponemos datos de la Comunidad de Madrid y de El Ayuntamiento de Madrid. Los datos de la Comunidad de Madrid presentan los mismos errores que los datos del

ministerio entre los años 1985 y 2000. Aparentemente a partir del año 2000 parece que se recupera la normalidad con una peculiaridad: el consumo en alumbrado público es un factor 10 menor que el que debería para ser del mismo orden de magnitud que los datos que proporciona el ministerio. Además de esto, los datos de consumo en alumbrado después del año 2008, se transforman según la nueva CNAE2009 y ya no se da el dato de *Alumbrado público* de la misma manera, sino entre *Alumbrados no especificados* y *Alumbrado de administración y otros servicios públicos*. Su suma es del mismo orden de magnitud que lo que el CNAE93 indicaba como consumo eléctrico en alumbrado público, con la diferencia de que en este caso no hay que³ multiplicar por 10.

Por otro lado tenemos los datos de consumo eléctrico del Ayuntamiento de Madrid. Disponemos de datos del ayuntamiento separado por barrios, tipos de lámparas y número de puntos de luz desde el año 1975. Aparentemente, la parte principal del descenso que se produce en los datos de consumo en los datos de la Comunidad de Madrid y en el Ministerio se debe a que no están incluidos los datos del Ayuntamiento de Madrid. Puede verse que entre 1989 y 1999, cuando se suman los datos de la comunidad y el ayuntamiento se recupera la tendencia original que tenían los datos históricos del Ministerio de Industria para Madrid provincia.

Fuentes visibles en DMSP

Las estadísticas oficiales de gasto en consumo eléctrico indican que la evolución en este tipo de consumo se produce de manera suave. Esto es debido a que en general, los cambios de alumbrado en regiones grandes se producen de manera gradual si la región es suficientemente grande. En algunos casos, la emisión podría tener saltos por la introducción de nuevas fuentes de manera masiva o una sola fuente extremadamente intensa, pero esto no suele ser habitual. Casos de incremento no suave han sido por ejemplo la introducción de plumas de refinerías o extracciones de petróleo mediante fraking. Por tanto, la emisión luminosa producida por el alumbrado público debe evolucionar de la misma manera. En general, la mayor parte de la contaminación lumínica y de la emisión que podemos detectar desde los satélites en el rango de las 0.5 a 0.9 μm corresponde a este tipo de fuentes. Sin embargo, existen algunas zonas en las que las fuentes más importantes no corresponden al alumbrado público, sino a otros dos grupos de fuentes contaminantes: grupo 1: alumbrados ornamentales o seguridad (centros de ciudades, monumentos emblemáticos, minas o aeropuertos) Kuechly et al. (2012) o grupo 2: extracciones petrolíferas o incendios.

Las fuentes de tipo 1 no suelen entrar en las estadísticas, pero son fácilmente identificables en las imágenes y aparecen en las imágenes de DMSP. Gran parte de estas fuentes se encuentran

³<http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/anuario/descarga/anu12-2-3.xls> Illustration 1: Power consumption in Street lighting versus population(INE)

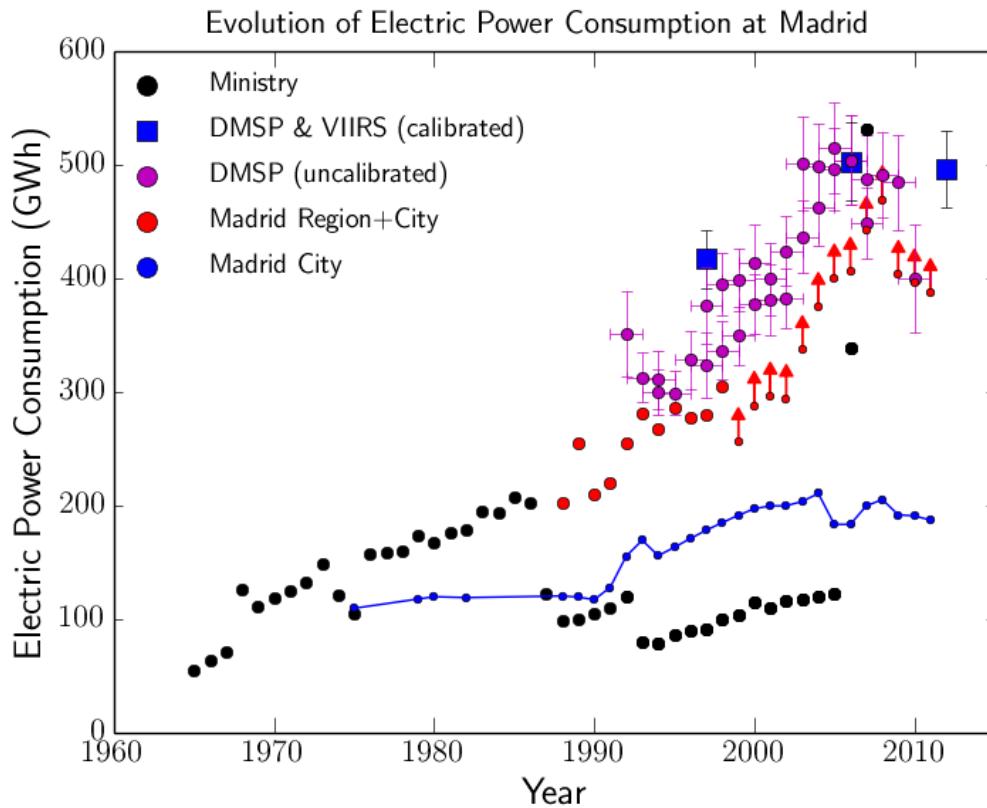


Figura 2.4: Consumo en alumbrado público de la Comunidad de Madrid. Los datos del MICYT en negro, los datos del gobierno de la Comunidad de Madrid en puntos rojos. Los puntos azules corresponden a los datos de la ciudad de Madrid. Los puntos rojos con flechas corresponden a la suma de los datos de la Comunidad de Madrid más los datos de la ciudad de Madrid desde 1986-1999. Los cuadrados azules, consumo estimado usando los datos calibrados en radiancia de: DMSP 1997, DMSP 2006 y 2012 VIIRS en pruebas. Los puntos magenta corresponden a los datos no calibrados. Las barras de error de los puntos cuadrados han sido calculados usando 90 % intervalo de confianza de la relación consumo vs. radiancia. Las barras de error magenta han sido calculadas usando la dispersión de la corrección entre satélites y 90 % intervalo de confianza de la relación consumo vs. radiancia.

en regiones saturadas de los centros de las ciudades y varían grandemente durante la noche (Kuechly et al. (2012), Luginbuhl et al. (2009), Sánchez de Miguel (2013)). Las fuentes de tipo 2, tampoco aparecen en las estadísticas mencionadas, pero en ocasiones no son estables y no están presentes en las imágenes de luces estables del DMSP (Baugh et al. (2010)).

Consumo eléctrico en alumbrado público usando imágenes calibradas en radiancia.

Siguiendo la metodología descrita en Elvidge et al. (2009), se ha realizado una extracción de la radiancia acumulada por provincias españolas. A diferencia en Elvidge et al. 1999, nosotros no usamos los datos de consumo eléctrico total, usamos el gasto en alumbrado público debido a que está relacionado físicamente con la emisión luminosa que se detecta por el DMSP, salvo por la reflectividad del suelo, la eficiencia de la lámpara y los obstáculos en la visión del satélite.

En la figura 2.5 se aprecia una correlación clara entre la radiancia acumulada⁴ y el número de cuentas en la imagen sin calibrar. La figura 2.6 muestra de manera evidente la correlación entre el consumo eléctrico y la radiancia acumulada. En la primera iteración se realiza un ajuste lineal para eliminar outliers, método que también usa Li et al. (2013), sin embargo, a continuación se ha realizado un ajuste lineal a logaritmos de los valores, $y = xm + 10c$, equivalente a $\log_{10}(y) = m \log_{10}(x) + c$, equivalente a $y = 10^c \cdot x^m$, donde “x” es la población, “y” corresponde al consumo eléctrico. En principio, dado una fórmula urbanística de construcción, el gasto debería escalar linealmente con la población y/o el área construida. Sin embargo, los núcleos de las grandes ciudades suelen ser más densamente poblados que los de municipios menores, por ello se ha permitido que el ajuste tuviera un grado de libertad extra, además de que el ajuste lineal tradicional da un peso excesivo a valores muy altos, como son Madrid y Barcelona.

En la figura 2.6, puede verse como los datos de este trabajo son compatibles con los de Elvidge et al. 1999, siendo una prolongación natural de los mismos. Las líneas son los mismos ajuste presentados en la figura 2.5. Hay que matizar que los datos de consumo de la figura 2.6 correspondiente a los Estados Unidos han sido divididos por 80 para corregir el efecto de la menor eficiencia de las lámparas americanas y el porcentaje del consumo total invertido en iluminación pública, (aproximadamente un 1.77 % del total según NREL (2002), sin embargo la eficiencia típica de las lámparas en EEUU es de 84 lm/W NREL (2002) frente a las 121 lm/W de España (Van Tichelen et al. 2007)). Para este trabajo no se ha corregido de efecto de área, tal y como hacen otros autores (Elvidge et al. (1999), Letu et al. (2010), etc) ya que el efecto del área entre regiones de la Península ibérica no supera el 10 % y la latitud es similar a la de los Estados Unidos, por lo que el efecto es similar. Sí está tomado en cuenta este efecto en el trabajo en desarrollo para el resto de Europa (sección 2.3.2), en el presente trabajo se realizará una corrección de área eficaz sin mover la información de los pixeles (remuestrear) para correlación de errores (Cardiel et al. (2002)).

⁴Tengase en cuenta que la radiancia acumulada es una magnitud sin sentido físico, como aproximación instrumental proporcional localmente a la potencia radiada. Sin embargo se ha utilizado para poder comparar con otros autores.

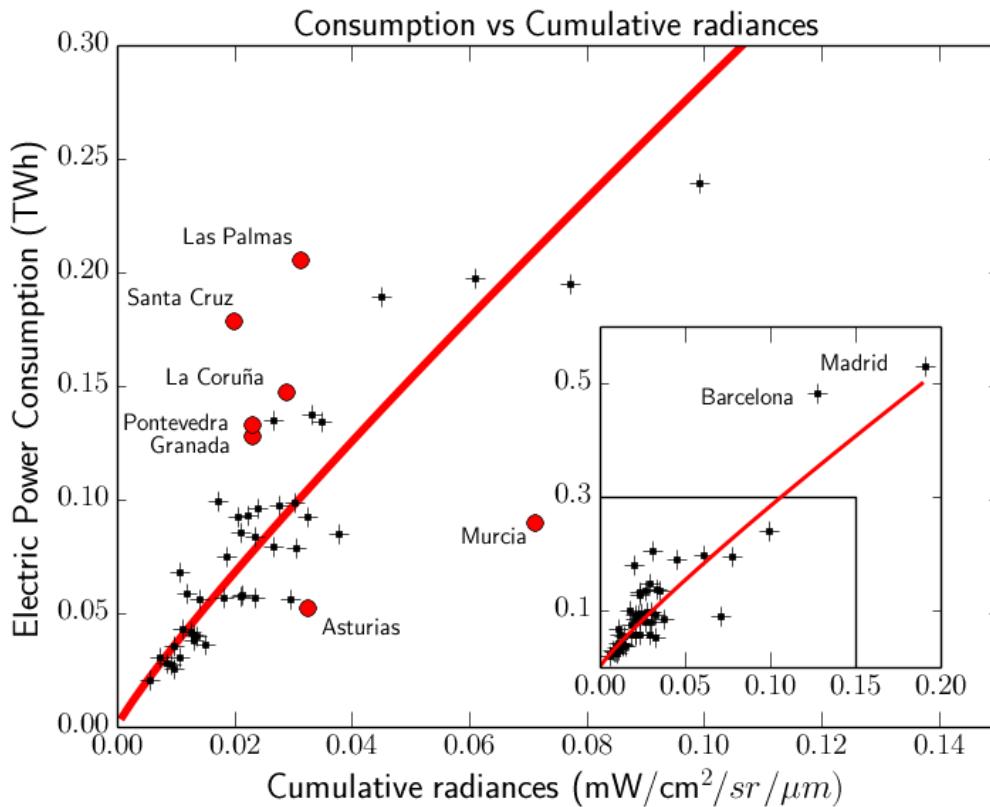


Figura 2.5: Ajuste a la relación entre consumo eléctrico en alumbrado público y la radiancia acumulada. El ajuste esta representado por la línea roja. En el detalle se puede apreciar los puntos de Madrid y Barcelona

Intercalibración de datos no calibrados

España es la región elegida para la realización de la intercalibración, ya que no existen apenas fuentes del tipo 2 pero sí muchas del tipo 1 como las centrales nucleares de Trillo, Zorita, Aeropuerto de Madrid/Barajas o los alumbrados ornamentales del centro de Madrid. Gran parte del alumbrado ornamental es variable, por lo que en las imágenes del DMSP aparecen si están presentes en más del 50% de las imágenes (Baugh et al. (2010)). Este efecto se aprecia en las imágenes de alta resolución de la ISS obtenidas a diferentes horas de la noche. La estrategia de intercalibración seguida es simple: se asume que existe una relación entre las imágenes calibradas y las no calibradas tal y como observa (Elvidge 1997b) y se usan las provincias como regiones de control ya que los datos de los que se dispone son integrados por provincias.

Por tanto, en primer lugar se extraen los valores de las regiones tanto en la imagen calibrada del satélite F16_2006 (Ziskin et al. (2010)) como de la misma sin calibrar. Se observa que existe una relación clara, que se ajusta por un polinomio de grado 4 (ver figura 2.8).

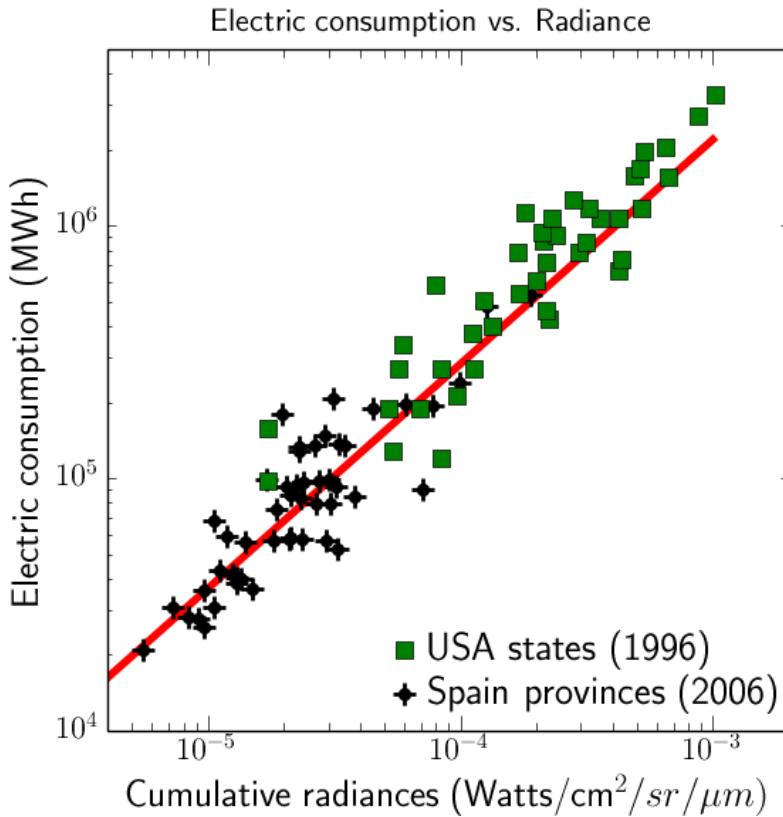


Figura 2.6: Comparación entre el consumo eléctrico total en Elvidge et al. (1999) dividido por un factor 80, y el consumo en alumbrado público en España. El ajuste es el mismo que en la Figura 2.5

La razón física por la que existe una relación entre la imagen calibrada y la no calibrada se discute en Elvidge et al. (1999), pero parece ser que es debido al aumento de señal en zonas en las que no existe emisión debido al *diffuse lighting* producido por las zonas saturadas en las imágenes no calibradas. Gracias a las imágenes HDR⁵ (Zamorano et al. (2013a) y capítulo 3 del presente trabajo) tomadas desde la Estación Espacial Internacional, esperamos poder determinar si esa *diffuse lighting* es un efecto real o instrumental (ver capítulo 7). En nuestro trabajo en desarrollo sobre la calibración de las imágenes de la ISS (Zamorano et al. (2011a), Zamorano et al. (2013a), Sánchez de Miguel et al. (2013b)), hemos realizado una primera versión de imagen HDR donde parece que dicha *diffuse lighting* esta es real como se verá en la figura 3.29. Un estadio posterior de la investigación se presenta en los capítulos 3, 6 y 7 de este trabajo.

Tras aplicar esta relación a todos valores resultantes de extraer el flujo no calibrado para cada satélite se obtiene un valor aproximado de la radiancia acumulada para todos los años.

⁵HDR, High Dynamic Range o Alto Rango Dinámico

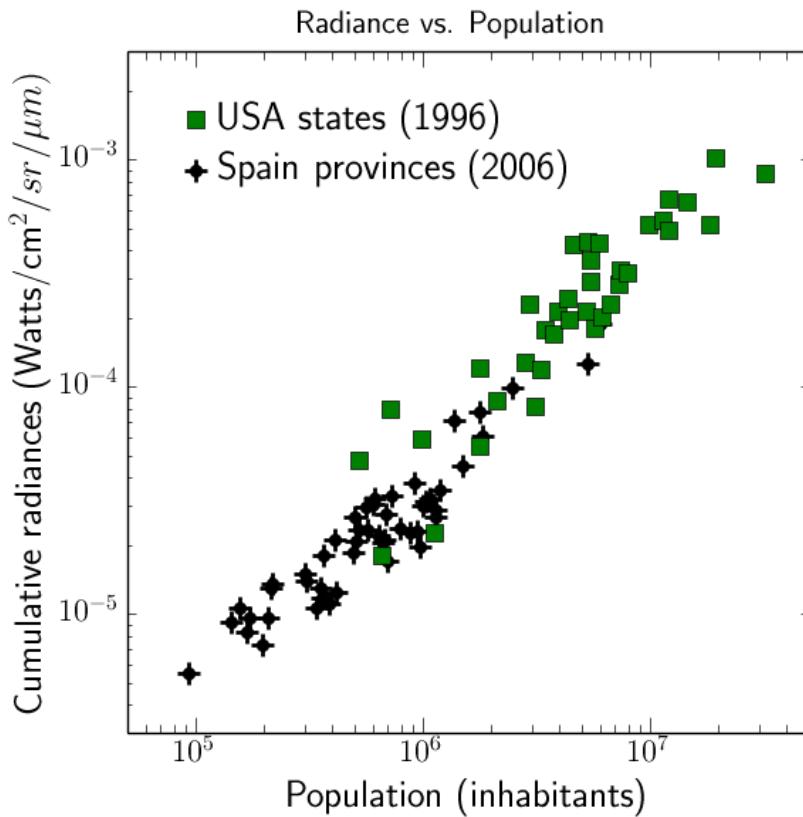


Figura 2.7: Población frente a radiancia acumulada. USA por Elvidge et al. (1999), España corresponde a Sánchez de Miguel et al. (2014c)

Sin embargo, como muchos otros autores han indicado (Figura 14 Falchi 2005 en Cinzano et al. (2006), Elvidge et al. (2009), Letu et al. (2010), Pandey et al. (2013)) existen diferencias sistemáticas entre satélites y años (ver figura 2.9). Otros autores para corregir estas diferencias utilizan el método de Elvidge et al. (2009). Este método se basa en el análisis punto a punto de una región. Sin embargo, hemos observado que existen diferencias significativas entre regiones. Para nuestro caso puede deberse a la diferente distribución de intensidades entre regiones, pero para evitar hacer suposiciones a gran escala y con el objetivo de extrapolar este trabajo a nivel global, hemos supuesto que en primera aproximación la calibración dentro de las diferentes regiones de una imagen es la misma.

Por otro lado, tal y como los datos de consumo eléctrico nos indican, la evolución es suave. Si se aproxima esa evolución para cada región por un ajuste lineal a los datos extraídos de la imagen calibrada F12_1997 y F16_2006 se obtiene, por interpolación lineal y extrapolación, un valor esperado de la radiancia acumulada para los años comprendidos entre 1992 y 2010. A continuación se realiza un ajuste lineal entre los datos esperados por extrapolación de los datos

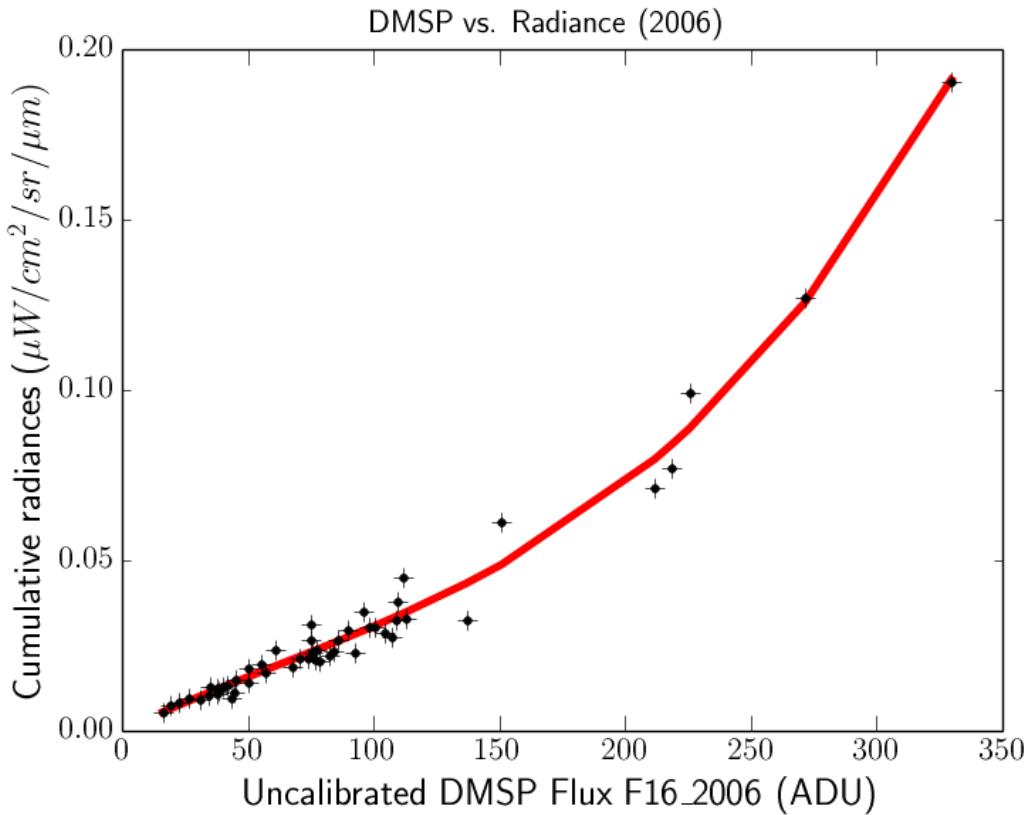


Figura 2.8: Relación entre la imagen F16_2006 no calibrada y calibrada para las provincias españolas. La línea roja es un ajuste polinomial de cuarto orden.

calibrados y la aplicación de la calibración empírica de F16_2006 a los datos no calibrados de 1992 a 2010 (ver figura 2.10). Esto lo realizamos para cada una de las provincias españolas y se estudian los residuos del ajuste. Estos residuos muestran una tendencia relativa muy clara para cada satélite, con diferente grado de dispersión que probablemente se deba a la falta de linealidad observada por otros autores que realizan correcciones pixel a pixel. En este trabajo simplemente se considera dicha dispersión como un error aleatorio en la determinación del flujo, ya que el análisis multi región pixel-pixel puede ser muy complejo. La desviación relativa media con respecto a los múltiples ajustes, es el factor de corrección que se debe aplicar para llegar a una mejor estimación del valor de la radiancia acumulada. Dicho de otra manera, para cada año, existe una desviación entre lo extrapolado linealmente y el valor obtenido en cada región. Por coherencia, el valor más robusto será el promedio de las correcciones locales para el conjunto de las zonas estudiadas. Este método hace que al usar más de 52 regiones de comparación, los valores absolutos sean más robustos que los utilizados por otros autores que usan tan solo 2 regiones como Hsu et al. (2015). La imagen F16_2006 se ha tomado como referencia. Tras

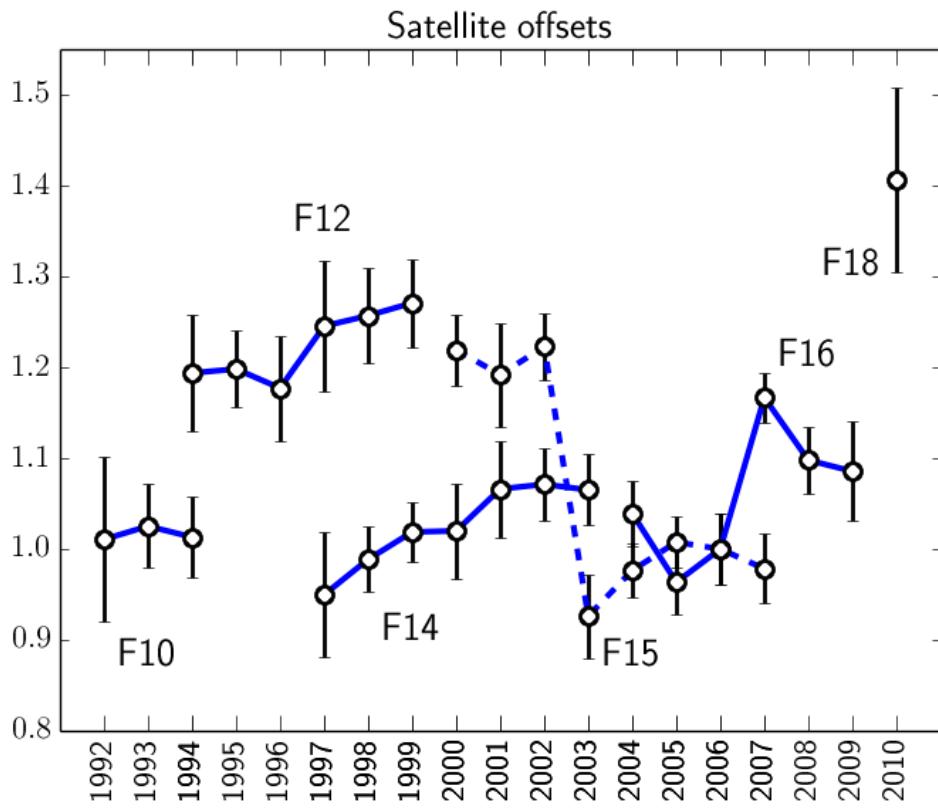


Figura 2.9: Offset entre diferentes satélites (FXX) obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en la figura 2.12. La imagen F16_2006 se ha utilizado como referencia. La barra de error corresponde a la desviación estándar de los valores relativos de cada región frente a los esperados mediante la interpolación lineal entre las imágenes calibradas del DMSP 1996-1997 y 2006.

aplicar la corrección a los datos extraídos sin calibrar y después la calibración empírica, se obtiene un valor corregido de la radiación acumulada para cada región. Este procedimiento reduce la dispersión de los datos de manera muy importante y, al ser una corrección media, conserva para cada región su propia evolución.

Consumo eléctrico en alumbrado público vs Radiancias acumuladas

Numerosos trabajos exploran la relación entre el consumo eléctrico y la radiancia (Elvidge et al. 1997c, 1999; Lo 2002; Letu et al. 2010). Pero existen algunos datos dispersos sobre consumo eléctrico en alumbrado público, que está mejor relacionado a priori con la radiancia observada. Sin embargo, estos datos pueden contener fallos importantes en la estadística, tal y como podemos esperar de la falta de suavidad de algunos datos de nuestra muestra de referen-

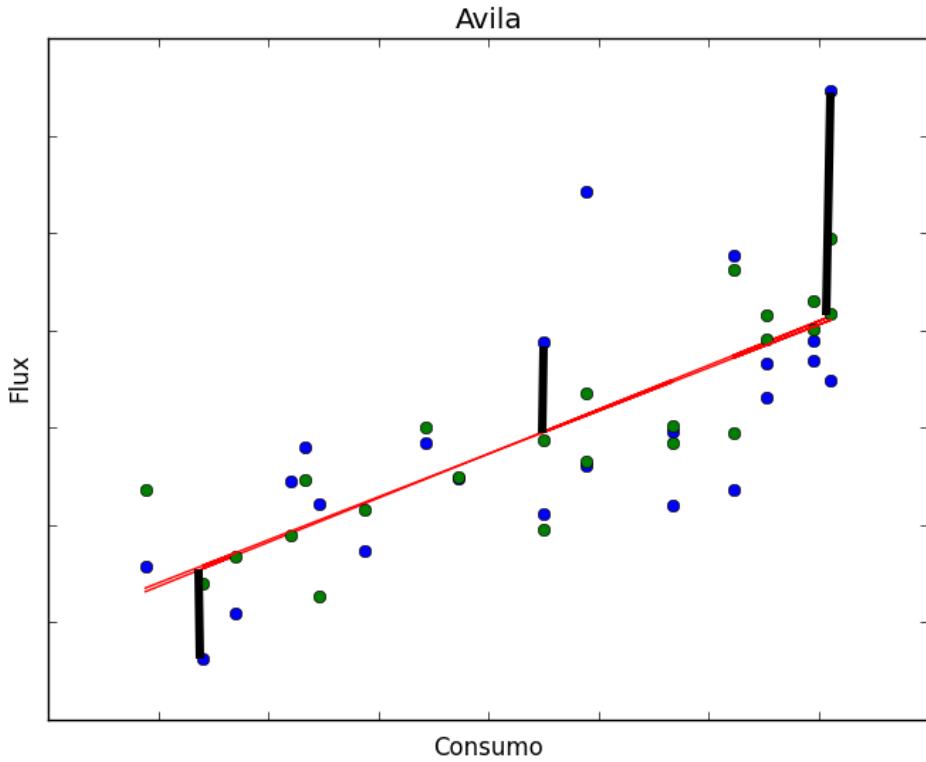


Figura 2.10: Con puntos azules se marca la relación deducida en la figura 2.8 sin aplicar ninguna corrección. En rojo el ajuste lineal a los datos de 1997 y 2006. En negro los offsets para la los datos de la provincia de Ávila para tres valores no corregidos. En verde los valores resultantes una vez se corrige usando los offsets de todas las provincias (ver figura 2.9).

cia: los datos de evolución en gasto de alumbrado público del Ministerio de Industria Español. Durante varios años detectamos que existían errores muy grandes para las provincias de mayor consumo, tanto es así que se producían saltos en el consumo muy grande y su relación con la población iba degradándose año a año. Sin embargo, tras una entrevista con los funcionarios responsables de las estadísticas pudimos comprobar que la razón de dichos saltos era el incorrecto computo del gasto en alumbrado público por su diferente tarifa contratada en los municipios más grandes del país. Dicha posibilidad desapareció en 2007 y los datos de ese año volvieron a ser proporcionales a la población. Por ello, decidimos escoger dicho año como referencia para este estudio, además de por su cercanía a la imagen calibrada en radiancia F16_2006.

En primer lugar se muestra en la figura 2.2 que la relación entre el consumo y la población es muy buena. También hay una buena relación entre flujo y consumo, con algunos valores

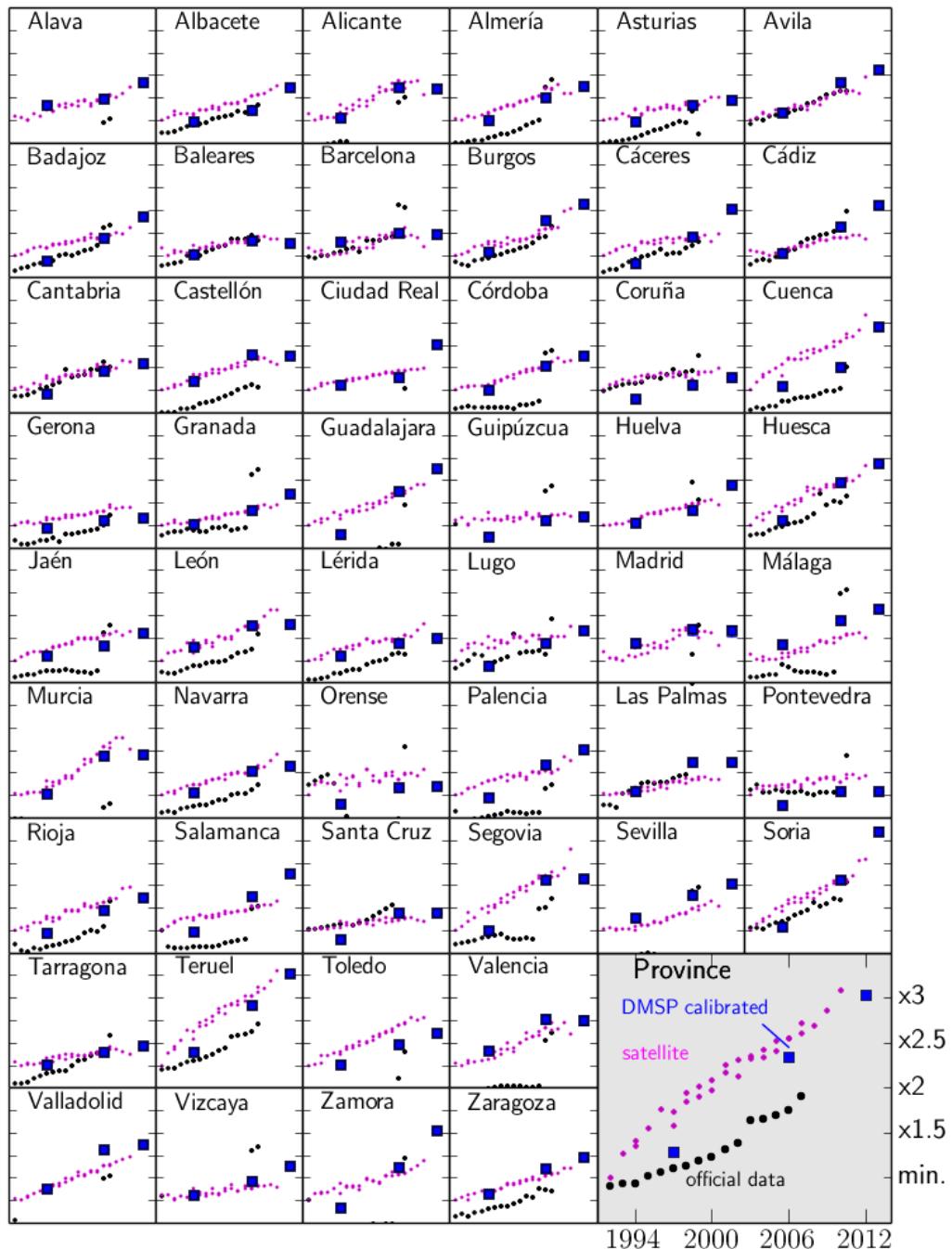


Figura 2.11: Evolución del consumo en alumbrado público en las provincias de España. Los datos oficiales corresponden a los puntos negros. Los datos obtenidos a partir de imágenes no calibradas son los puntos magenta y a partir de las calibradas los puntos azules (1996-1997 DMSP-OLS, 2006 DMSP-OLS y 2012 SUOMI-NPP/VIIRS en pruebas). La escala es diferente en cada dibujo. Los límites han sido escogidos de manera que el mínimo sea la primera marca, y la quinta marca sea tres veces el valor inicial. Los gráficos individuales con errores se pueden consultar en <http://guaix.fis.ucm.es/evolucionconsumo>

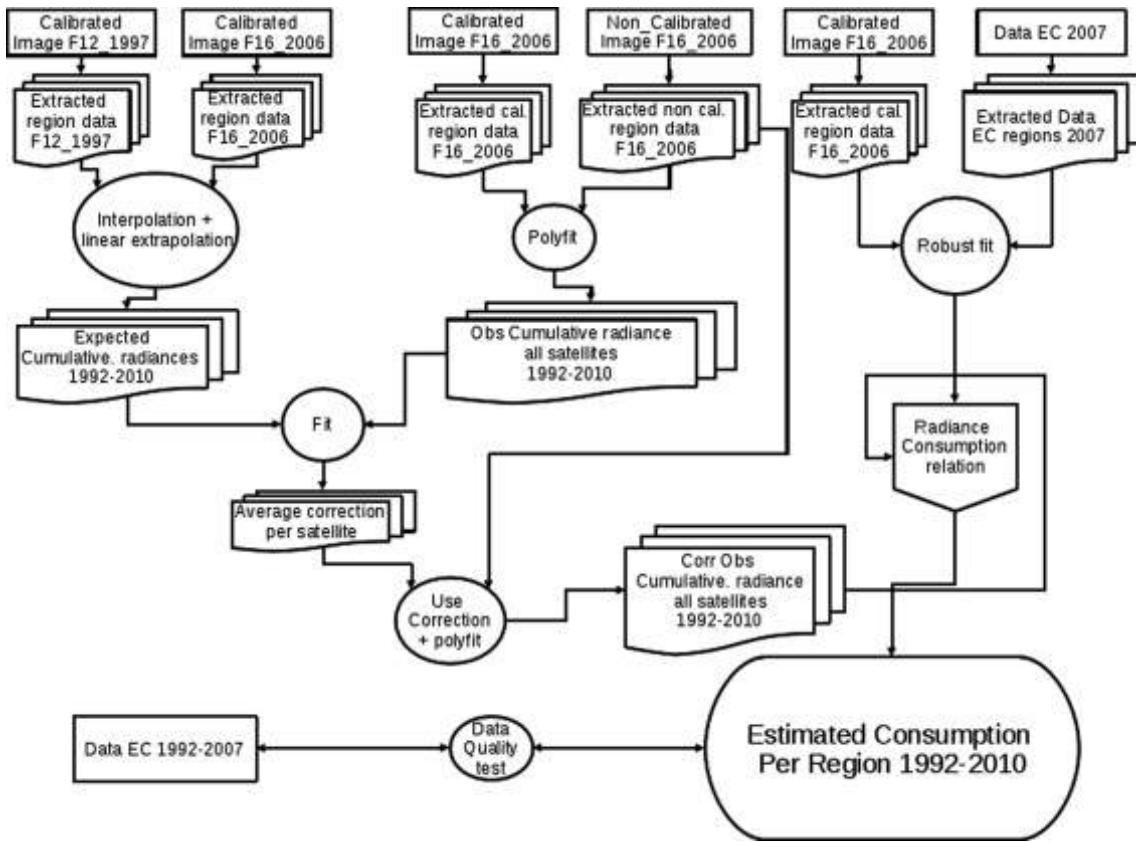


Figura 2.12: Procedimiento de calibración. Rama derecha arriba: Relación entre el flujo integrado proveniente de la imágenes calibrada F16_2006 y la energía consumida en 2007 para cada región. Rama central arriba: Relación entre la imagen calibrada F16_2006 y la misma imagen sin calibrar. Aplicamos esta relación a todas las imágenes sin calibrar. Rama izquierda arriba: Crecimiento estimado entre 1992 y 2010 usando los datos de 1997-97 y 2006. Ajuste en rama central y rama izquierda corregido por los efectos sistemáticos de cada satélite. Una vez corregidos los datos originales no calibrados, usamos la relación entre los datos calibrados y no calibrados de la rama derecha. De esta manera obtenemos una estimación de la energía consumida. A continuación comparamos los resultados con las estadísticas oficiales

atípicos (fig. 2.3). La relación población-radiancia es también buena con muchos valores atípicos en común con la relación anterior. Si se excluyen estos atípicos y se realiza un ajuste lineal se encuentra que es compatible con lo publicado por Elvidge et al. (1999), corrigiendo los datos de consumo eléctrico total y suponiendo que el de alumbrado es aproximadamente el 1.77% del consumo eléctrico total, que es aproximadamente lo que ocurre en España (y de la diferente

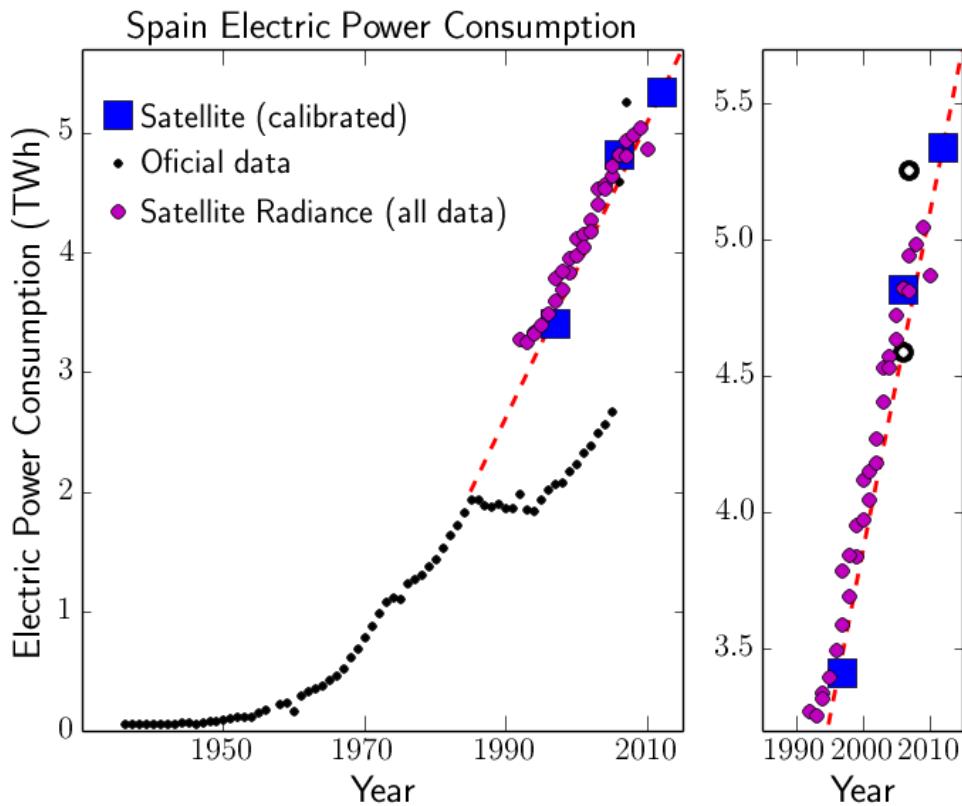


Figura 2.13: Evolución del consumo eléctrico en alumbrado público en España. Los datos oficiales son los puntos negros (sólidos o huecos). Puntos magenta, la estimación a partir de imágenes no calibradas. Cuadrados azules, 1996-1997 DMSP, 2006 DMSP, 2012 VIIRS en pruebas. A la derecha detalle de la figura.

eficiencia de sus lámparas). Una vez determinada esta relación, se aplica a los datos de radiancias estimadas calculadas en la sección anterior y a los datos calibrados de 1997 DMSP-OLS, 2012 (SUOMI-NPP/VIIRS) y se obtiene una estimación independiente del gasto en alumbrado público para cada provincia española. En la figura 2.12 muestra de manera esquemática el procedimiento completo de calibración.

Gasto económico en alumbrado público en España

Una vez que tenemos una estimación del consumo energético, es posible a través de las tarifas eléctricas realizar una estimación del gasto realizado. En particular, en España el precio de la electricidad estuvo regulado hasta 2006 para el alumbrado público. A partir de ese momento, se abrió al mercado la liberalización de los precios, haciendo mucho más complicada su estimación. Como primera aproximación se han utilizado como referencia los municipios de

Valencia(1991-2012) y Madrid(2014) por ser algunos de los mayores consumidores y, por tanto, mejor capacidad de negociación. En la figura 2.14 podemos observar cómo a partir de la liberalización el gasto económico doblándose en tan solo 4 años. En gran medida esto ha provocado la congelación del crecimiento en la emisión. La aplicación en 2009 del decreto de eficiencia energética en alumbrado público es también uno de los factores que ha podido provocar esta deceleración, así como la crisis económica.

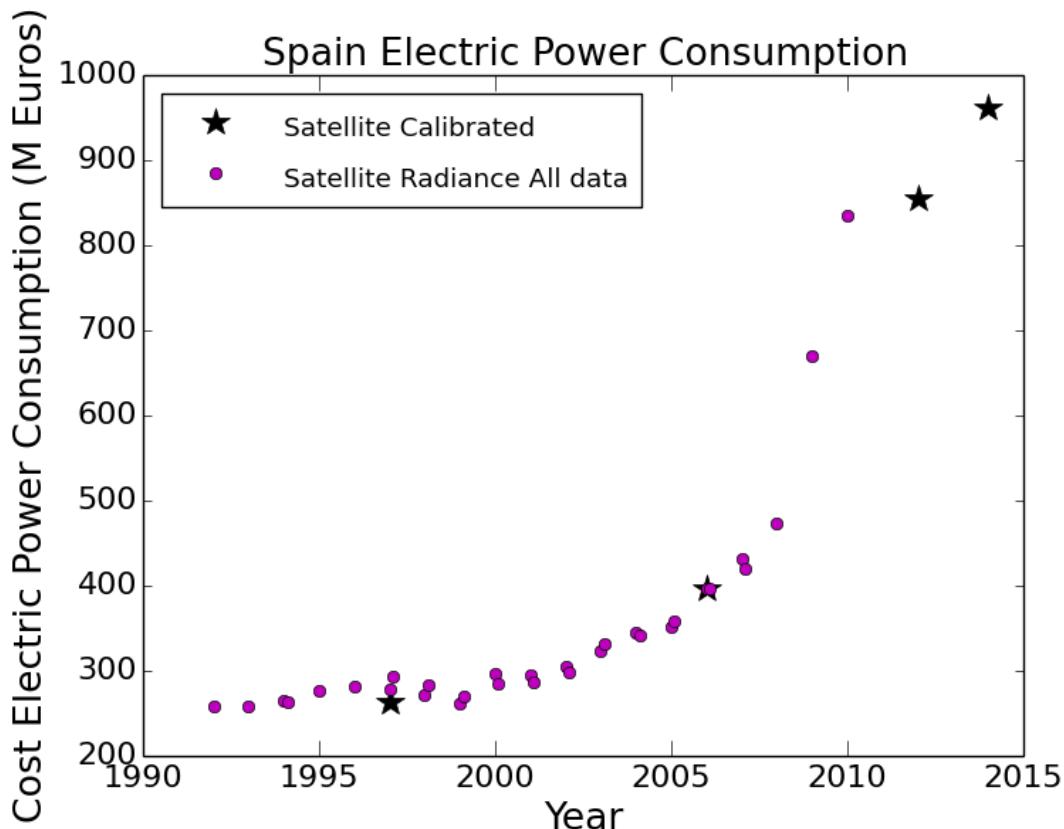


Figura 2.14: Evolución del gasto eléctrico en alumbrado público en España (euros corrientes). Puntos magenta, la estimación a partir de imágenes no calibradas. Estrellas negras, 1996-1997 DMSP, 2006 DMSP, 2012 y 2014 VIIRS en pruebas. Los datos hasta 2012 corresponden a Sánchez de Miguel et al. (2014c) y 2014 a la sección ??.

Análisis de los resultados

Se aprecia un mejor ajuste con la tendencia de la evolución del gasto en alumbrado público en las provincias de menor población como Soria, Ávila, Cantabria, Burgos, Huesca ... (ver figuras 2.11) en las cuales no existen errores evidentes en las estadísticas de consumo en alumbrado

público. En otras, las más grandes, sólo coinciden los valores para los últimos años (2006, 2007 y quizás alguno anterior). Esto se debe a los cambios de tarifa de los municipios más grandes de dichas provincias. En algunas regiones parece que la evolución del consumo estimado y de las estadísticas van a la par pero con un pequeño desplazamiento. Esto puede ser debido a diversas circunstancias: falta de información en las estadísticas (omisión de municipios importantes, como se ha comentado anteriormente), peculiaridades locales (diseños de luminarias especiales o uso de lámparas con eficiencias diferentes) o a errores en las calibraciones empíricas.

Con los datos de que disponemos no es posible en este momento discernir entre los diversos escenarios. Un estudio más detallado en progreso se está realizando sobre la ciudad de Madrid usando datos de la ISS-D3s, SUOMI-NPP/VIIRS y DMSP-OLS. Para algunas de las provincias con más población no se dispone de mejores datos por parte del Ministerio correspondiente pero sí existen datos adicionales procedentes de las comunidades autónomas o de los ayuntamientos más importantes de esas provincias (véase estadísticas de Ayuntamiento de Madrid; Comunidad de Madrid (2013); Ayuntamiento de Valencia; Ayuntamiento de Barcelona). La composición de estos datos proporciona información complementaria de estas regiones, que en general suelen estar saturadas y por tanto son las que contribuyen de manera más notable a la contaminación lumínica a largas distancias.

Lo más importante es la constatación de que el gasto en alumbrado público esta directamente relacionado con la emisión visible desde satélite y que el gasto eléctrico en alumbrado público puede ser usado como referencia para la intercalibración de imágenes DMSP y otras (Sánchez de Miguel et al. 2014c). Sin embargo, como se verá también en esta sección, se debe actuar con cautela al usar estos datos ya que el satélite DMSP y SNPP no son sensibles a las diferentes tecnologías de iluminación.

2.3. Medidas VIIRS/DNB del satélite SUOMI/NPP

El satélite SUOMI-NPP (en adelante SNPP) y sus sucesores serán los sustitutos de los satélites DMSP. Uno de los instrumentos más potentes del satélite SNPP es VIIRS: una cámara multiespectral durante el día en visible e infrarrojo y durante la noche en el rango visible utiliza una banda pancromática similar en cobertura espectral a la del DMSP (0.5 a 0.9 μm). Simultáneamente se toman imágenes en bandas infrarrojas que sirven para la clasificación de fuentes de tipo térmico como las plumas de refinerías, incendios y extracciones petrolíferas entre otros. Este instrumento, a diferencia del DMSP/OLS, presenta una calibración fotométrica de los instrumentos. Las comparación entre el DMSP/OLS y el SNPP/VIIRS/DNB puede verse en la tabla 2.1. El muestreo de las imágenes es de 15 arcsec, que corresponde a un tamaño de

pixel de 462 m en el ecuador, mientras la resolución⁶ es de $\sim 750m$, por lo que la PSF abarca poco más de un pixel. Dentro de las especificaciones del instrumento se espera que sea capaz de proporcionar imágenes calibradas fotométricamente con una precisión de un 15 %.

A fecha del cierre del trabajo original de esta tesis, existían 5 mosaicos de toda la Tierra hechos con VIIRS: cuatro de estos mosaicos corresponden a datos promediados en un mismo mes (abril 2012, octubre 2012, enero 2013 y mayo 2014) y uno de ellos a promedio de dos meses (abril 2012 y octubre 2012). Estos productos preliminares están en desarrollo y presentan aún problemas, si bien, constituyen los productos de más calidad disponibles en este momento como exploración nocturna de toda la Tierra en una sola banda pancromática. Estos productos han sido producidos mediante pasos del satélite en que se hace por barrido de la superficie terrestre con un ancho de 3.000 km a los lados del nadir. Sólo se utilizan datos no contaminados por la luz lunar, por lo que se restringe a 10 días al mes los disponibles para el mapeado. En determinadas regiones, la meteorología impide tener muchos pasos para la realización del promediado. En la actualidad se está comenzando a publicar un mosaico de manera mensual.

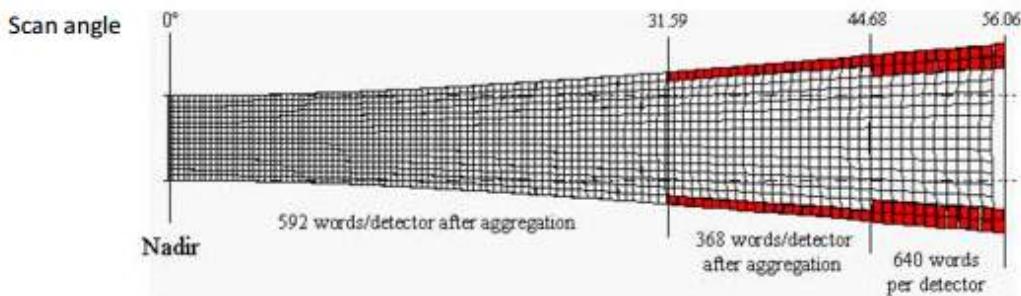


Figura 2.15: Footprint de VIIRS/DNB. Fuente: Beginner Guide to VIIRS Imagery Data

El campo de visión del instrumento (FOV, en adelante) es de 120° , esto produce que el ángulo de visión en las partes más extremas se puedan observar calles con un ángulo de hasta 60° con respecto a la vertical (véase fig. 2.15 y fig. 2.16). Esto puede producir que en áreas de alta densidad de población con edificios de 6 alturas (aprox 18 m) y calles relativamente estrechas (7 m), estas sean invisibles o se ven altamente apantallados por los edificios y árboles. Este efecto es difícil de observar en las imágenes de VIIRS/DNB debido a su baja resolución y a que los productos son el promedio de varias imágenes, pero es evidente en las imágenes de alta resolución obtenidas desde la ISS. En parte, para los nuevos mosaicos, se ha restringido el

⁶Criterio de Rayleigh

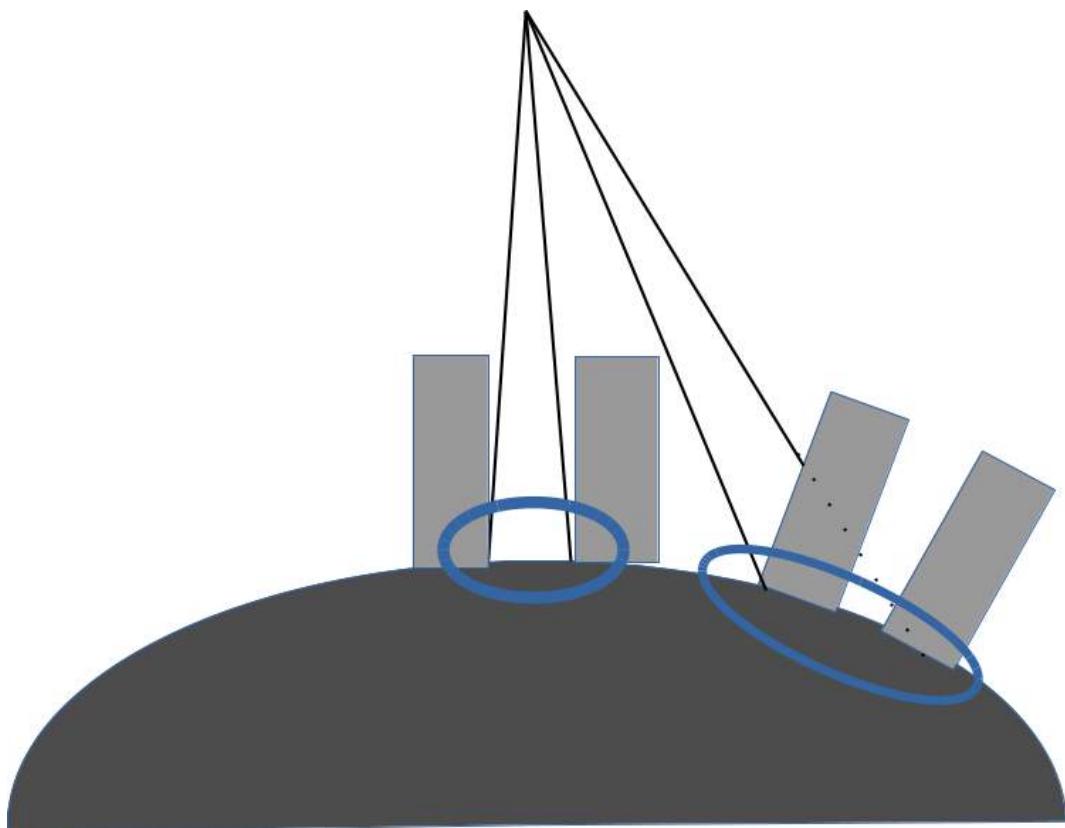


Figura 2.16: Geometría de la observación de VIIRS/DNB para el caso de ángulos pronunciados. En observaciones cercanas al nadir los edificios no bloquean la calle, en cambio para grandes ángulos la calle puede ser invisible al satélite.

rango de datos útiles a 56° ⁷.

Conviene recordar que la órbita polar es equi horaria de forma que el satélite pasa siempre aproximadamente a la misma hora ($\sim 1 : 30$ hora solar). Sin embargo al ser el FOV tan ancho, en un extremo del campo de visión se puede estar observando dos o hasta tres husos horarios diferentes. La iluminación de las calles, actualmente es prácticamente constante toda la noche⁸, pero la luz ornamental puede variar fuertemente. Estos dos efectos, la falta de imágenes y el apantallamiento en los bordes puede explicar en parte las grandes diferencias que se observan al comparar algunos de los mosaicos del VIIRS.

Otros problemas que se encuentran son las estructuras en las imágenes que aparecen debido a efectos puramente instrumentales que están siendo corregidos (Mills & Miller 2014; Shao

⁷Kim Baugh, mayo 2015 comunicación privada.

⁸Esta situación va a cambiar los próximos años, un ejemplo es el Protocolo de pruebas de “Luminarias LED” de Alumbrado exterior del Ayuntamiento de Madrid, que contempla diferentes intensidades antes y después de las 24:00. <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Obras y Espacios/Varios/ProtoPruebLuminarias-LedAlumExterio14-05-2014.pdf>

et al. 2014). Se espera que cuando los mosaicos se realicen con un intervalo temporal mayor y por tanto una mejor base estadística, estos problemas se solucionen. Por el momento, los cambios que observamos son de hasta un 30 % más en flujo de un mosaico a otro en ciudades, por ejemplo Madrid. En la figura 2.17 y la tabla 2.2 puede verse el cociente en flujo para la misma región con respecto a la imagen de abril 2012 y se aprecia que ese cociente se conserva aproximadamente en toda la región. Sin embargo, se aprecia en la figura 2.18 que esta relación no es constante en toda la imagen y que la variación es de sentido opuesto en la Europa del Este. Parte de la diferencia puede ser real, ya que en enero suele haber nieve que refleja más luz, pero eso no debería ocurrir en lugares como Madrid en donde no hay nieve en la ciudad de manera habitual y debido a la falta de follaje en los árboles la emisión es mayor en enero que en mayo. Este detalle se abordará cuidadosamente en la sección 6.4.

Imagen	Corona	Región	δ Corona	δ Región
Abril 2012	4.34E+05	1.94E+05	100.00 %	100.00 %
Octubre 2012	4.33E+05	2.05E+05	99.75 %	105.61 %
Enero 2013	3.11E+05	1.51E+05	71.61 %	77.51 %
Mayo 2014	4.48E+05	2.02E+05	103.31 %	103.81 %

Tabla 2.2: Medida de la radiancia acumulada ($nW/cm^2/sr$) medida por VIIRS para Madrid para Abril 2012, Octubre 2012, Enero 2013 y Mayo 2014. Los círculos verdes de la figura 2.17 indican las regiones de corona y región exterior.

Sin embargo, para regiones concretas de hasta 1.000 km (por debajo del ancho de las pasadas de VIIRS de 3.000 km) se puede utilizarse los datos de manera relativa, ya que la falta de saturación y linealidad del sistema lo hacen mucho más recomendable, aun hoy sin terminar de calibrar, que los datos del DMSP/OLS.

2.3.1. Fotometría e intercalibración VIIRS/DNB y otros sensores

El cálculo fotométrico de cuerpos negros difiere de manera muy importante del de fuentes de emisión dominadas por líneas de emisión. Esto es si cabe más importante cuando se desconoce a priori el tipo de fuente. Para detectar las fuentes térmicas se utilizan bandas infrarrojas en DMSP/OLS, pero estas técnicas han sido mejoradas con las imágenes multiespectrales de VIIRS (Elvidge et al. 2013; Zhizhin et al. 2013). Esto nos permite descartar la presencia de fuegos y cuerpos negros de temperaturas de entre 600 K y 6000 K. Sin embargo, las lámparas de descarga dominan la emisión en el alumbrado público de Europa y América. En Elvidge et al. (2010) se describe un grupo amplio de otras fuentes de emisión como lámparas de aceite

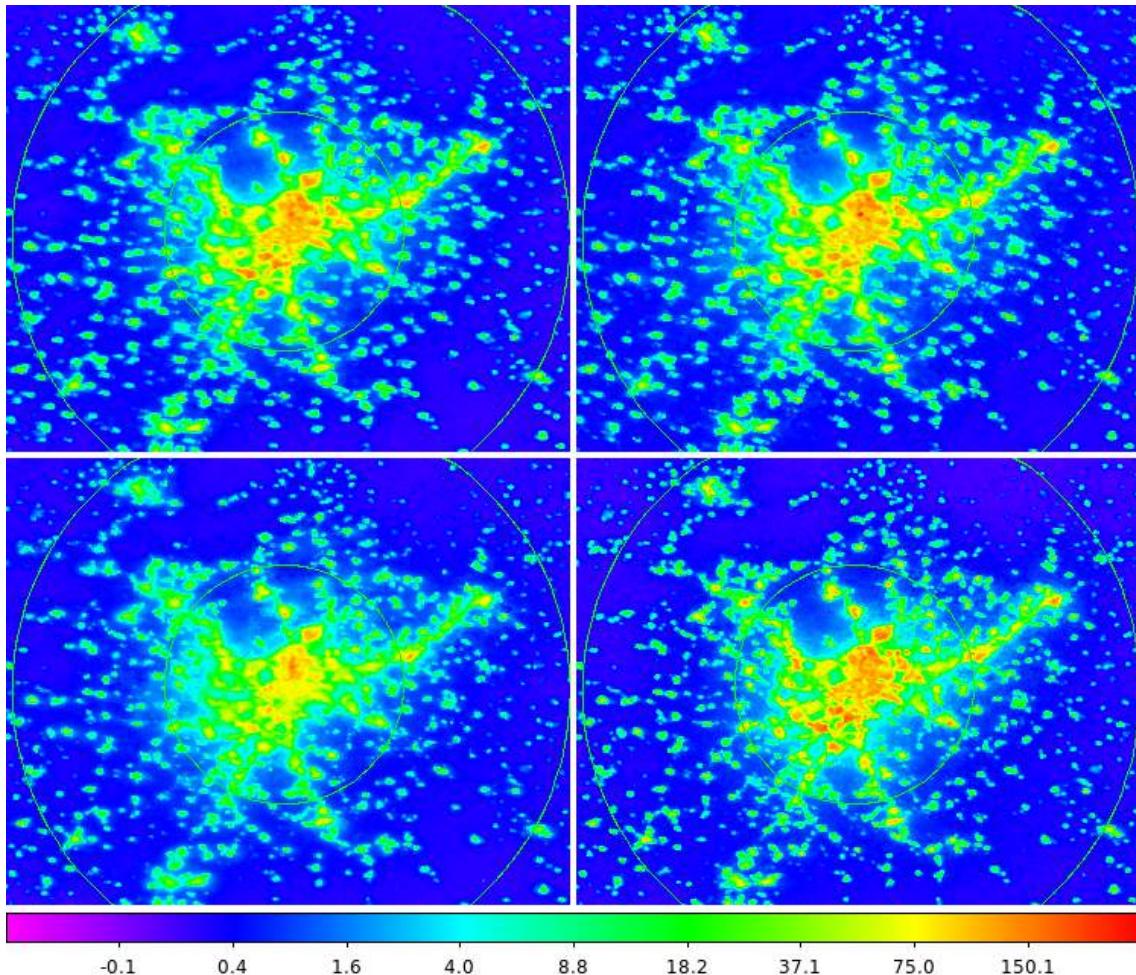


Figura 2.17: Imágenes VIIRS/DNB de Madrid para Abril 2012, Octubre 2012, Enero 2013 y Mayo 2014 (ordenadas de derecha a izquierda y de arriba abajo cronológicamente). Los círculos verdes indican las regiones de corona y región de la tabla 2.2. La escala de color indica la radiancia en $nW/cm^2/sr$.

o de citronella, o incandescentes. En ese mismo artículo se discute cómo de manera visual en las imágenes multiespectrales de la ISS se puede estimar el tipo de lámpara que se utiliza. De esta manera, bien por inspección visual de imágenes multiespectrales o bien por conocimientos previos (inventarios de luminarias etc. por ejemplo Aubé & Kocifaj (2012)) puede utilizar los datos de VIIRS/DNB para estimar el flujo real que detectaría en bandas multiespectrales. Para ello es necesario suponer el espectro de la fuente y corregir mediante la respuesta de VIIRS con la del espectro de la misma, para tener en cuenta el efecto diferencial de la respuesta del detector a la diferentes fuentes longitudes de onda.

Esta técnica de fotometría sintética nos permite predecir los flujos que tendría una determinada fuente observada con otros instrumentos (descrita con más detalle en la sección 3.4.5).

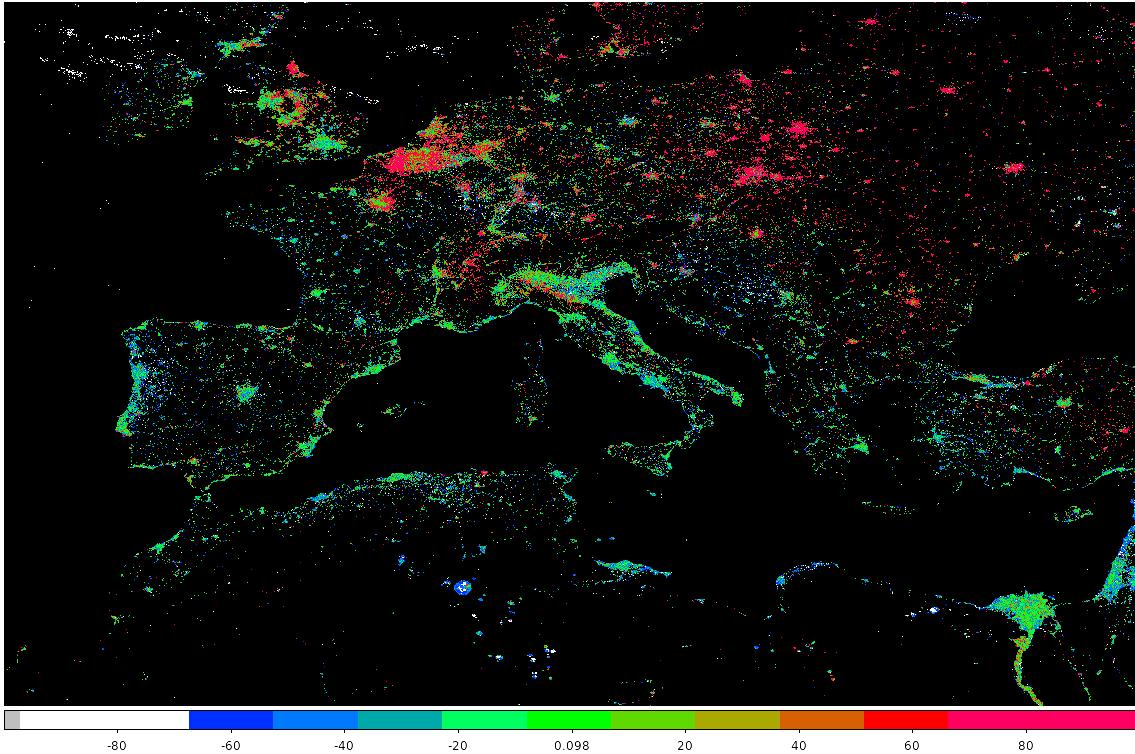


Figura 2.18: Variación en porcentaje de la radiancia estimada por VIIRS/DNB en las imágenes de 2013 y 2014, con respecto a la de 2014. Se aprecian mayores radiancias en la imagen de 2013 en el este de Europa. Radiancias inferiores a $1nW/cm^2/sr$, enmascaradas en negro.

Para este cálculo se ha utilizado la respuesta espectral de VIIRS/DNB predicha para la órbita 6557 (Liao et al. 2013). Las respuestas de la Nikon D3/D3S son las calculadas para este trabajo y para el DMSP/OLS Elvidge et al. (1999). Las lámparas estudiadas son LPS (*Low Pressure Sodium*), HPS (*High Pressure Sodium*), MV (*Mercury Vapor*), CFC (*Compact Fluorescent*) y CMH (*Ceramic Metal Halide*), pertenecen a la galería de espectros de C. Tapia et. al. 2015. El flujo⁹ ha sido calculado como describe Fukugita et al. (1995) y el cálculo de flujo de la manera estándar usando magnitudes AB¹⁰. En la tabla 2.3 podemos ver como tomando como referencia el flujo medido en VIIRS/DNB, los flujos esperados en DMSP/OLS son muy similares, no excediendo la diferencias en más de un 10 %. Teniendo en cuenta que para los datos de DMSP/OLS no se dispone estimación del error y los de VIIRS/DNB son del 15 % (1σ) este efecto es despreciable para las lámparas estudiadas.

Además de las bandas del VIIRS/DNB y DMSP/OLS, otras bandas de observación co-

⁹Entiendase flujo siempre como densidad de flujo espectral

¹⁰La unidades de flujo utilizadas son $W/cm^2/sr/\text{\AA}$

Espectro	ISS-D3S					VIIRS	DMSP	SQM
	B	G	R	B/G	G/R			
LPS	0.04	0.95	4.10	0.04	0.23	1.00	0.94	0.71
HPS-1	0.21	0.88	2.03	0.24	0.43	1.00	0.92	0.66
HPS-Cocheras	0.21	1.06	2.72	0.20	0.39	1.00	0.95	0.76
HPS-Maja	0.09	1.09	2.62	0.08	0.41	1.00	0.93	0.72
HPS-Calle	0.11	0.98	2.64	0.12	0.37	1.00	0.92	0.70
HPS-Cocheras2	0.23	0.84	2.16	0.27	0.39	1.00	0.93	0.66
MV vieja	0.34	0.88	1.09	0.38	0.80	1.00	0.93	0.64
MV	0.36	1.58	1.76	0.23	0.90	1.00	0.94	0.99
MV nueva	0.43	1.10	1.16	0.39	0.95	1.00	0.94	0.78
CFC	0.27	1.33	2.09	0.20	0.64	1.00	0.95	0.85
CMH	0.58	1.48	1.71	0.39	0.86	1.00	0.99	0.96

Tabla 2.3: Correcciones de flujo integrado para la banda correspondiente, para diferentes espectros tipo. Se ha usado como referencia los datos de VIIRS.

munes en estudios de contaminación lumínica son la del dispositivo SQM, del que hablaremos profusamente en la sección 6.2.1, y los canales RGB de las cámaras reflex digitales NIKON D3S, que estudiaremos en la sección 3.3.2.

Se observa claramente que dentro de las lámparas HPS y MV hay diferencias importantes de hasta el 50% debido a la edad o al modelo en el canal B, si bien HPS es bastante estable para el canal G, no así en el canal G las MV. Se aprecia también, que las diferencias entre el DMSP/OLS y VIIRS/DNB son pequeñas y rondan el 5-8%. No así con los SQM que puede haber grandes diferencias de 5-35 % entre una lámpara y otra. Esto es debido a la gran diferencia entre las respuestas espectrales de uno y otro. El hecho de que estas relaciones se mantengan, solo modificadas por la absorción atmosférica, nos permite usar los datos de VIIRS/DNB como referencia para la verificación de las calibraciones con otros instrumentos.

Además de tener en cuenta la importancia de la diferente respuestapectral de los instrumentos, se tiene que considerar también las diferentes unidades de medida en que se dan algunos resultados¹¹. En este trabajo se ha utilizado los datos del DMSP/OLS en unidades de flujo por longitud de onda tal y como describía el EOG¹². Sin embargo, el criterio actual es dar

¹¹Al ser un campo interdisciplinar en el que trabajan biólogos, ingenieros, estudiosos de ciencias sociales y físicos, son comunes las discusiones sobre la idoneidad del uso de unidades con base física para la comunicación de resultados.

¹²https://web.archive.org/web/20130401183205/http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/download_

la información en banda integrada, por lo que para realizar una comparación con estos datos es necesario corregir del ancho de la banda. En la figura 2.19 se puede ver el resultado de aplicar la corrección calculada en 1.46, necesaria para compensar la diferentes unidades utilizadas de manera estandar en los datos del DMSP ($nW/cm^2/sr/um$) y en VIIRS ($nW/cm^2/sr$). Una pista sobre la fuente del cambio de pendiente en la figura 2.19 puede ser el cambio de ganancia para la realización del mosaico de alto rango dinámico¹³ de DMSP/OLS calibrado en ganancia (Ziskin et al. 2010). Otra explicación puede ser que dado que las regiones más pobladas tiene gran parte de alumbrado ornamental que se apaga a altas horas de la noche, esas regiones sean más oscuras en VIIRS/DNB y menos en el DMSP/OLS.

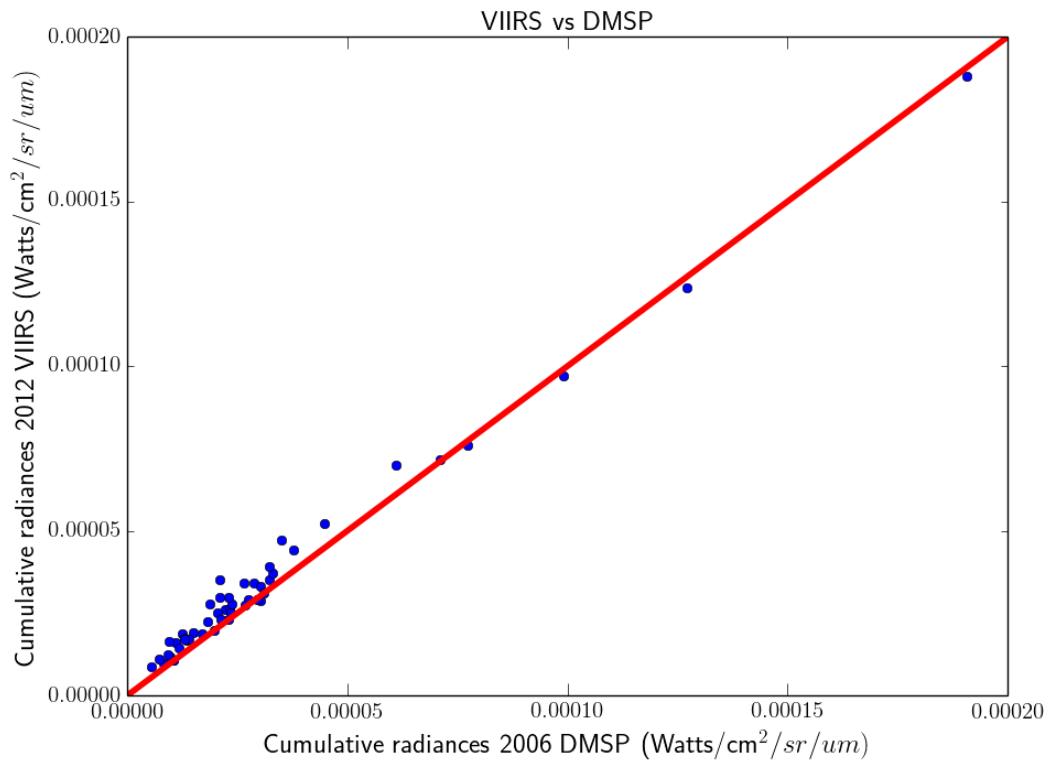


Figura 2.19: Comparación de los flujos del DMSP 2006 calibrados frente a los datos corregidos de VIIRS 2012 (bimensual). Esta corrección corresponde al factor de 1.46 necesario para que ambos flujos sean coherentes con los datos de la tabla 2.3 y es necesaria para unificar las unidades de ambos conjuntos de datos, ya que el de VIIRS/DNB proporciona actualmente datos en banda completa y no en flujo por micra como DMSP/OLS.

2.3.2. Aplicaciones

La medida de la fotometría de las imágenes VIIRS/DNB puede ser utilizada para la estimación de gasto en alumbrado público. En este sección mostramos dos aplicaciones, una a macro escala y otra a micro escala.

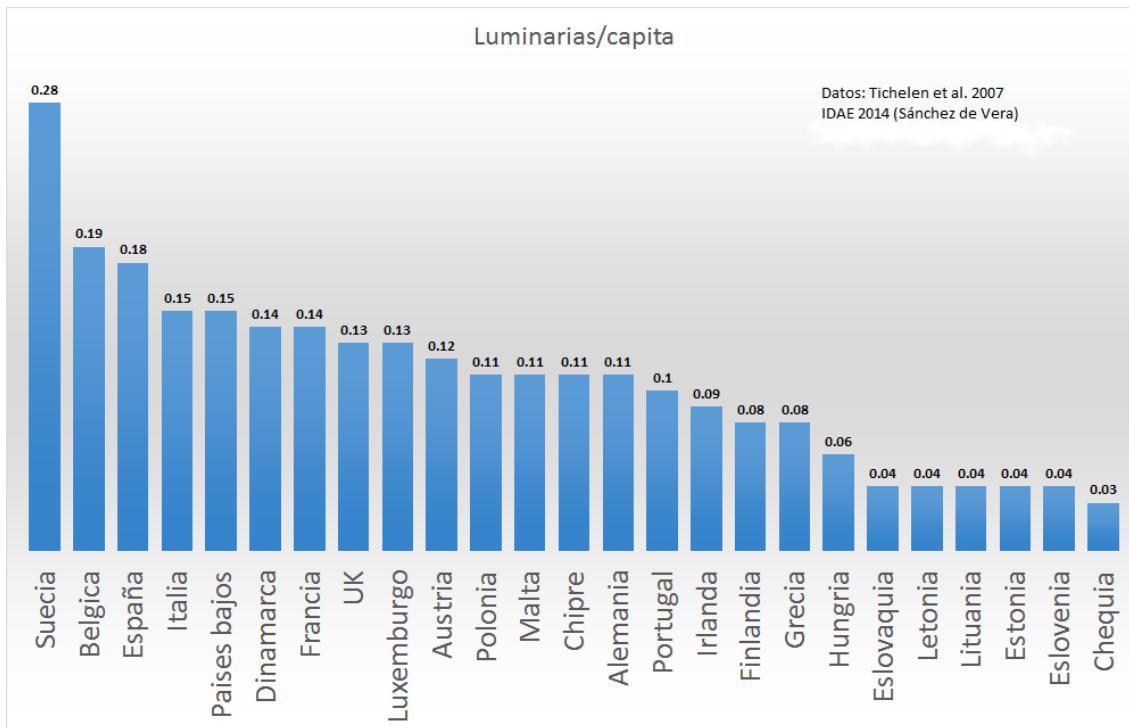


Figura 2.20: Tasa de luminarias per capita. El dato de la cantidad de luminarias proviene de Van Tichelen et al. (2007), menos los de España que provienen del IDAE de Vera Quintero (2014), debido a que los datos de España en Van Tichelen et al. (2007) son incorrectos según de Vera Quintero (2014).

Estimación del gasto en alumbrado público en Europa

El gasto en alumbrado público es uno de las partidas de gasto energético más importantes dependientes de la administración, por ejemplo según el libro de la Energía 2004 (MITYC 2005), supone al menos el 50% del gasto energético de los ayuntamientos. Como se ha demostrado en la sección 2.13, los datos del ministerio eran incorrectos y ese porcentaje podría llegar hasta el 75%. Debido a la importancia de este sector, la Comisión Europea encargó un informe sobre el sector en Europa (Van Tichelen et al. 2007). En nuestros trabajos analizamos las implicaciones de ese trabajo para España y el contexto europeo (Sánchez de Miguel 2007; Sánchez de Miguel & Zamorano 2010).

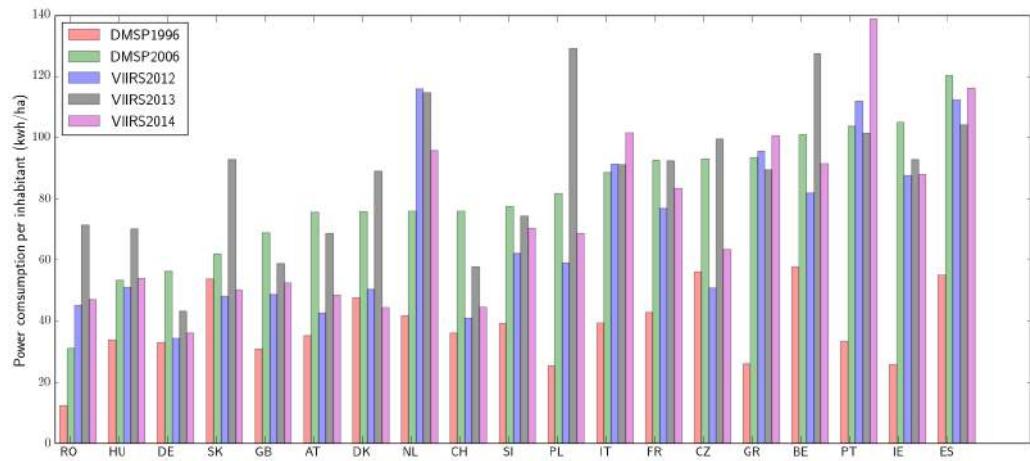


Figura 2.21: Tasa de consumo por habitante estimado usando los datos de Sánchez de Miguel et al. (2014c) y las imágenes de DMS/OLS y VIIRS/DNB. Más detalle en el texto.

Como continuación de los trabajos realizados, se ha procedido a la extrapolación de los resultados de España al resto de la Unión Europea. Para realizar esta extrapolación es necesario corregir del efecto de proyección multiplicando la radiancia de cada pixel por su área real dividido por el área de un pixel en el ecuador. Dado que la proyección de los datos es equiangular, cada pixel subtende el mismo área en grados, pero no en área que es la unidad utilizada. Una vez corregido este efecto corremos una rutina desarrollada por José Gómez Castaño para el recorte de los países de la misma manera que se hizo con las provincias en el caso de España. En esta estimación se realizan varias suposiciones. La primera que todos los países tienen una mayoría de alumbrado público dominado por lámparas de alta presión de sodio como España. Es sabido que esto no es así por Van Tichelen et al. (2007), pero las lámparas de alta presión de sodio son las más eficientes del mercado, por lo que en cualquier caso esta estimación es conservadora. En segundo lugar, para los países que no se disponía de datos se ha establecido un consumo de 75 kWh, ya que es la media de la UE. En tercer lugar se ha establecido un coste de la energía común basado en la información del Ayuntamiento de Madrid¹⁴ para aquellos países con coste de la energía en los hogares es mayor de ese valor según Eurostat¹⁵, en caso contrario se ha usado el valor del precio de la energía en los hogares. Se ha usado como fuente de la población

¹⁴Coste energía eléctrica estimado: 0,18 €/kWh <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Obras y Espacios/Varios/ProtoPruebLuminarias-LedAlumExterio14-05-2014.pdf>

¹⁵[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electricity_prices_for_household_consumers,_first_half_2013_\(1\)_\(_EUR_per_kWh\)_YB14.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electricity_prices_for_household_consumers,_first_half_2013_(1)_(_EUR_per_kWh)_YB14.png)

la proyección uniforme realizada por Wikipedia¹⁶.

El gasto total es ~ 6.300 millones de euros anuales. Para poner en contexto, la inversión en la Agencia Espacial Europea (ESA) fue de ~ 4.300 millones de euros en 2013. Se puede ver el detalle del gasto por países en la tabla 2.4. Hay que señalar que para el caso de los Países Bajos, la contribución de los invernaderos a la radiancia total es muy significativa, por lo que los datos de VIIRS/DNB no son fiables a la hora de estimar el gasto en alumbrado público. No así los del DMSP/OLS, esto se debe a que los invernaderos están tapados la primera parte de la noche. Estos invernaderos están localizados en un lugar con pocas horas de luz solar, suplen esa falta de luz natural mediante lámparas que proporcionan hasta 70.000 lux¹⁸. Debido a que el resplandor molesta a los vecinos, esta luz se ve reducida en un 98% debido a las cortinas obligatorias. Sin embargo, en la segunda parte de la noche se permite quitar las cortinas para evitar el sobrecalentamiento de los invernaderos. Por tanto, en la figura 2.21 se observa un claro exceso en los Países Bajos en las imágenes de VIIRS/DNB (tomadas a media noche), no así en las del DMSP/OLS (tomadas al atardecer). Además de este exceso, hay que tener en cuenta los excesos debido a la cobertura de nieve en la imagen de enero de 2013 y a algunos errores puntuales como el de la región de Portugal en mayo 2014.

Por comparación, se ha añadido la estimación del número de luminarias por habitante (Figura 2.20), actualizando los trabajos previos. Se observa que ambos datos son coherentes y por ejemplo España destaca en ambas estadísticas. Todo esto indica que España es el país con mayor gasto por habitante de la UE, si bien, no es posible obtener estimaciones fiables de los países nórdicos. Una de las causas será el exceso de farolas por habitante, solo superados por Suecia y por Bélgica, un país que hasta hace muy poco iluminaba todas sus autopistas¹⁹. Los datos de esta sección son coherentes con las publicadas por ECHELEON²⁰ y Martin Morgan Taylor en Meier et al. (2014) sin describir metodología de cálculo alguna. El impacto en emisiones de CO_2 es de 44 millones de toneladas anuales, que es el 1.2% del total de emisiones de la UE, o al equivalente a todas las emisiones de un país como Irlanda.

Llama la atención que dentro de los países con mayor gasto por habitante, en los primeros puestos están los países que han tenido durante estos años mayor prima de riesgo. Existe una conocida relación entre las emisiones de satélite y el producto interior bruto de un país (Elvidge

¹⁶ http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Pa%C3%ADses_de_la_Uni%C3%B3n_Europea_por_poblaci%C3%B3n, fecha 25/11/2014.

¹⁸ <http://www.hortidaily.com/article/1582/Netherlands-The-more-assimilation-lights,-the-more-problems>

¹⁹ http://elpais.com/elpais/2012/09/27/opinion/1348771078_077030.html

²⁰ Estiman un gasto de energía en más de 450 TWh, evidentemente es un error ya que todos los cálculos cuadran con 45TWh http://www.echelon.com/support/documentation/papers/EchelonCorporation_StreetlightWhitepaper.pdf

País	Población ¹⁷	Gasto (kWh/ha)	Coste (M€)	Cosumo TWh
Alemania	81.037.000	48 ± 9	700 ± 300	3.89 ± 0.73
Reino Unido	64.713.000	60 ± 10	621 ± 200	3.88 ± 0.65
Francia	64.228.000	87.5 ± 3	843 ± 500	5.62 ± 0.16
Italia	60.925.000	90	987	5.48
España	46.354.000	114 ± 2	955 ± 300	5.31 ± 0.07
Polonia	38.519.000	80	462	3.08
Rumanía	19.852.000	45	118	0.89
Países Bajos	16.892.000	75	228	1.27
Bélgica	11.241.000	92 ± 8	190 ± 30	1.04 ± 0.08
Grecia	10.775.000	95	154	1.02
República Checa	10.515.000	77 ± 13	150 ± 50	0.81 ± 0.13
Portugal	10.339.000	105	195	1.09
Hungría	9.851.000	55	76	0.54
Suecia	9.757.000	75*	132	0.73
Austria	8.587.000	45	69.6	0.39
Bulgaria	7.205.000	75*	54.0	0.54
Dinamarca	5.662.000	75*	76.4	0.42
Finlandia	5.474.000	75*	61.6	0.41
Eslovaquia	5.423.000	60	52.5	0.41
Irlanda	4.622.000	90	74.9	0.35
Croacia	4.236.000	75*	44.5	0.32
Lituania	2.922.000	75*	30.7	0.22
Eslovenia	2.065.000	75*	23.9	0.15
Letonia	1.987.000	75*	22.4	0.15
Estonia	1.327.000	75*	13.9	0.0995
Chipre	874.000	75*	11.8	0.0000656
Luxemburgo	563.000	75*	6.76	0.0000422
Malta	424.000	75*	5.09	0.0000318
Unión Europea	506.369.000		6300 ± 613	38.12 ± 1.82

Tabla 2.4: Gasto económico y energético de los países de la Unión Europea a fecha de 1/1/2015 utilizando coste de energía del Ayuntamiento de Madrid y Eurostat. Fuente de los datos de población Wikipedia. La estimación realizada por Martin Morgan Taylor en Meier et al. (2014) con un consumo medio de 90 kWh por habitante sin citar fuentes, con un resultado de exceso de gasto de 5.2 M€ . Sin embargo, usa una población incorrecta para la UE. El gasto en alumbrado público sería de 5.0 M€ con la población correcta. *Sin datos, media europea 75 kWh/ha/año.

et al. 1997c; Wu et al. 2013). Sin embargo, esta relación no es clara aun, y ya que no hay una relación física entre la iluminación y el crecimiento económico²¹, pero sí la hay entre el consumo de electricidad y la emisión de las lámparas y su posible detección desde satélite. Las peculiares formas de iluminar en diferentes países es algo asumido por los diversos autores que estudian la sociología de la iluminación y su conexión con el gasto eléctrico (Ghosh et al. 2013). En el caso que nos ocupa, quizás estemos ante un caso anticíclico no contemplado en Elvidge et al. (2014). Sin embargo, para comprobar este punto es necesario disponer de una base temporal mayor y realizar un análisis no sesgado, ya que los actuales intercalibraciones de Elvidge et. al. están sesgados al suponer que su referencia principal, Sicilia, no ha incrementado su brillo, cuando hay evidencias de que este hecho no es así, según los datos oficiales, el consumo eléctrico en alumbrado público se ha incrementado en la región hasta un 22%.²².

Estimación de flujo emitido por los municipios del Delta del Ebro - Deltebre

La región de Deltebre es ideal para el estudio del potencial de los estudios locales realizados con datos de VIIRS/DNB. Esto se debe a que es una región en la que se están realizando diversas actuaciones de descontaminación lumínica por parte del Departament de Projectes d'Enginyeria de la UPC. Esto nos permite conocer el inventario de luminarias, consumo eléctrico y otras variables de interés de la región.

Se presentan las imágenes de los años 2012, 2013 y 2014 (fig. 2.23), a la misma escala de intensidad para que puedan ser visualmente comparadas, de la zona del Delta del Ebro. Se reproduce aquí la del año 2012 para señalar que las regiones marcadas en verde se corresponden a las zonas donde se han medido flujos.

La fotometría diferencial de estas regiones sirve para determinar diferencias de flujo lumínoso a lo largo del tiempo. Se han seleccionado puntos luminosos aislados para que su medida no se vea afectada por vecinos. Es fácil efectuar la correspondencia entre estos puntos y localidades de la zona. La región rectangular #15 se corresponde con el municipio de Deltebre. Una inspección visual muestra una disminución apreciable en el año 2014.

En la tabla 2.5 se muestran los valores obtenidos en las medidas (suma de valores en los pixeles dentro de la abertura). La figura 2.22 se muestra los valores para las diferentes regiones de forma que permite apreciar la variación en estos años. En el panel superior se grafican los valores en crudo, codificado en colores correspondientes a la época de la observación. En el panel central se han reescalado los valores asumiendo que la suma de los flujos de todas las regiones se ha mantenido constante y que las diferencias se deben a la calibración absoluta.

²¹De haberla sería una relación cultural, pero no física.

²²http://www.terna.it/default/Home/SISTEMA_ELETTRICO/statistiche/consumi_settore_merceologico/consumi_settore_merceologico_regioni.aspx

Región	2012	2013	2014
1	1565.9	1667.0	1739.9
2	495.4	617.2	611.5
3	1255.8	1547.4	1629.7
4	333.5	376.8	307.7
5	478.1	449.6	434.1
6	234.2	254.7	216.7
7	155.0	205.1	176.7
8	279.3	227.4	226.9
9	283.7	276.5	316.1
10	255.2	259.4	302.2
11	1090.1	1157.6	1171.8
12	353.3	420.7	363.4
13	601.3	760.6	691.1
14	246.2	270.9	127.9
15	1512.6	1575.8	943.6
16	404.8	600.1	517.8
17	434.9	475.7	464.1
18	236.8	244.7	256.8

Tabla 2.5: Medidas en las regiones marcadas en las imágenes

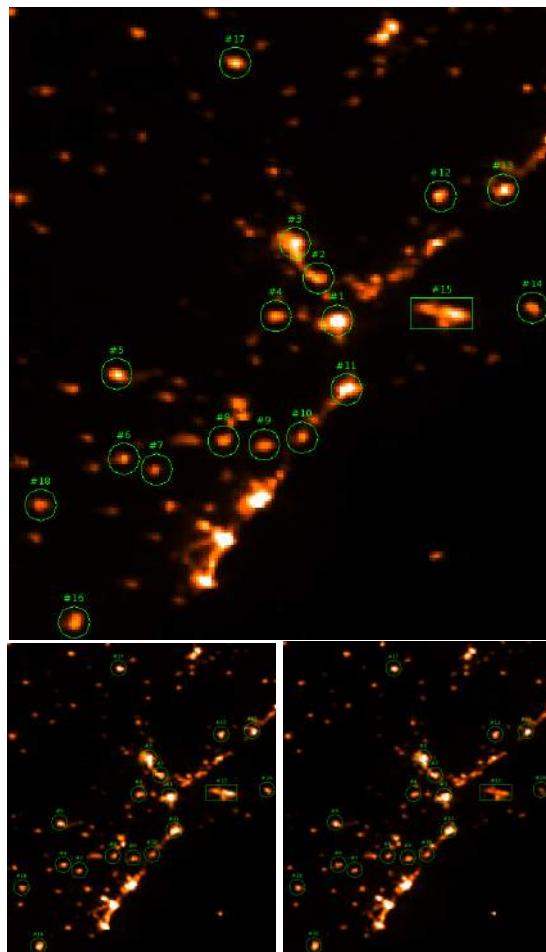


Figura 2.23: Imágenes VIIRS/DNB de la zona de estudio. Arriba la imagen de 2012, izquierda 2013 y derecha 2014.

Esto no es necesariamente cierto pero esperamos que los aumentos y disminuciones locales se cancelen en esta cuenta media. Las regiones #14 y #15 se han retirado en los cálculos de valores medios.

En la gráfica inferior se muestran las variaciones para cada región del año 2014 respecto a la media de los dos años anteriores. Mientras el resto de las regiones medidas muestran variaciones entorno a un 15 % (de crecimiento o disminución) las regiones #15 (Deltebre) y #14 (Riumar) presentan disminuciones del orden del 40 % y 50 % respectivamente. Por si se desea realizar un análisis más elaborado (retirando outliers, por ejemplo) se ofrece la tabla 2.5. Este análisis se realizó como comprobación observacional del modelo de predicción estadística elaborado por la UPC. Ambos, modelo y comprobación han sido incluidos en Estrada-García et al. (2015).

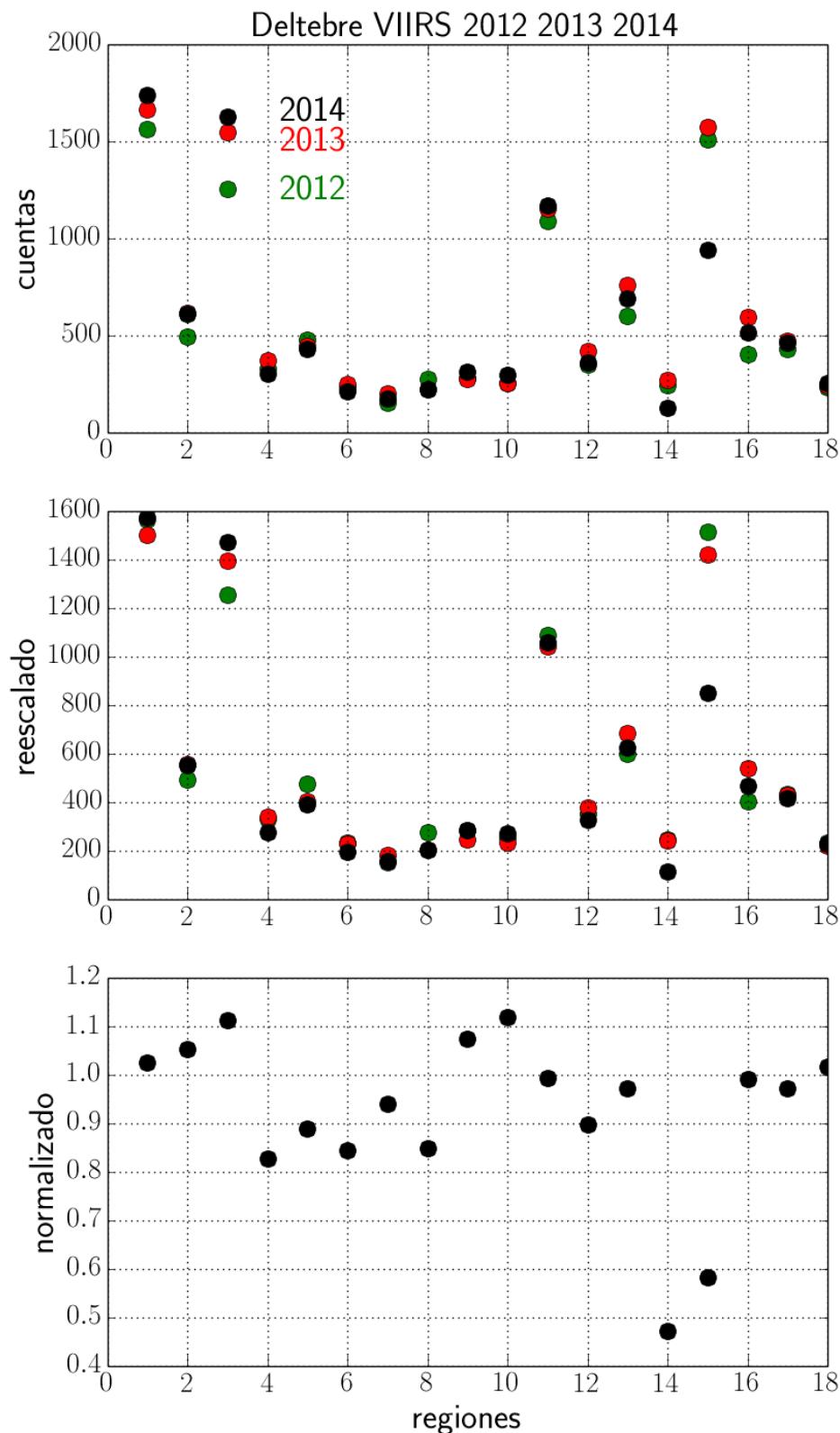


Figura 2.22: Fotometría de las regiones de Deltebre. Error teórico de VIIRS del 15 %.

2.4. Resultados

- Se ha demostrado que las bandas pancromáticas de los satélites VIIRS/DNB y DMSP/OLS proporcionan radiancias compatibles con sus errores instrumentales para los espectros de diferentes tipos de lámparas a pesar sus diferentes respuestas espectrales (tabla 2.3).
- Se ha comprobado que los datos de VIIRS/DNB presentan variaciones de hasta un 30 % en las radiancias no explicables por las circustancias locales. Por lo tanto los productos liberados hasta el momento deben ser utilizados con cautela (sección 2.3).
- Se ha demostrado la viabilidad de controlar con imágenes desde satélite la eficiencia de los cambios en las instalaciones en alumbrado público municipal. Para el caso del municipio de Deltebre se han medido reducciones de un 50 % lo que parece indicar la bondad de las actuaciones (sección 2.3.2).
- Se ha desarrollado un método que proporciona estimaciones precisas del consumo energético en alumbrado público a partir de las radiancias obtenidas con imágenes de satélite (sección 2.13).
- La evolución del gasto eléctrico en alumbrado público para España ha crecido en los últimos 25 años a un ritmo de 4 % y presenta actualmente una desaceleración. El gasto energético de España es de 5.4 TWh/año lo que supone un gasto de cerca de 950 millones de euros anuales en este momento(sección 2.13).
- Se ha estimado el gasto en alumbrado público para los países de la Unión Europea, estimaendo el gasto económico en 6.300 millones de euros anuales. España el país con mayor consumo por habitante y en segunda posición en valor absoluto (sección 2.3.2).

Capítulo 3

Medida de contaminación lumínica usando imágenes ISS

3.1. Introducción

Las fotografías obtenidas por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional¹ son objeto de nuestro estudio. Estas fueron registradas mediante cámaras reflex comerciales, y tienen una gran repercusión mediática por su intrínseca belleza. En particular las obtenidas durante la noche muestran una red de puntos luminosos que corresponden en su mayor parte a la iluminación pública de las grandes ciudades.

De fotografías nocturnas tomadas por astronautas con cámaras digitales comerciales o ligeramente modificadas. Nuestro grupo de investigación tiene catalogadas a mano alrededor de 1600 imágenes nocturnas de buena calidad, y de ellas el 92 % han sido realizadas con el modelo Nikon D3S; el 5 % con una Nikon D3, usando una Nikon D2Xs un 2.65 %, y el resto con cámaras diversas [Nikon D1, D1s, D3X y Kodak]). La información sobre todas las cámaras utilizadas en la Estación Espacial Internacional puede ser consultada en la página web del archivo de la NASA *The Gateway to Astronaut Photography of Earth* (Heydorn et al. 2014)².

Por suerte las imágenes se registraron y archivaron en formato nativo de la cámara (ficheros RAW) que conservan la linealidad del detector, es decir que los valores de los ficheros son proporcionales a la exposición recibida por cada píxel. La calibración de las imágenes permite transformar estas unidades arbitrarias que proporciona la cámara a unidades físicas. Para realizar esa conversión es necesario conocer las características de la cámara.

¹ISS es una colaboración de la National Aeronautics and Space Agency (NASA) de EEUU, la Agencia Espacial de la federación Rusa (Roscosmos), la Canadian Space Agency (CSA), la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) para el desarrollo conjunto, operación y utilización de una estación espacial permanentemente habitada en una órbita terrestre

²<http://eol.jsc.nasa.gov/>

Aunque lo ideal es caracterizar las propias cámaras usadas por los astronautas(más de seis), siendo una cámara comercial se podría emplear la información proporcionada por el fabricante, pero ésta resulta insuficiente para nuestros propósitos. Las informaciones recopiladas en la literatura sobre la respuesta espectral de las cámaras Nikon D3S son incompletas y no se han encontrado análisis sobre su eficiencia cuántica. Por lo tanto nos vemos obligados a analizar en detalle el comportamiento de este modelo de cámara para su correcta calibración y ya que no tenemos acceso a la cámara usada por los astronautas asumiremos que las características de esa cámara en concreto son similares a otras del mismo modelo.

Para la caracterización del sistema se alquiló una cámara Nikon D3S que fue analizada en el banco óptico de caracterización de detectores del Laboratorio de Instrumentación Científica Avanzada, en adelante abreviado como LICA³. Comprobaremos posteriormente mediante el análisis de imágenes de campos estelares que las propiedades de esta cámara coinciden con la usada por los astronautas y que la calibración es correcta.

Para la calibración absoluta del sistema es necesario utilizar una fuente patrón como la empleada en LICA. Dado que las fotografías se realizan en la Estación Espacial a través de una ventana, para evitar sesgos introducidos por las absorciones y reflexiones de las diferentes capas de las ventanas de la estación⁴ que no pudiésemos reproducir en tierra, se ha realizado la calibración absoluta utilizando estrellas como fuente patrón. Estos campos estelares han sido observados a través de las mismas ventanas desde las que se realizan las imágenes terrestres.

Por último, como comprobación final, se ha comparado el resultado obtenido con los mejores datos calibrados disponibles tomados desde satélites. En la actualidad los únicos datos comparables son los resultados provisionales tomados por el satélite SUOMI-NPP con la cámara VIIRS en la banda DNB.

3.2. Las imágenes nocturnas desde la ISS

El análisis visual de las imágenes permite ya determinar los lugares de mayor iluminación y compararlo con los niveles de población (Kyba et al. 2014a).

La intensidad registrada en las imágenes está relacionada con la cantidad de luz enviada al espacio bien directamente o por reflexión en el suelo. Por lo tanto hay otros parámetros aparte de la potencia instalada como son el tipo de luminaria, la reflectividad del suelo, la cobertura de árboles, el diseño de las ciudades, etc. que influyen en el valor final registrado en las imágenes.

³<http://guaix.fis.ucm.es/lica>

⁴ Hatton (2011) indica: “The transmittance SHALL be not less than 60.0 percent for wavelengths between 800 and 450 nanometers. Also the transmittance off the windows are over 95 % in all wavelengths between 800 and 450 nanometers.”

A parte del valor que tienen estas imágenes nocturnas para concienciación de los ciudadanos en el tema del derroche energético y la contaminación lumínica, nuestro grupo demostró que las imágenes tienen utilidad científica ya que el detector empleado es lineal y que se puede extraer información del tipo de tecnología de iluminación al obtenerse imágenes en tres bandas de color (Zamorano et al. 2011a; Sánchez de Miguel et al. 2013b).



Figura 3.1: Imagen nocturna de Madrid desde la Estación Espacial Internacional (ISS026e026493) en formato JPEG mostrando el color anaranjado de la iluminación publica de las calles con lámparas de sodio de alta presión. La imagen está orientada aproximadamente Norte - Sur, con un ancho de aproximadamente 50 km.

Para un correcto análisis fotométrico es necesario usar las imágenes en formato de imagen sin modificaciones (en adelante formato RAW). Esto es debido a que otros formatos utilizados en fotografía como el JPEG, que intentan reproducir el comportamiento del ojo humano con una respuesta logarítmica, son formatos de compresión con pérdidas de información y en particular supone la pérdida de linealidad. La información original de estos formatos no puede ser recuperada.

El detector empleado en las cámaras Nikon D3S es un CMOS con un comportamiento lineal (véase sección 3.5) y por lo tanto las intensidades medidas en cada píxel (cuentas o ADUs, *analog-to-digital units*) son proporcionales a la exposición luminosa recibida. Para registrar co-

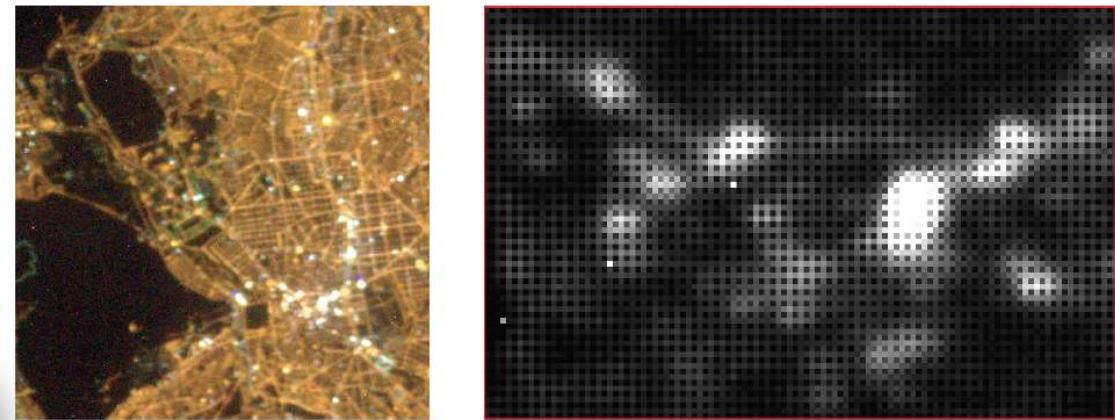


Figura 3.2: Detalle de ISS026e026493 en la zona central de Madrid y una ampliación en la imagen RAW mostrando la estructura de la matriz de Bayer.

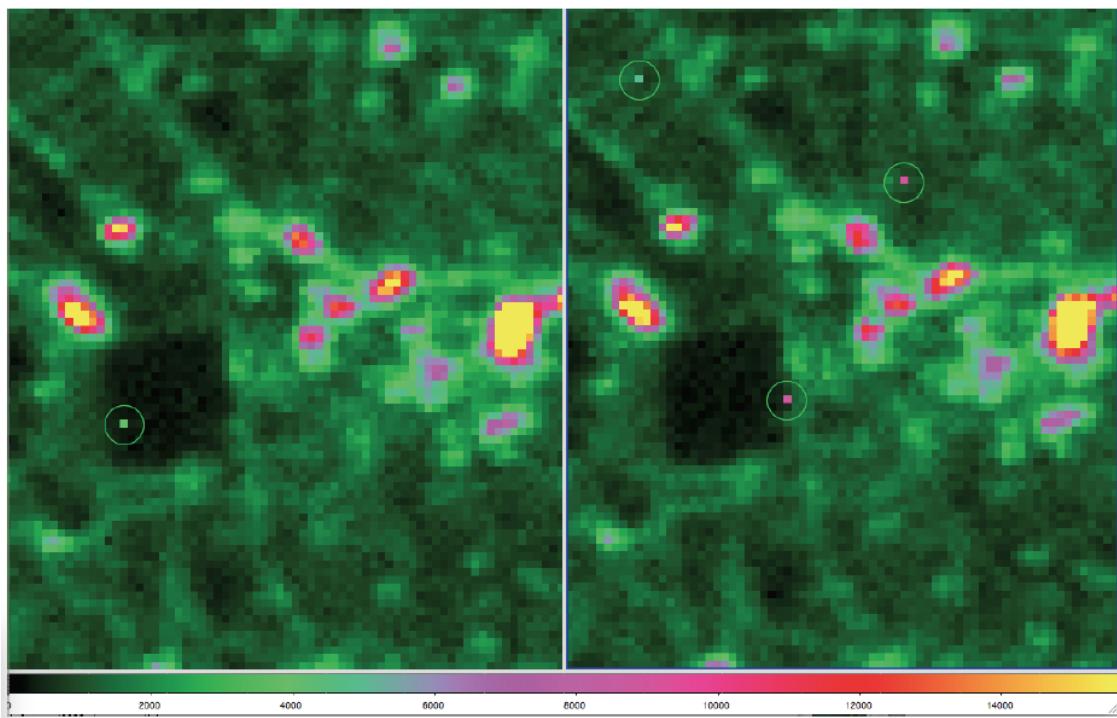


Figura 3.3: Los dos canales verdes (G) en un detalle de ISS026e026493. La imagen ha sido codificada en color según la tabla mostrada. Las zonas más brillantes aparecen en amarillo. Se han señalado píxeles calientes en ambas imágenes, las cuales muestran una zona ligeramente diferente del suelo debido a la estructura de la matriz de Bayer.

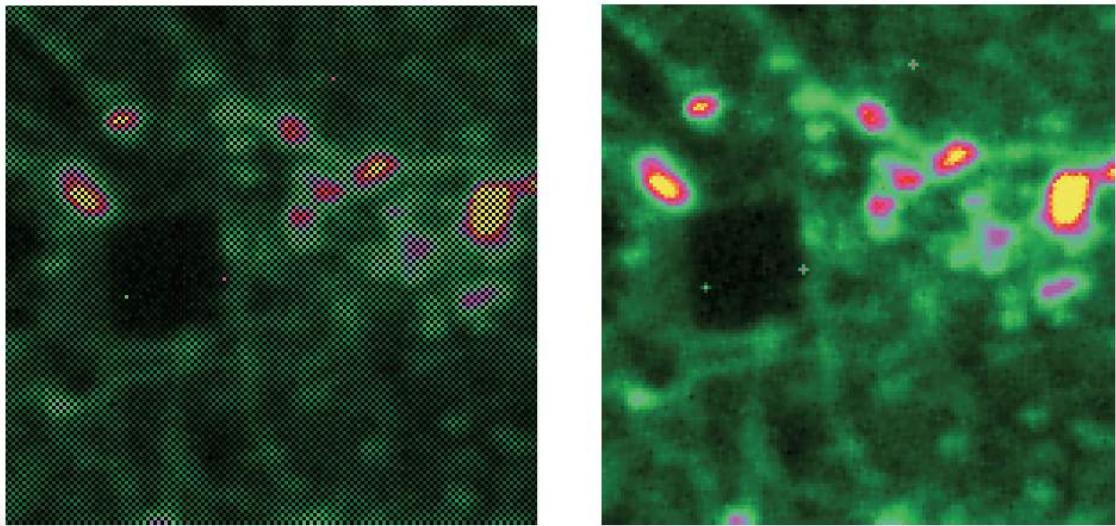


Figura 3.4: Imagen intermedia compuesta con los dos canales verdes e imagen reconstruida a partir de ésta mostrando una mayor resolución espacial.

lor el detector dispone de un mosaico de Bayer que es una matriz periódica de filtros de color (CFA, del inglés *color filter array*) que consiste en un filtro rojo, dos verdes y otro azul en una disposición cuadrada de 2×2 . Cada imagen se compone en realidad de cuatro imágenes registradas en tres colores o canales (R, G & B) que deben ser separadas. El análisis de las mismas proporciona información sobre el color de las fuentes y por lo tanto sobre su naturaleza (véase la sección 3.6).

3.3. Decodificación de las imágenes

Para la traducción del formato original o nativo de Nikon o archivos NEF por sus siglas en inglés *Nikon Electronic File*, se ha usado el código DCRAW desarrollado por Coffin (2006) que permite la separación de los cuatro canales. El comando para la decodificación permite ajustar los parámetros y en este caso se ha empleado:

$$dcraw -v -o 0 -H 1 -D -6 <\text{nombredelarchivo}> \quad (3.1)$$

donde las opciones utilizadas indican que la extracción de los datos se produce en formato de 16 bits (-6). No se ha aplicado ningún balance de color (-o), no se han excluido las sobre exposiciones (-H 1). La opción -v indica que el programa debe mostrar si hay errores de lectura por pantalla.

A continuación se convierte el formato resultante (pgm⁵) en formato FITS⁶. Para ello utilizamos el comando PAMTOFITS de la librería NETpbm (Henderson 2010). El fichero en formato FITS contiene entrelazada la matriz de Bayer. Para separar los canales RGB se ha escrito una rutina en python que nos separa la imagen en los cuatro canales (RGGB) en formato FITS. En este proceso no se ha perdido información y se conserva la linealidad del detector. De manera adicional también convertimos los ficheros a formato RED_m^{uc}E (Cardiel 1999) para el análisis de la fotometría sintética (véase sección 3.4.5). El código puede ser consultado en el repositorio de Mercurial de GUAIX en el paquete pyISS Sánchez de Miguel (2013b).

3.3.1. Características de los datos

La cámara Nikon D3S tiene la opción de registrar las imágenes en formato RAW de 12 ó 14 bits. Esta información aparece en la cabecera EXIF (Association et al. 1998). Aunque en principio las imágenes de 12 bits deberían tener un rango dinámico de 4096 niveles y las de 14 bits de 16384, el resultado de la decodificación muestra que el rango dinámico real de las imágenes de 12 bits y 14 bits es el doble del esperado (8192 para 12 bits y 32768 para los 14 bits). En principio suponemos que es el programa DCraw el que expande los valores multiplicándolos por 2. Dado que esto no supone ninguna pérdida de información, y dichos números son adimensionales, no se ha realizado ninguna modificación posterior.

Una característica poco frecuente en este tipo de detectores consiste en el ruido de las imágenes que no es de tipo gaussiano como se espera en cámaras CCD (Faraji & MacLean 2006). El proceso de reducción de ruido de manera diferencial patentado por Nikon (Koyama & Jiang 2011) resta una imagen de ruido (DARK que incluye el BIAS de manera que el valor medio del fondo en zonas no expuestas es nulo y no el valor del BIAS como en otras cámaras de diferentes fabricantes. Por eso en las imágenes RAW obtenidas con cámara Nikon D3S el ruido es una combinación de una componente gaussiana truncada en valores bajos (cercaos a 0) y otra de tipo exponencial (ver fig. 3.5). Se ha llegado a esta conclusión tras analizar las imágenes y comprobar que en imágenes oscuras o DARKS, aproximadamente entre el 42-50% de los píxeles son 0. Generalmente se añade un BIAS de cuentas para evitar tener valores negativos debido al ruido durante la conversión analógica digital. En este caso, está claro que el software o el hardware de la cámara resta ese fondo y trunca a cero los valores que están por debajo de la media del fondo. Este proceso es secreto y por tanto es ilegal difundir el procedimiento exacto aunque se pueda deducir por ingeniería inversa.⁷ Esta técnica permite eliminar el BIAS

⁵<http://netpbm.sourceforge.net/doc/pgm.html>

⁶Pence, W. D., Chiappetti, L., Page, C. G., Shaw, R. A., & Stobie, E. (2010). Definition of the flexible image transport system (fits), version 3.0. *A&A*, 524, A42.

⁷Algunos aficionados han desarrollado un firmware alternativo al oficial que evita estos problemas.

de las imágenes RAW y posiblemente incrementar el rango dinámico de la cámara, pero dificulta mucho el análisis de las regiones con poca señal ruido.

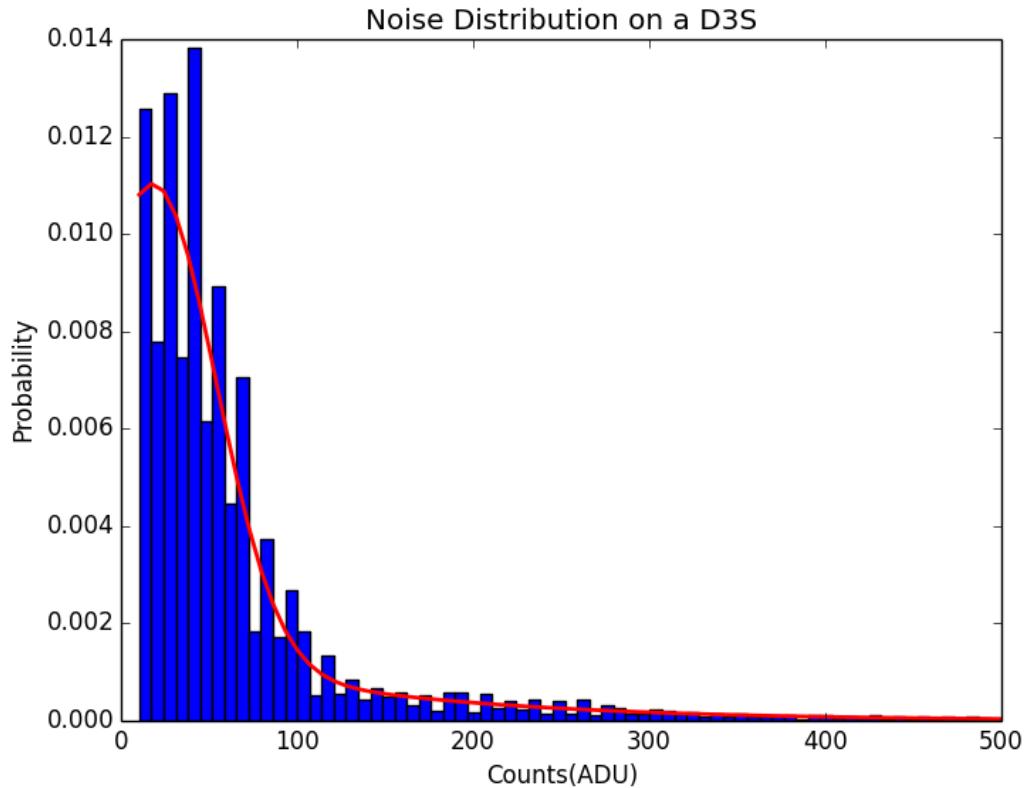


Figura 3.5: Distribución de probabilidad del ruido de una cámara Nikon D3S. La línea roja corresponde al mejor ajuste. Es la suma de una gaussiana y una distribución exponencial. El dentado de la distribución es interpretado como un error de redondeo en la conversión analógica digital, realizándose por un procedimiento TOP o BOTTOM en vez de un verdadero redondeo.

3.3.2. Caracterización espectral de la cámara

Aunque en algunos casos puede ser suficiente utilizar la cámara como un fotómetro de tres canales y calibrar con fuentes patrón, una calibración fotométrica correcta (aunque sea relativa) exige conocer la respuesta espectral de cada uno de los canales de la cámara.

Utilizando el banco óptico de caracterización de detectores de LICA se ha realizado un montaje clásico (véase figura 3.6) en el que se alimenta con luz monocromática una esfera integradora que ilumina a la vez a la cámara fotográfica y a un fotodiodo calibrado que sirve de referencia, ya que su respuesta es bien conocida. La radiación de una lámpara de Tungsteno que

sirve como fuente se descompone mediante un monocromador de forma que se pueden obtener medidas en longitudes de onda en el intervalo de luz visible.

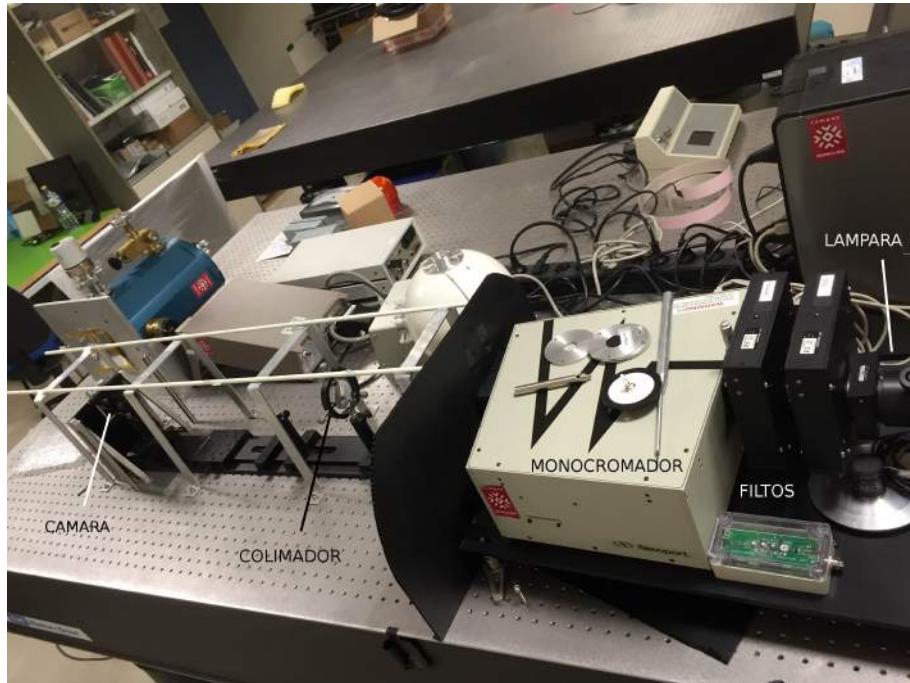


Figura 3.6: Imagen del banco óptico donde se ha realizado la caracterización espectral. De Izq. a Dcha. se puede ver una cámara, el colimador, el monocromador, las ruedas de filtros y la lámpara. En ocasiones se utiliza la esfera integradora más un fotodiodo como control.

Los valores obtenidos a cada paso del monocromador permiten construir las variaciones con la longitud de onda de intensidad luminosa observadas con la cámara y con el fotodiodo. Como la respuesta del fotodiodo es conocida, se puede determinar el espectro de la fuente y posteriormente la respuesta de la cámara.

Este proceso de calibración se ha realizado para las cámaras Nikon D3, D3S y D2X. Como muestra la figura 3.8, las curvas son similares. Sin embargo presentan diferencias entre ellas y con las bandas fotométricas estándares de astronomía B, V y R de Johnson por lo que se ha realizado una corrección para tener en cuenta esas diferencias, mediante fotometría sintética.

El sistema completo de la cámara incluye, además del detector, el objetivo. Este elemento óptico influye en la respuesta espectral de la cámara por lo que un estudio más elaborado implicaría realizar todo el proceso de calibración con cada objetivo usado en la ISS. La caracterización que se ha adoptado se realizó usando un objetivo NIKKOR 50 mm f/1.4D. La calibración absoluta final con campos estelares nos ha permitido tener en cuenta estos efectos de segundo orden.

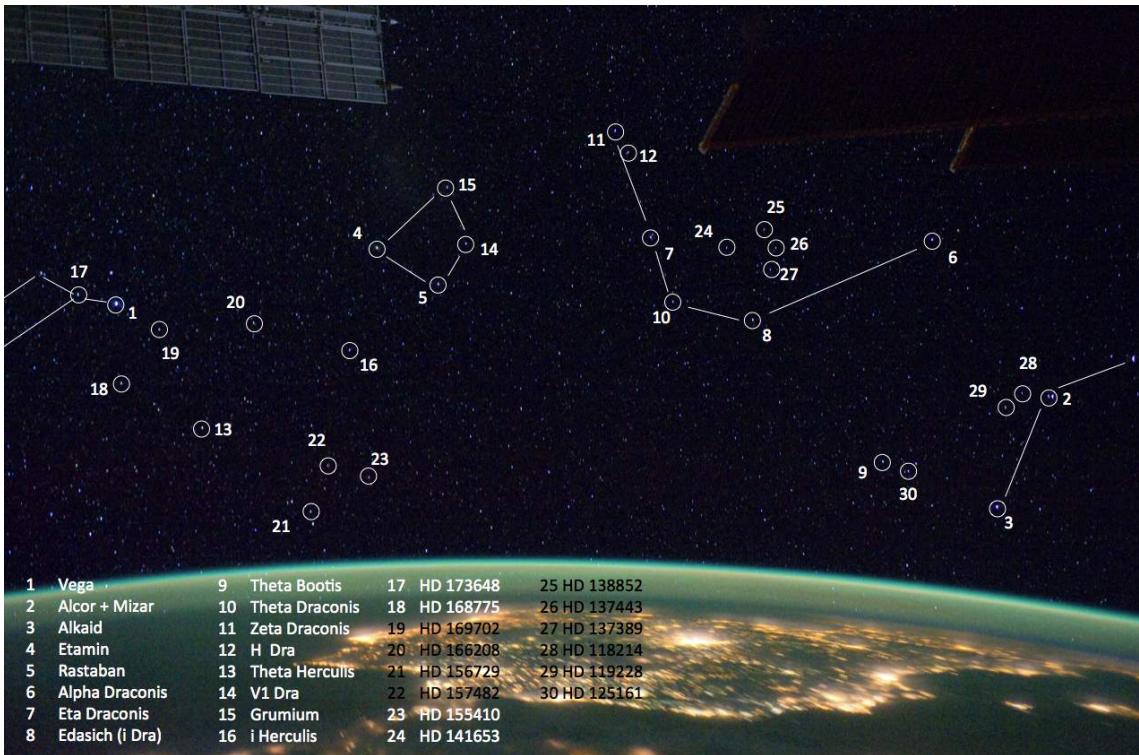


Figura 3.7: Campo estelar en la imagen ISS029E035676 con la identificación de las estrellas más brillantes y las líneas de las constelaciones registradas (Lyra, Hercules, Draco, Bootes y Ursa Maior). Vega es la estrella más brillante del campo y en esta exposición está saturada.

3.4. Calibración fotométrica

3.4.1. Introducción

Las primeras pruebas que demostraron la capacidad de obtener datos de calidad científica con las fotografías obtenidas desde la ISS se realizaron con ficheros RAW de imágenes de campos estelares que fueron proporcionados por la NASA (Zamorano et al. 2011a). En esas imágenes se identificaron visualmente las estrellas (fig. 3.7) y se midieron sus flujos que posteriormente se compararon con las magnitudes estándar de las estrellas. Se comprobó que existía un buen acuerdo entre las medidas en banda V de Johnson y el canal G y que se podían obtener ajustes en los otros canales usando términos de color (fig. 3.9).

Actualmente el repositorio de la NASA (Heydorn et al. 2014) enlaza los ficheros RAW por lo que se tiene acceso a un número enorme de imágenes que pueden ser usadas como de referencia en calibración. Algunas de ellas no pueden ser utilizadas bien porque están sobreexpuestas, por tener mal seguimiento o por otras causas.

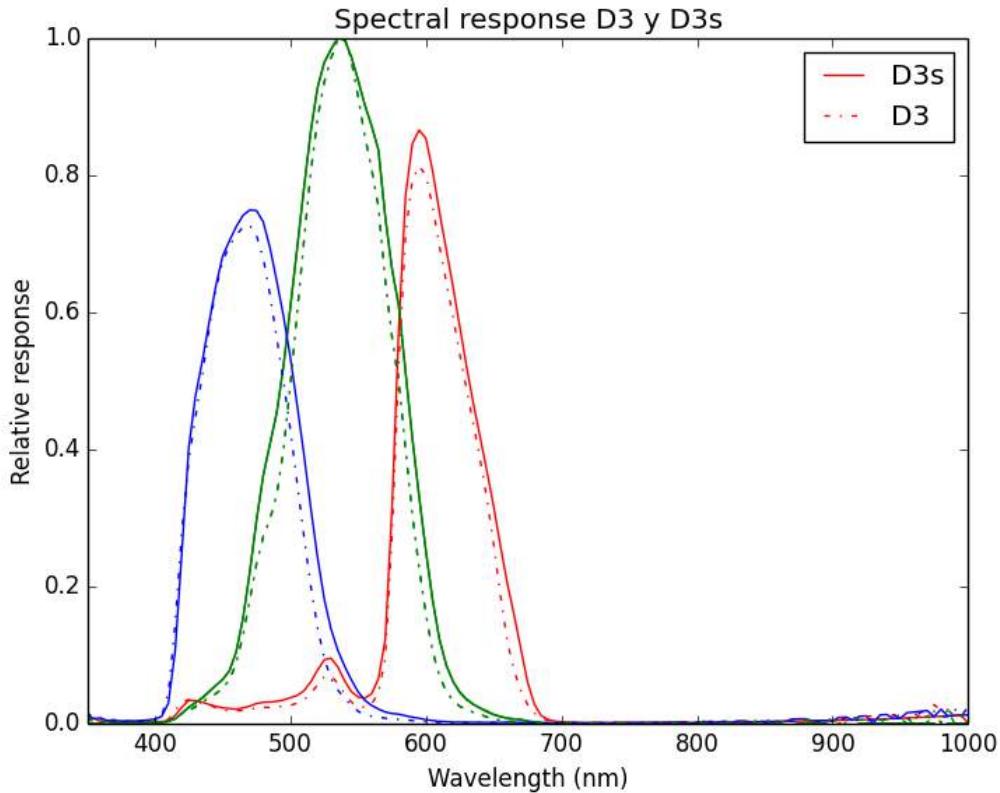


Figura 3.8: Respuesta espectral de las cámaras D3 y D3S. Puede verse cómo las curvas de ambas cámaras son muy similares, salvo un pequeño factor de escala debido a la diferente eficiencia cuántica de las cámaras.

Para realizar la calibración fotométrica de la cámara hemos elegido 5 imágenes tomadas desde la estación espacial en las que aparecen campos de estrellas (véase la tabla 3.1). Las 5 imágenes han sido tomadas con el objetivo Nikkor 50mm f/1.4D que es el que se está empleando regularmente para cartografiar desde la ISS por la noche. La comparación del análisis de imágenes tomadas en diferentes momentos y con distintas sensibilidades y tiempos de exposición ha permitido comprobar la estabilidad del sistema que es necesaria para aplicar la calibración al resto de las imágenes.

Hemos elegido calibrar imágenes obtenidas con el objetivo Nikkor 50mm f/1.4D por ser un objetivo de focal fija (conserva la escala de placa en todas las imágenes), por ser de los más luminosos del conjunto empleado en la ISS (permite exposiciones cortas que no suelen estar emborronadas) y además existen muchas imágenes en diferentes misiones. Por otra parte presenta la ventaja de que disponemos del mismo modelo de objetivo, lo que permite su caracterización en nuestros laboratorios.

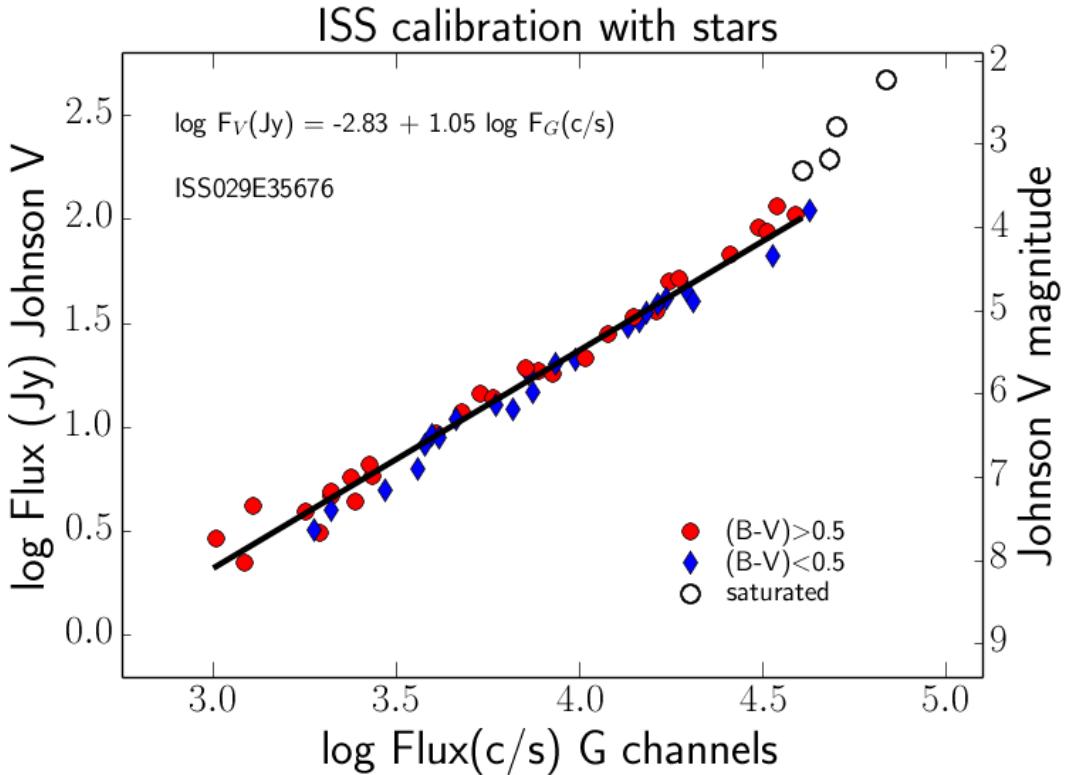


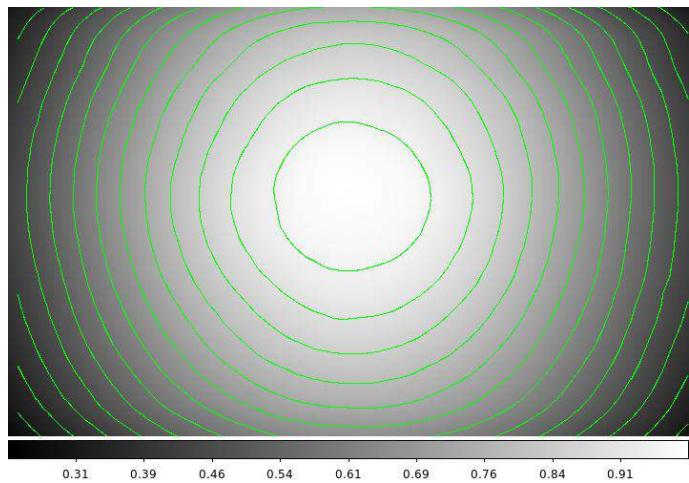
Figura 3.9: Ajuste de calibración entre banda V de Johnson y canal G de Nikon D3S con estrellas de la imagen ISS029E035676. (Sánchez de Miguel et al. 2013b)

3.4.2. Corrección de iluminación

Incluso los objetivos de gran calidad sufren de un efecto de viñeteo de forma que las partes externas de las imágenes reciben menos luz que las internas. Un paso importante en la calibración de imágenes consiste en corregir de esta pérdida óptica de sensibilidad radial o variación espacial de la iluminación. Para corregir de viñeteo se debe obtener una imagen de un campo de iluminación uniforme que permita medir este efecto.

Para la obtención del campo plano se usó una esfera integradora. Como puede observarse en la figura 3.10 el gradiente es muy importante, llegando a una transmisión de un 30% en las esquinas. La toma de campo plano tuvo que realizarse en una esfera integradora de tamaño medio (8 pulgadas de diámetro), ya que el campo cubierto por la cámara es de $39.9^\circ \times 26.5^\circ$, con una escala de placa de 67.1 arcsec/px.

Figura 3.10: Imagen de corrección de viñeteo o imagen de campo plano, llamado comúnmente FlatField, para un objetivo Nikkor 50 mm f1.4D. La imagen fue tomada en la esfera integradora de 8 pulgadas del laboratorio de instrumentación del Institute for Space Sciences de la Freie Universität Berlín. Cada isofota corresponde a una transmisión un 5 % menos que la anterior, siendo la primera una transmisión del 95 %.



3.4.3. Calibración Astrométrica

La calibración fotométrica se obtiene comparando los flujos medidos en las imágenes con los valores de magnitudes obtenidos de la literatura. Por eso se necesita conocer las estrellas que aparecen en las imágenes de los campos estelares analizados. Esta tarea es fácil si se ha realizado previamente la calibración astrométrica de la imagen que transforma de posición (X,Y) en píxeles del detector a coordenadas en el cielo (RA,DEC). Como complemento adicional se puede determinar las distorsiones que introduce el sistema óptico.

En las primeras pruebas realizadas se seleccionaron las estrellas de forma manual mediante exploración visual de las imágenes y comparación con mapas estelares (véase la Fig. 3.7). A continuación se usan las rutinas de IRAF para conseguir imágenes calibradas que contienen los descriptores WCS (*World Coordinate System*) en las cabeceras FITS. Un método mucho más eficaz consiste en emplear la herramienta Astrometry.net (Lang et al. 2010) como primer paso. Esta utilidad encuentra automáticamente el apuntado del campo, su orientación y la escala de placa de forma rápida, proporcionando la calibración astrométrica sin intervención del usuario.

El ajuste fino se realiza posteriormente con las rutinas de IRAF ccmmap y ccsetwcs (Wallace 1994) que emplean los catálogos de Hiparcos I/239/hip_main (Perryman et al. 1997) y Tycho I/259/tyc2 (Høg et al. 2000). La identificación de fuentes para la calibración astrométrica se ha realizado una correlación cruzada de muestras limitadas en magnitud utilizando Topcat (Clifton et al. 2004) y Aladin (Bonnarel et al. 2000). La detección de fuentes se ha realizado con el programa SExtractor (Bertin & Arnouts 1996).

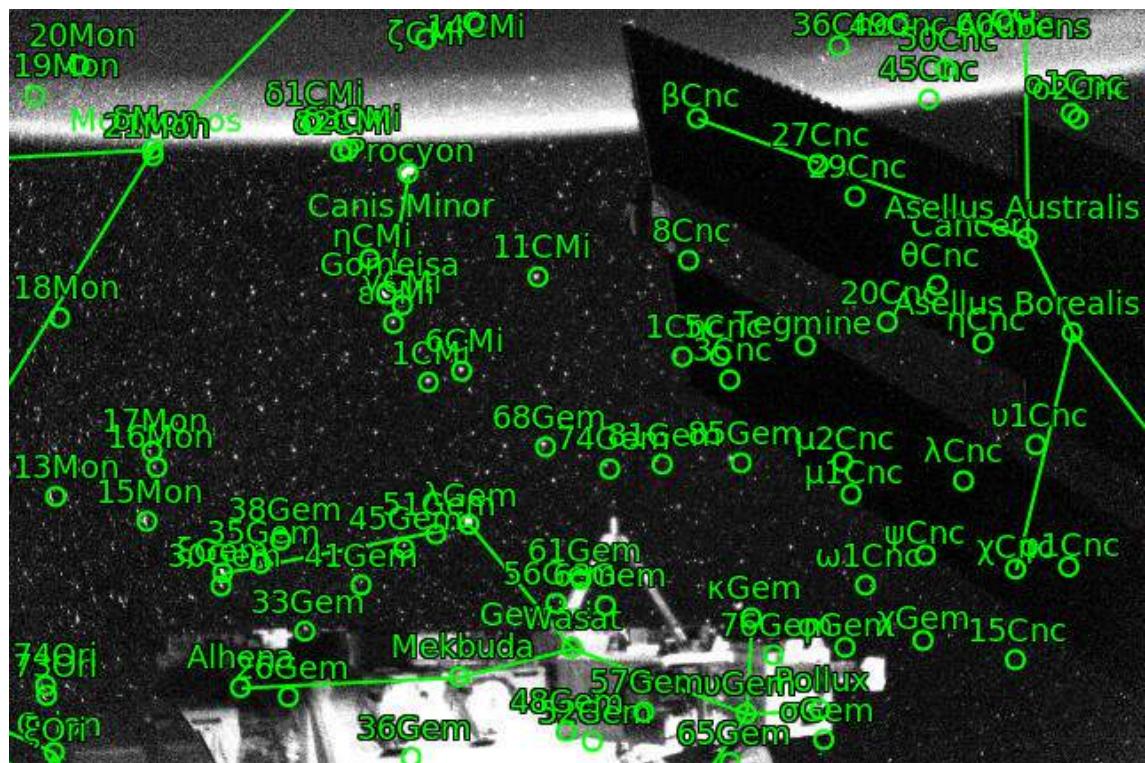


Figura 3.11: Identificación de fuentes realizada por Astrometry.net para la imagen iss037e009482B4F.fits.

3.4.4. Medidas fotométricas

La calibración astrométrica permite identificar y medir las estrellas de las imágenes de forma automática. Las estrellas que se han usado para la calibración fotométrica son las fuentes de los catálogos Tycho I/259/tyc2 y II/237 (Ducati 2002). Se han escogido estos catálogos por ser los únicos disponibles con flujos para estrellas de magnitud entre 3 y 8 para las bandas B, V y R de Johnson que son las de las estrellas que aparecen en las imágenes usadas para calibración fotométrica. Otras estrellas más brillantes suelen aparecer saturadas y no pueden emplearse.

Dentro de las opciones que da Sextractor, hemos elegido la opción BEST como flujo de las estrellas. Dado que la cantidad de estrellas por campo que están en el catálogo Ducati (2002) II/237 es pequeña, se han unido los datos de las 5 imágenes de campos estelares para realizar la calibración fotométrica. Al ser imágenes obtenidas con el mismo equipo pero diferente configuración, se dispone de medidas de estrellas en un intervalo de magnitudes más amplio.

3.4.5. Fotometría sintética

No se debe perder de vista que se está caracterizando la cámara Nikon D3S y el objetivo 50mm Nikkor F/1.4D como instrumento para fotometría de estrellas.

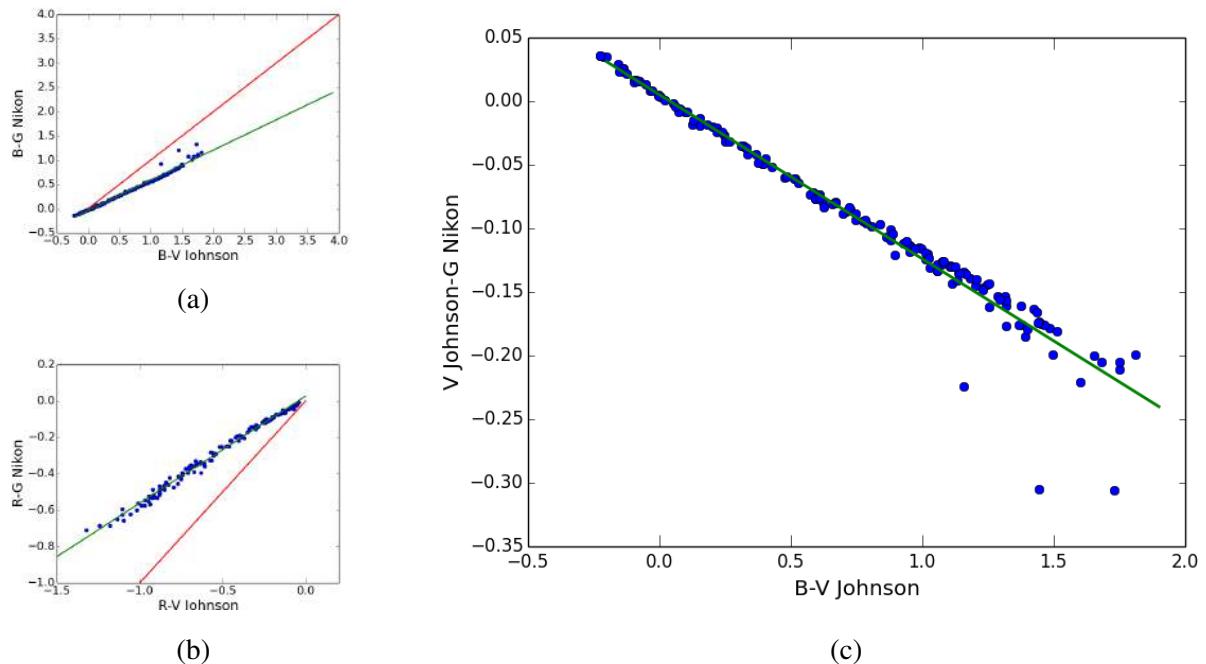


Figura 3.12: Relaciones obtenidas mediante fotometría sintética a partir de la librería de espectros estellares de Gunn & Stryker (1983). (a) Relación entre el color B-V de Johnson y B-G de Nikon. La línea roja es la relación 1:1 y la linea verde el mejor ajuste lineal.(b) Relación entre el color R-V de Johnson y R-G de Nikon. La línea roja es la relación 1:1 y la línea verde el mejor ajuste lineal. (c) Relación entre el color B-V de Johnson y V de Johnson menos G de Nikon. La linea verde el mejor ajuste lineal. Se puede ver que la pendiente es mucho menor que las otras relaciones (0.13 frente a 0.59 y 0.61) debido a que los filtros difieren menos que el filtro correspondiente en el sistema Johnson.

Análogamente a como se realizaría un estudio fotométrico con un sistema telescopio-filtros-detector es necesario determinar las transformaciones al sistema estándar en el que se tienen las magnitudes de las estrellas.

Las transformaciones al sistema estándar se pueden realizar por comparación de las magnitudes y colores instrumentales en el sistema de la cámara (canales R, G y B) y en el sistema de Johnson (B, V y R). Este método funciona correctamente para el canal G que es muy similar a la banda Johnson V (sin necesidad de términos de color) y también para los otros canales usando términos de color. Los resultados para una imagen de la ISS pueden observarse en la figura 3.9.

Un método más refinado consiste en caracterizar el sistema fotométrico de la cámara mediante la técnica de fotometría sintética. En el artículo de referencia (Fukugita et al. 1995) se describe la técnica con detalle y aquí sólo se muestra lo fundamental del proceso. Básicamente se trata de predecir las magnitudes de las estrellas de diferentes tipos espectrales que se obtendrían al observar con el sistema estudiado. Para ello se necesitan los espectros de las estrellas y la caracterización espectral del sistema del que ya se dispone.

$$m_{AB} = -2.5[\log \int d\lambda R(\lambda) f_\lambda - \log \int d\lambda R(\lambda) f_\lambda(AB)] \quad (3.2)$$

Donde $R(\lambda)$ es la respuesta del filtro utilizado, f_λ , el espectro problema y $f_\lambda(AB)$ es la curva de referencia AB, definida como punto cero para una fuente de densidad de flujo constante de 3631 Janskys.

Se ha utilizado la librería de espectros Gunn & Stryker (1983) para obtener finalmente magnitudes sintéticas (magnitudes AB) en las bandas correspondientes a los canales R, G y B de la Nikon D3S. Se ha elegido esta librería en concreto debido a que, en comparación con otras librerías estelares, esta, tiene mayor cobertura espectral (hasta 10.000 Å, especialmente para la banda R de Johnson y el DMSP/OLS (otras librerías estelares como Jacoby et al. (1984) o por ejemplo sólo llega hasta 7.000 Å, o Vazdekis et al. (2012) hasta 9.000 Å).

Los resultados (relación entre colores en los dos sistemas fotométricos) se muestran en las figuras 3.12. Dado que no existen medidas con los filtros de la matriz de Bayer de Nikon, tenemos que recurrir a una transformación entre las magnitudes en el sistema fotométrico de Johnson y los filtros de Nikon. Por suerte los filtros son diferentes pero no en exceso y las relaciones entre ellos son suaves excepto para las estrellas de tipos espectrales fríos, en los que pueden aparecer líneas de emisión en $H\alpha$. El índice de correlación R^2 en todos los casos supera 0.98. De esta manera podemos estimar de manera teórica cual es el flujo que vamos a medir en nuestros filtros en comparación con filtros astronómicos estándar.

Las ecuaciones de transformación entre el sistema de Nikon D3S y el de Johnson son:

$$B_N = G_N + 0.6123(7) \times (B - V) - 0.0340(6) \quad (3.3)$$

$$R_N = G_N + 0.0262(3) + 0.5880(5) \times (R - V) \quad (3.4)$$

$$G_N = V + 0.1291(2) \times (B - V) - 0.0051(2) \quad (3.5)$$

donde B_N es la magnitud de la estrella en la banda B Nikon, R_N es la magnitud de la estrella en la banda R Nikon. La corrección en la banda G es mucho menor, por la similitud entre los filtros G Nikon y V Johnson.

En adelante se ha usado el sistema fotométrico de Nikon en vez de el de Johnson por que esta es la banda real de observación y dado que las lámparas de las ciudades están dominadas por fuentes líneas de emisión, la calibración es más robusta en la propia banda de observación que en otras ficticias.

El sistema fotométrico definido para la cámara Nikon mediante fotometría sintética permite determinar flujos en unidades $erg \cdot s^{-1} cm^{-2} \text{\AA}^{-1}$ de las fuentes luminosas observadas en las imágenes nocturnas de la Tierra.

Hay que advertir al lector que estas relaciones de color son solamente válidas para espectros estelares y están pensadas para ser utilizadas en la calibración mediante estrellas estándar. Su uso no es recomendado en otro tipo de fuentes tipo lámparas de descarga, LEDs y otras distribuciones espectrales de energía no consideradas.

Sin embargo, si se dispone del espectro de la fuente, es posible establecer el mismo tipo de conversión por el mismo procedimiento de fotometría sintética.

3.4.6. Transmisión de las ventanas de observación

Las imágenes, por razones obvias, se realizan a través de las diversas ventanas que tiene la estación espacial. La más importante de todas es la Cupola (Estes 2002) instalada en la ISS en 2010 por la Agencia Espacial Europea (ESA). Sin embargo, existen más de 14 ventanas diferentes en el módulo ruso Zvezda (ROSCOSMOS) y en WORF (Window Observational Research Facility) de NASA, además de una ventana de observación en el módulo Columbus y Kibo.

El espesor de cada ventana es diferente, por lo que la transmisión y reflexiones también (ver fig. 3.13, descripción de cada ventana). Por otro lado, no hay información en el archivo sobre qué imágenes han sido tomadas en qué ventana. Sólo es posible suponer a partir de la inclinación cual es la ventana más probable (los paneles laterales tienen una inclinación de 30°). Además, el espesor óptico es claramente diferente de unas ventanas a otras, totalmente independiente del espesor del material que las compone. Eso es fácil de comprobar por que para algunas imágenes

los tiempos de exposición para la misma fuente calculados de manera automática son diferentes en una ventana y otra. Eso sólo se explica porque unas ventanas son más oscuras que otras.

Las imágenes tomadas antes de 2010 sabemos con seguridad que fueron tomadas en las ventanas de Zvezda o en el WORF.

CUPOLA La Cupola está compuesta de una ventana circular de 71 cm y de 6 ventanas trapezoidales alrededor de la ventana circular. Disponen “contra ventanas” o *shutters* que protegen las ventanas del posible impacto de micrometeoritos y restos de basura espacial. Cada ventana está fabricada en borosilicato de gran calidad más un panel protector interno. Este panel puede ser desmontado para la realización de imágenes de gran calidad. La orientación de la Cupola es tal que apunta siempre al nadir.

El diámetro de la ventana circular es de 70.6 cm y un espesor de 20.8 cm. Las ventanas trapezoidales tiene un tamaño de 40.5 cm × 40.0 - 64.4 cm y un espesor de 18.50 cm. Por otro lado están los elementos ópticos de las ventanas.

Materiales de los cristales y espesor (Hatton 2011): A continuación se describen los elementos ópticos que componen la Cupola.

Paneles de presión(primario y redundante)[Presure pane]:

- Vidrio de cuarzo con recubrimiento antirreflectante.
- 1.45 in. (3.68 cm) de espesor para la ventana principal, 1.0 in. (2.54 cm) de espesor para las ventanas trapezoidales.

Paneles anti-rayado [Scratch pane]:

- Cristal de borosilicato (SCHOTT BK7)
- 0.44 in. (1.12 cm) de espesor para ventanas circular y trapezoidales.
- Película anti-esquirlas: La cara del vidrio que da a la cabina, se trató con recubrimiento resistente a los arañazos y anti-reflejos.
- Revestimiento antirreflectante conductor (ITO) que actúa como calentador superficie de vidrio orientada espacio.
- La eliminación de este panel se puede considerar en excepcionales casos para mejorar el rendimiento óptico de la ventana.

Paneles anti-restos [Debris pane]:

- Cristal de silicio con recubrimiento anti-reflejos.
- 0.37 in. (0.94 cm) de espesor para las ventanas circular y trapezoidales.

Nightpod es una montura motorizada que compensa el movimiento de la ISS para realizar imágenes de mayor resolución (Sabbatini & Esposito 2011). Este instrumento fue desa-

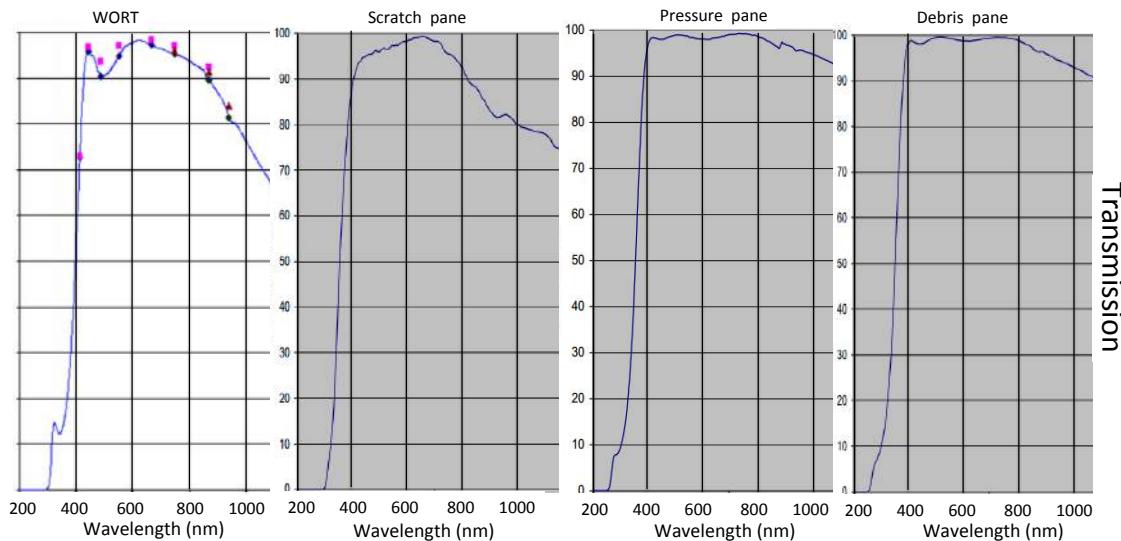


Figura 3.13: En primer lugar la transmisión de la ventana de WORF. A continuación, la transmisión de los paneles anti rayado, de los paneles de presión. y de los paneles anti restos, Fuente:(Hatton 2011)

rrollado como una demostración tecnológica con vistas a futuros desarrollos técnicos, pero sin ninguna unidad de procesado de datos. La posición fija de la montura hace que las imágenes tomadas con el Nightpod tengan una característica inclinación para la latitud de Europa. Este instrumento ha permitido aumentar la resolución y el rango dinámico al permitir exposiciones más largas y con ISO menor. En la figura 3.14 se puede observar su disposición en la Cupola. Este instrumento ha sido fundamental en la obtención de imágenes de alta resolución como las de la sección 3.6.3.

WORF El *Window Observational Research Facility* se encuentra en el módulo Destiny instalado en 2001. Esta diseñado para la observación de la Tierra. WORF usa el *Rack del EXPedite the PRocessing of Experiments to Space Station* (EXPRESS) por lo que esta preparado para instalar diversos aparatos ópticos como por ejemplo la EarthKAM(Dodson et al. 2000). Su orientación es Nadir y tiene un diámetro de 50.8 cm.

Los elementos ópticos que componen la ventana son:

- Dos paneles de 3.2 cm
- Un panel exterior de 1 cm.
- Un panel anti-rayado de 1.7 cm.
- El panel anti-rayado puede ser eliminado, si es necesario.

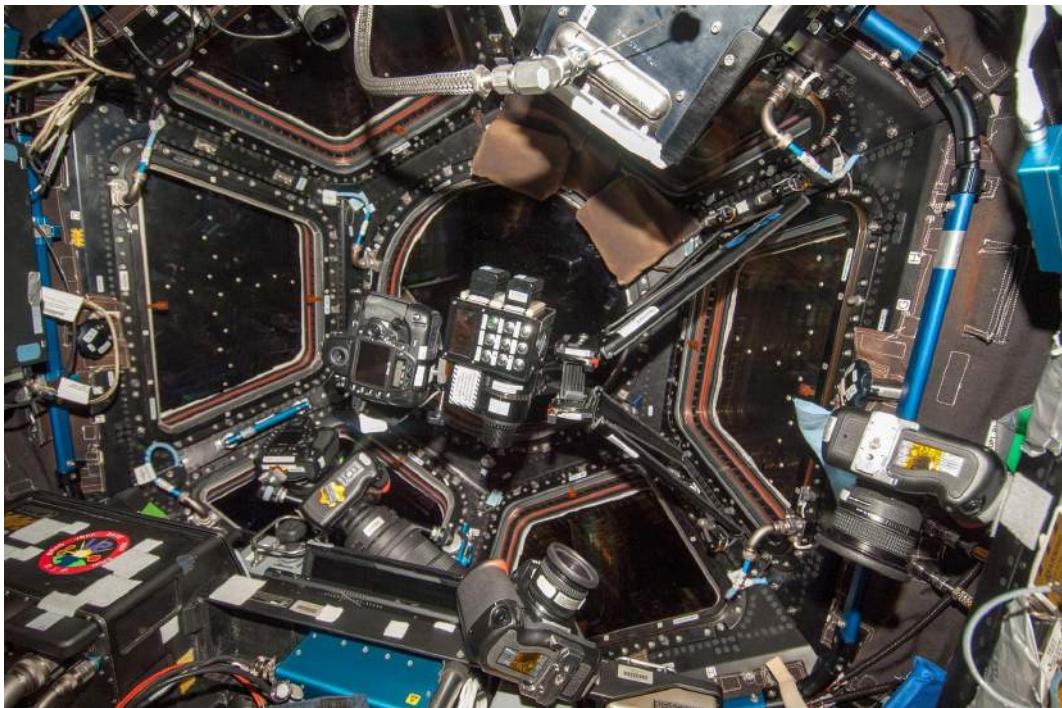


Figura 3.14: Imagen del Nightpod en la Cupola. La imagen esta orientada de tal manera que arriba es el norte. Fuente:ESA

Ventanas de Zvezda La siguiente ventana más importante es la #9 del módulo Zvezda de 40 cm de diámetro. Sabemos que es transparente al ultravioleta, pero Roscosmos no ha proporcionado información sobre su espesor y composición. Esta ventana apunta al nadir. Existen otras 13 ventanas en Zvezda con diversas orientaciones, pero no están publicadas sus características y probablemente no sean utilizadas para observación de la Tierra.

Corrección de transmisión de los elementos ópticos

Casi con total seguridad podemos asegurar que las imágenes de estrellas fueron tomadas en las ventanas trapezoidales de la Cupola ya que son las únicas ventanas de observación que no apuntan al nadir. Sin embargo desconocemos (no está documentado) si para esas tomas fueron quitados los paneles anti-arañazos. Existe el mismo problema con las demás ventanas, si bien sabemos que en muchas ocasiones dichos paneles eran quitados cuando se utilizaba el Nightpod con los objetivos de 85 mm y 50 mm.

Se ha comprobado que la calibración se ajusta a la perfección con lo esperado usando las imágenes VIIRS/DNB, por tanto es posible estimar cual es la desviación con respecto a la calibración o a una imagen de referencia. Por tanto, mediante el uso de fuentes de referencias (fotometría diferencial) como por comparación de la distribución de intensidades. El método de

la fotometría diferencial es idéntico al ya utilizado en la sección 2.3.1. La comparación de la distribución de intensidades la aplicaremos en la sección 3.6.2.

Estas técnicas no sólo son útiles para corregir el efecto de la diferente transmisión de las ventanas de la ISS, sino también para corregir de otros efectos. Por ejemplo, la TIPA (*Technical Image Press Association*) permite diferencias de hasta un 15 % en la transmisión de los objetivos para el mismo parámetro $f/$ de relación focal⁸. Este efecto se ha verificado posteriormente en LICA con los objetivos Nikon 50 mm $f/1.4D$, 50mm $f/1.8G$, 180 mm $f/2.8D$, 80-200 $f/2.8$. No ha sido posible localizar por el momento documento técnico que lo acredite, si bien, la experiencia con los objetivos citados lo certifica de facto. Por ello, aún cuando la calibración ha demostrado su validez, es imprescindible verificar la validez de la misma en cada caso.

La transmisión de los distintos vidrios es muy diferente. Comparando imágenes, se encuentra que cuando se retira el panel anti rayado de la Cupola, las imágenes tienen hasta un 50-35 % más señal. Las imágenes tomadas en la ventana WORT tienen entre un 25-10 % más señal que la referencia (imagen VIIRS2014). Sin embargo, la gran cantidad de objetivos utilizados (5 de uso principal), las 7 posibles configuraciones e infinidad de otros parámetros como la inclinación de la toma o el ISO utilizado, hacen que por el momento no sea posible dar un valor de corrección para cada configuración. En este caso como en otros, esperamos poder acceder a réplicas de los elementos montados en la ISS para poder caracterizarlos en el futuro.

A la vista de los resultados encontrados sería aconsejable realizar una serie de observaciones con diferentes objetivos y a través de diferentes ventanas de la ISS para conseguir una calibración fotométrica completa.

3.4.7. Calibración fotométrica

Ya se está en disposición con los pasos previos mencionados de realizar la calibración fotométrica absoluta. La transformación de cuentas (ADUs) en la imagen a magnitudes depende de la configuración de la cámara en el momento de la exposición. En particular de la sensibilidad ISO (que modifica la ganancia del detector), de la apertura del objetivo y del tiempo de exposición. Afortunadamente la señal registrada depende linealmente de estos factores por lo que es fácil calibrar imágenes obtenidas con diferentes configuraciones.

Para unir las medidas de las estrellas de las diferentes imágenes de calibración seleccionadas se han escalado los valores registrados al que se hubiera medido en condiciones de ISO100, tiempo de exposición de 1 s y objetivo completamente abierto ($F/1.4$). Por ejemplo si la imagen se ha obtenido con sensibilidad ISO400 y tiempo de exposición 3 s, se deben escalar los valores medidos dividiendo por un factor 12. Esta normalización a la configuración que llamamos

⁸Prof. Pedro Saura, Catedrático de Fotografía de la Facultad de Bellas Artes (UCM), comunicación privada

nominal, se ha mantenido a lo largo del trabajo. En un futuro esperamos ser capaces de corregir entre diferentes objetivos, pero para ello necesitaríamos el mismo modelo de objetivo utilizado por los astronautas, ya que el efecto de corrección de iluminación es muy importante en estos objetivos tan luminosos.

Además, el conversor A/D de la Nikon D3S opera de forma que las imágenes registradas en formato RAW de 14 bits presentan el doble de cuentas que las de análogas de 12 bits. Hemos tomado como referencia las de 12 bits.

$$\text{Corr} = \text{Valor} \times 100 / \text{ISO} \times 12 / \text{BitsPreSampe} \times 1 / T.\text{exp}[s] \times (f/N)^2 / 1.4^2 \quad (3.6)$$

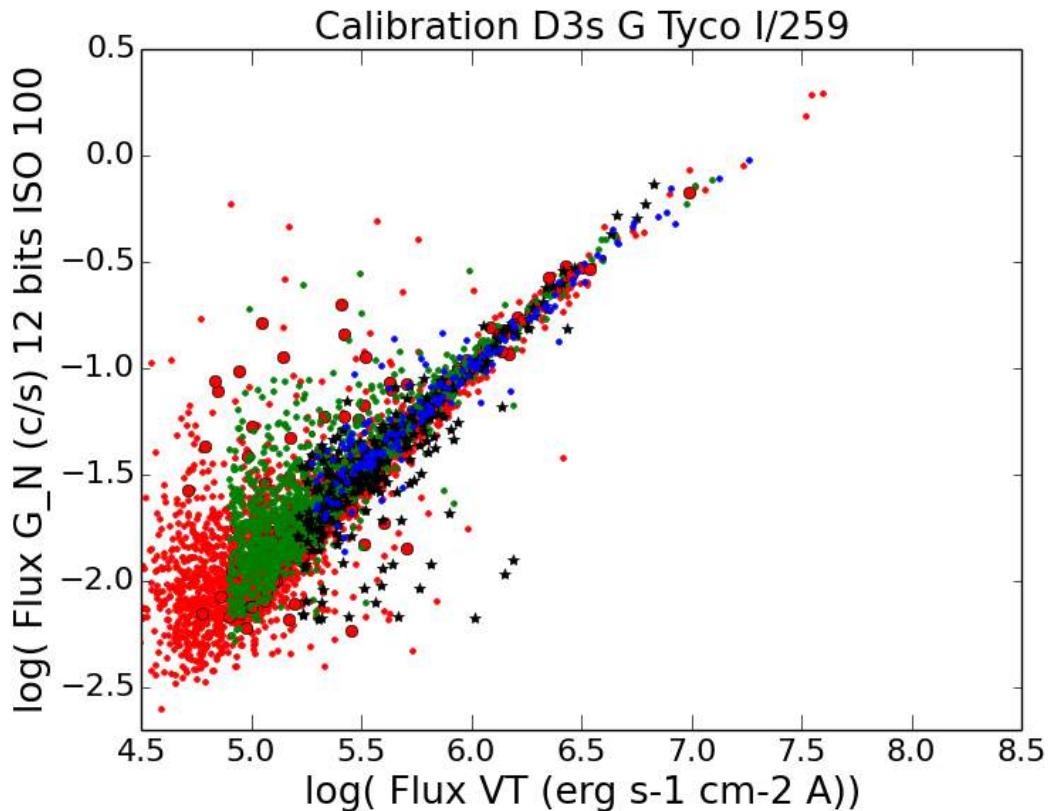


Figura 3.15: Medidas de flujo observado en banda G de Nikon (eje y) comparado con el flujo calibrado (eje x) en el catálogo Tycho. En puntos rojos la imagen iss030e101856, en puntos verdes, iss037e009482, en círculos rojos, iss037e005930, en estrellas negras, iss037e010614 y en puntos azules, iss038e039834.

Se presenta en la figuras 3.15 y 3.16 en la mismas gráficas las medidas de las 5 imágenes empleadas una vez corregidas de los efectos de los ajustes de configuración. Se observa cómo existe una continuidad en la relación y cómo los colores correspondientes a diferentes imágenes

Imagen	Tiempo de exposición	Bits Per Sample	ISO
iss038e039834	0.5	14	6400
iss037e010614	0.8	12	4000
iss037e009482	0.8	14	5000
iss037e005930	1	14	10000
iss030e101856	0.8	12	8000

Tabla 3.1: Ajustes de la D3S en las imágenes de calibración.

se superponen. Se aprecia además que tienen exposiciones diferentes y por tanto, por ejemplo la imagen iss030e101856 (puntos rojos) es más profunda que la iss037e009482 (puntos verdes) y esta más que la iss038e039834 (puntos azules). Esto es lo que se espera a partir de los ajustes de la cámaras en la Tabla 3.1.

Evidentemente, cuando tratamos de identificar de manera automática objetos cerca del límite de detección, aparecen una cantidad muy importante de valores atípicos debido a errores de identificación o presencia de rayos cósmicos o ruido en las cercanías del objeto. Además otros objetos de brillo variable pueden aparecer en la muestra. Sin embargo, es evidente que existe un límite a partir del cual no hay señal ruido suficiente para garantizar las detecciones. La imagen iss037e005930 tiene la mayor ganancia y tiempo de exposición pero al usarse una ganancia tan alta, el ruido crece y los objetos más débiles pasan a confundirse con el ruido. En el extremo superior se aprecia cómo se hace patente la no linealidad del detector debido al sistema anti-bloomig del que hablaremos en la sección 3.5.

Con el objetivo de hacer una calibración de calidad y homogénea, se eligió el catálogo Ducati (2002) de estrellas brillantes, ya que a pesar de su escasez de estrellas, tiene datos en las 3 bandas de interés y además hay información sobre la variabilidad de las estrellas seleccionadas. Estas estrellas variables fueron retiradas de la calibración. Otro punto positivo es que tiene estrellas desde la magnitud 4 a la 9, rango de magnitudes que no es común en los catálogos astronómicos. Es importante tener en cuenta que las magnitudes de este catálogo están en el sistema fotométrico de Vega y han sido corregidas a sistema fotométrico AB mediante las correcciones publicadas por Frei & Gunn (1994) (Tabla 2).

3.4.8. Efecto de la extinción

La extinción atmosférica es uno de los efectos que modifican el brillo de las estrellas vistas desde la superficie terrestre. De igual manera, podemos estimar cual es la caída de brillo

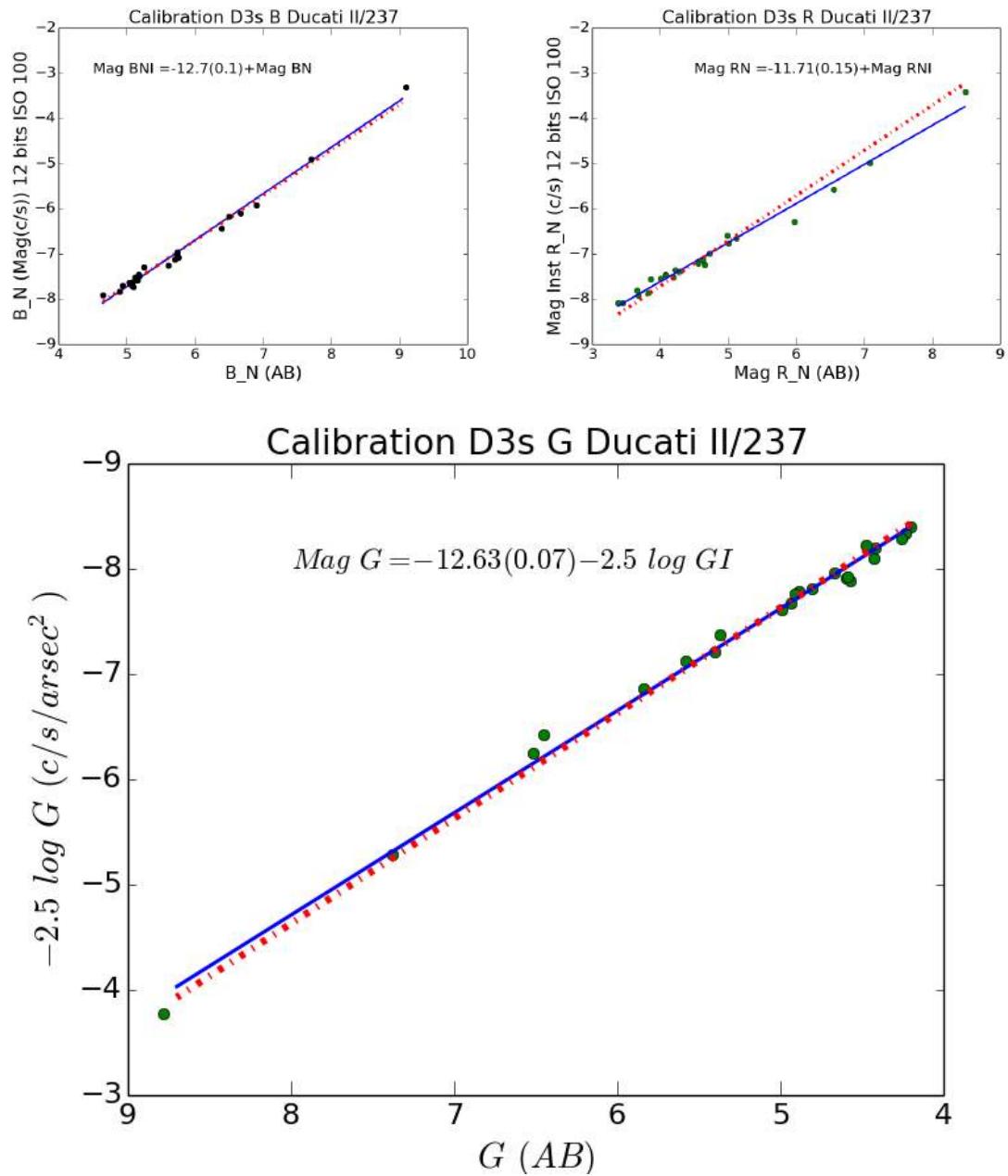


Figura 3.16: Ajustes al brillo en magnitudes instrumentales, comparadas con las magnitudes deducidas para la banda observada, a partir de los catálogo de Ducati (2002) y los términos de color calculados en la Figuras 3.12 (a), (b) y (c) a partir de fotometría sintética.

de las fuentes de contaminación lumínica que recorren el mismo camino óptico, pero de manera inversa.

De manera teórica, el contenido de aerosoles, junto a la difusión Rayleigh por la atmósfera y la extinción por ozono son los componentes que explican la extinción astronómica (Henden

& Kaitchuck 1982).

$$m = m_0 + k/\cos z \quad (3.7)$$

$$m - m_0 = -2.5 \log F/F_0 \quad (3.8)$$

$$F/F_0 = 10^{-0.4m_0} \times 10^{k/\cos z} \quad (3.9)$$

$$F/F_0 = K \times 10^{-0.4m_0} \quad (3.10)$$

$$K = Er + A_{aer} + A_{oz} \quad (3.11)$$

$$A_{aer}(\lambda, h) = A_0 \lambda^{-\alpha} \exp(-h/H) \quad (3.12)$$

$$A_{oz}(\lambda) = 1.11 T_{oz} k_{oz}(\lambda) \quad (3.13)$$

$$A_{Ray}(\lambda, h) = 9.4977 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^4 \left[\frac{(n-1)\lambda}{(n-1)_{\lambda=1}} \right] \times \exp \left(\frac{-h}{7.996} \right) \quad (3.14)$$

A partir de (Hayes & Latham 1975), donde m es el brillo en magnitudes de una estrella. m_0 es el el brillo la estrella fuera de la atmósfera. F es el Flujo observado y F_0 Flujo medido fuera de la atmósfera. z El ángulo de inclinación. n es el indice de refracción, h es la altitud y H es una altura de referencia fijada a 1.5 km. α es un parámetro que junto a A_0 caracterizan el comportamiento de los aerosoles (Green 1992).

Estos parámetros también son medidos por parte de los investigadores de Ciencias de la Atmósfera, sin embargo típicamente las medidas de contenido de aerosoles se realiza de manera diurna por observación de la luz del sol (Holben et al. 1998; Dubovik & King 2000) o mediante medidas de satélite (Herman et al. 1997) midiendo toda la columna de atmósfera, no específicamente en montañas. Sin embargo, las medidas de extinción en astronomía se realizan de noche en observatorios astronómicos en altura. De esta manera, Hsu et al. (1999) encuentran una relación lineal entre los aerosoles medidos por satélite y los medidos desde tierra mediante observación solar.

En general no se debe extrapolar la extinción observada desde satélite a todos los lugares, dado que para algunas situaciones extremas pueda haber correlación entre ambos factores (Siher et al. 2004). En general esto no es así para lugares tan especiales y con micro climas como son los observatorios astronómicos (Varela et al. 2004).

Un tema aparte es la medida in-situ de los aerosoles. Aubé et al. (2005) y Jones et al. (2014) sugieren de hecho el uso del brillo de cielo debido a la contaminación lumínica en primer caso y debido a la Luna en el segundo pueden ser usados para la medida nocturna del contenido de aerosoles.

En un futuro podrá usarse la estación de medida del Observatorio UCM para caracterizar este efecto con mayor exactitud dado que en menos de un kilómetro cuadrado conviven un

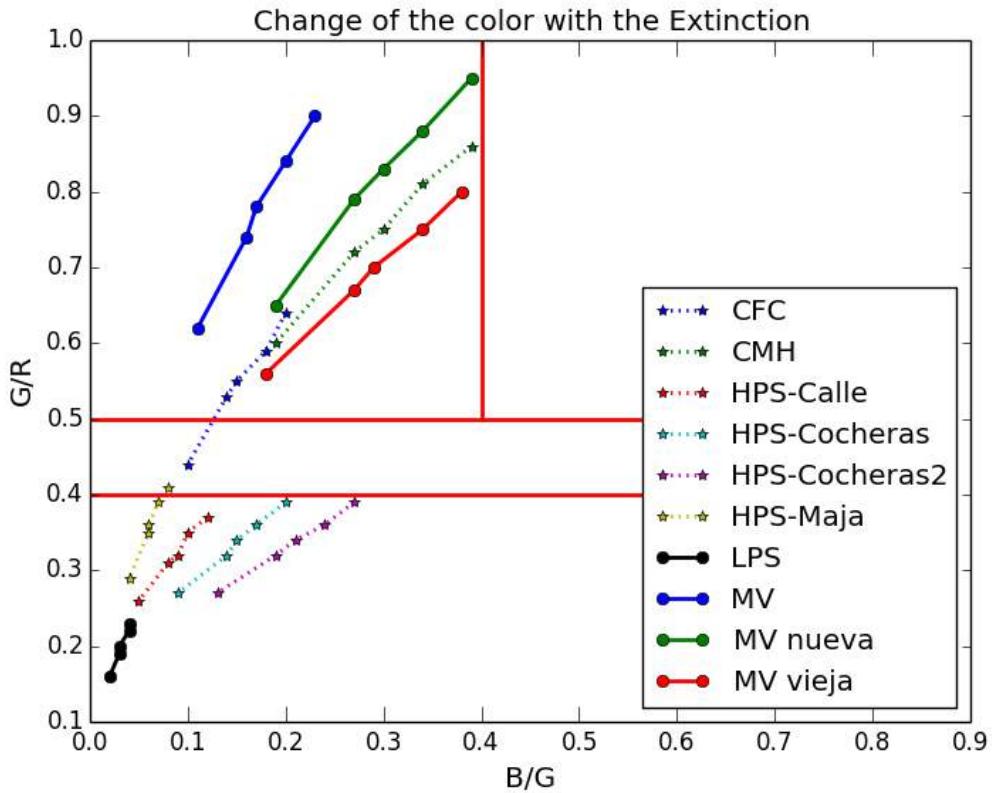


Figura 3.17: Los puntos corresponden a diferentes extinciones y alturas. El punto más cercano a la esquina superior izquierda corresponde al color en laboratorio, el siguiente a $k_B = 0.3, k_V = 0.15$ y $k_R = 0.08$ (alias baja extinción) con inclinación de 0 grados, el siguiente igual extinción pero inclinación de 60 grados. Los siguientes con extinciones de $k_B = 0.81, k_V = 0.41$ y $k_R = 0.2$ (alias alta extinción) a inclinaciones de 0 grados y 60 grados. Los puntos corresponden a la aplicación de los valores mostrados en la tabla 3.2 y los espectros de la tabla 2.3. Se observa que salvo para el caso extremo de alta extinción y alta inclinación, los colores de las fuentes se mantienen en el entorno marcado por las líneas rojas que delimitan las regiones que clasificamos las lámparas en la sección 3.36

Banda	B				V				R			
$\delta\theta/K$	0.3	0.4	0.63	0.81	0.15	0.2	0.32	0.41	0.08	0.1	0.16	0.2
0	0.76	0.69	0.56	0.47	0.87	0.83	0.75	0.69	0.93	0.91	0.86	0.83
10	0.76	0.69	0.55	0.47	0.87	0.83	0.74	0.68	0.93	0.91	0.86	0.83
20	0.75	0.68	0.54	0.45	0.86	0.82	0.73	0.67	0.93	0.91	0.86	0.82
30	0.73	0.65	0.51	0.42	0.85	0.81	0.71	0.65	0.92	0.9	0.84	0.81
40	0.7	0.62	0.47	0.38	0.83	0.79	0.68	0.61	0.91	0.89	0.83	0.78
50	0.65	0.56	0.4	0.31	0.81	0.75	0.63	0.56	0.9	0.87	0.8	0.75
60	0.58	0.48	0.31	0.22	0.76	0.69	0.56	0.47	0.87	0.83	0.75	0.69

Tabla 3.2: Transmisión de la atmósfera para varios valores de la extinción en la bandas B, V y R. La extinción está expresada en magnitudes(primeras filas).

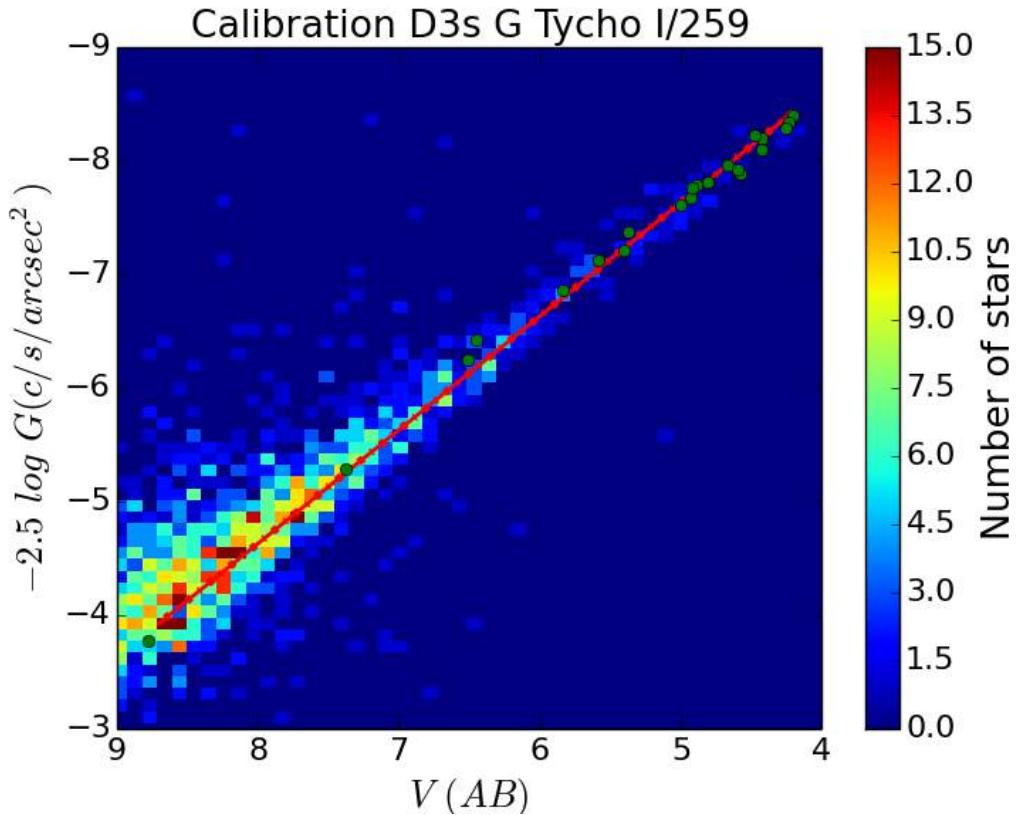


Figura 3.18: Medidas de flujo observado en banda G de Nikon (eje y) comparado con el flujo calibrado (eje x) en el catálogo Tycho. La densidad de puntos corresponde a los objetos de la imagen iss030e101856. La línea roja y puntos verdes corresponden a los ajustes de la figura 3.16

observatorio astronómico, una estación de medida de aerosoles usando espectros de contaminación lumínica (SAND-UCM), una estación convencional de media de aerosoles de AERONET mediante observación solar y una estación LIDAR (Sicard et al. 2011).

Con los datos del AERONET y la cámara AstMon-UCM de 2012 se realizó un breve estudio del brillo de cielo con la cantidad de aerosoles diurnos (Sánchez de Miguel 2013) encontrándose una correlación positiva.

Se debe notar que la extinción influye principalmente en la radiación absorbida. Pero, la dependencia con la inclinación es menos acusada. De esta manera se observa que la perdida de luz para la banda V en un cambio de extinción de 0.15 a 0.4 es de 18 %, en cambio, para extinción de 0.15 magnitudes, de observar en el nadir a 60 grados solo se pierde un 11 % de la luz y un 22 % en el caso extremo de extinción 0.41 magnitudes. Estos órdenes de magnitud son similares a los que producen la diferente transmisión de las ventanas de la ISS, por lo que, como se ha observado, hasta que no sea posible obtener la inclinación y la cantidad de aerosoles, no

es posible restringir dicho parámetro por el momento.

La extinción total que sufre la radiación depende del coeficiente de extinción en el momento de la observación y de la masa de aire (cantidad de atmósfera recorrida). Estas tablas sirven para apreciar que cómo influyen la variación de extinción entre diferentes noches y la inclinación con la que se observa la tierra desde el espacio. Por ejemplo la misma extinción total en banda V (0.69) se encuentra para noches de gran extinción ($K_v=0.41$) y observación en nadir que en noches de extinción típica ($K_v=0.2$) pero observado con gran inclinación (60 grados).

Por otro lado, la diferente extinción en las bandas seleccionadas, hace que los objetos cambien ligeramente de color como se observa en la figura 3.17.

3.4.9. Verificación de la calidad de la Calibración

Existen varios métodos para verificar la calidad de la calibración. En nuestro caso se han realizado dos comprobaciones independientes. La primera comparando los colores observados de las estrellas con los esperados. La segunda, comparando nuestros resultados con otros datos de tierra calibrados como los publicados en fase de prueba por el NOAA. Estos datos corresponden a las observaciones del SUOMI-NPP y su cámara VIIRS/DNB.

Comprobación de colores de estrellas En la figura 3.19 se aprecia cómo existe un acuerdo razonable (compatibilidad con los errores del 91 %, incluso superior al esperado según los datos de catálogo) entre los colores que presentan la mayoría de las estrellas (puntos rojos) y los datos observados (asteriscos negros). Esto demuestra que al menos la calibración relativa entre canales es correcta. Aun así existe una dispersión de hasta 0.4 magnitudes en G-R y 0.2 magnitudes en B-G entre los valores observados y los que deducimos de los valores de catálogo. Gran parte de esta indeterminación es debida a que desconocemos el tipo espectral exacto de algunas estrellas y a la baja precisión fotométrica del catálogo.

Comprobación con fuentes calibradas en tierra Para comprobar si el valor absoluto calculado con la calibración es del orden de magnitud correcto, hemos comparado con las medidas obtenidas por el satélite SUOMI-NPP y su cámara VIIRS/DNB (Liao et al. (2013), Mills et al. (2010), Baugh et al. (2013), Mills (2010)). Este satélite proporciona datos calibrados (Mills et al. 2010). En el momento de escribir esta memoria hay publicados 5 mosaicos globales de toda la tierra en diferentes épocas. Tres de ellos corresponden a datos de un mes y uno de ellos corresponde a datos de dos meses (tabla 3.3).

La banda de observación DNB (*Day/Night Band*) es una banda ancha de $\sim 3750\text{\AA}$ de ancho desde ~ 0.5 micras a ~ 0.9 micras (véase la Fig. 3.20). Sin embargo, la anchura efectiva

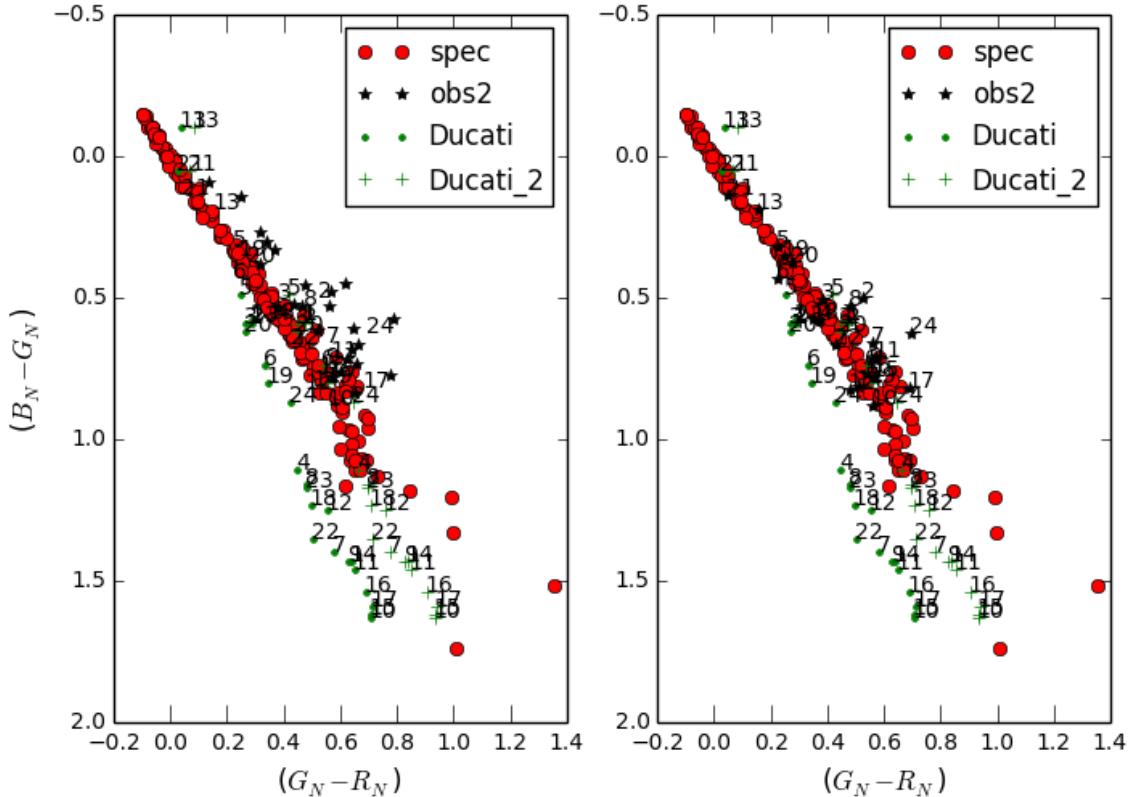


Figura 3.19: (panel izquierdo) Colores esperados de las estrellas según la calibración de la Figura 3.16 valores de punto cero: $B=12.7(0.1)$, $G=12.63(0.07)$ y $R=11.71(0.15)$. Se puede observar que hay un desplazamiento general de los puntos negros (observados) con respecto a los calculados sintéticamente (rojos) o medidas en el catálogo de Ducati (2002) (verde). Los puntos verdes sólidos han sido corregidos con un término de color de 1er orden y las cruces con un término de color de 2º orden. (panel derecho) Ídem con valores de punto cero: $B=12.75$, $G=12.63(0.07)$ y $R=11.8$. Misma figura que anteriormente donde se han desplazado ligeramente los puntos haciendo los coincidir con la tendencia general (puntos rojos) variando los puntos cero del canal Rojo y Azul dentro de los márgenes de error.

del filtro es de 3302\AA con longitud de onda efectiva de 6930\AA . Este sistema sencillo de una sola banda muy ancha ha sido diseñado para registrar la actividad humana nocturna y por eso abarca las principales líneas de emisión de las lámparas de descarga más utilizadas como puede apreciarse en la Fig. 3.20. Las lámparas más comunes son las de sodio de baja presión (LPS,

Tipo de mosaico	Fechas
Mensual	05/2014
Mensual	01/2013
Mensual	10/2012
Mensual	04/2012
Bimensual	18-26/04/2012 11-23/10/2012

Tabla 3.3: Mosaicos disponibles de imágenes del VIIRS

Low Pressure Sodium), Sodio de alta presión (HPS, *High Pressure Sodium*), vapor de mercurio (MV, *Mercury Vapor*) y halogenuros metálicos (MH, *Metal Halide*). La señal en la banda DNB indica la presencia de fuentes de emisión pero no se puede distinguir entre tipos de luminarias al ser un sistema fotométrico de una sola banda. Por tanto, el valor de la radiancia esta promediado en toda la banda, siendo imposible distinguir entre diferentes características espectrales.

Calibrar usando las medidas de una zona con iluminación mixta cuyo espectro sea el resultado de la combinación de los espectros de diferentes tipos de lámparas es muy difícil ya que VIIRS/DNB no permite obtener información espectral. Para facilitar el trabajo se ha elegido trabajar con datos de la isla de La Palma (ver figuras 3.22 y 3.23) donde según Aubé & Kocifaj (2012) entre el 80% y el 90% del flujo emitido corresponde a lámparas LPS⁹. Estas lámparas de sodio de baja presión pueden considerarse como monocromáticas ya que la emisión en el doblete en 589.0 y 589.9 nm supone el 99% del espectro en la banda VIIRS/DNB. Este test reduce los parámetros libres ya que se puede suponer que toda la emisión se realiza a la longitud de onda del doblete del sodio. El flujo que se mide con VIIRS/DNB es el correspondiente al emitido por las lámparas multiplicado por la transmisión del filtro en esa longitud de onda. Si además queremos transformar nuestros flujos monocromáticos a la banda pancromática, debemos multiplicar por el ancho de banda de VIIRS/DNB.

Las unidades en las que se distribuyen los datos de las imágenes VIIRS/DNB son nW/cm²/sr. Para convertir desde mag/arcsec² a unidades de radiancia, se ha transformado en primer lugar el brillo superficial a unidades de energía usando la definición de las magnitudes AB:

$$AB = -2.5 \log_{10}(flux) - 5 \log_{10}(w) + 2.401 \text{ Flux} [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{arcsec}^{-2} \text{\AA}^{-1}] \quad (3.15)$$

Para la transformación entre arcsec² a sr (estereoradianes) es necesario multiplicar por 4.254517 · 10¹². La transmisión de la banda VIIRS/DNB en la longitud de onda de la emisión de la lámpara de baja presión de sodio es del 80.6 %.

⁹Comunicación privada de Javier Castro, OTPC

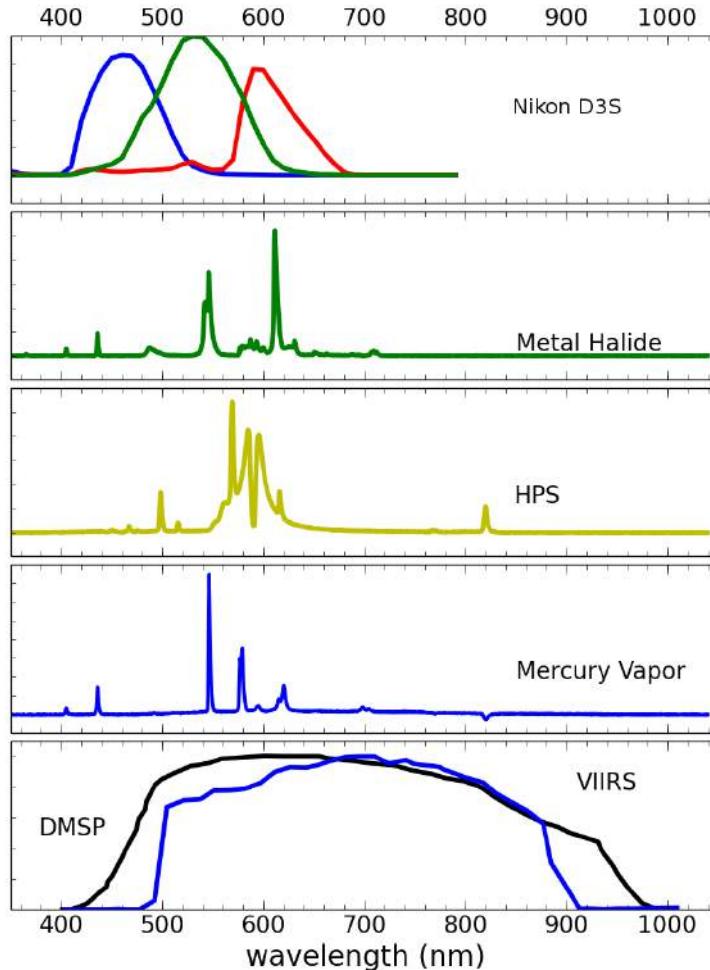


Figura 3.20: Espectros de lámparas usadas en iluminación pública y ornamental junto a las respuestas de los sistemas fotométricos mencionados. Curva respuesta DMSP/OLS por Elvidge et al. (1999), curva respuesta VIIRS/DNB Liao et al. (2013) y la curva respuesta de la Nikon D3S

Para las lámparas de baja presión de sodio, la transmisión del filtro G dividido por la anchura del mismo, es igual a la misma operación que con la respuesta de la banda DNB del VIIRS (en un 97%). Esta casualidad hace que los valores de radiancia obtenidos con el filtro G sean extremadamente similares para este tipo de lámparas a los proporcionados por el VIIRS/DNB si multiplicamos el flujo obtenido en la banda G por el ancho de la banda VIIRS/DNB.

Se ha realizado la medida de la radiancia acumulada en las regiones marcadas en la imagen. La región #15 ha sido utilizada para medir el fondo de cielo (fig. 3.23). En la figura 3.24 se detalla el análisis cuantitativo de la comparación entre los datos de la ISS y los datos de la cámara VIIRS/DNB.

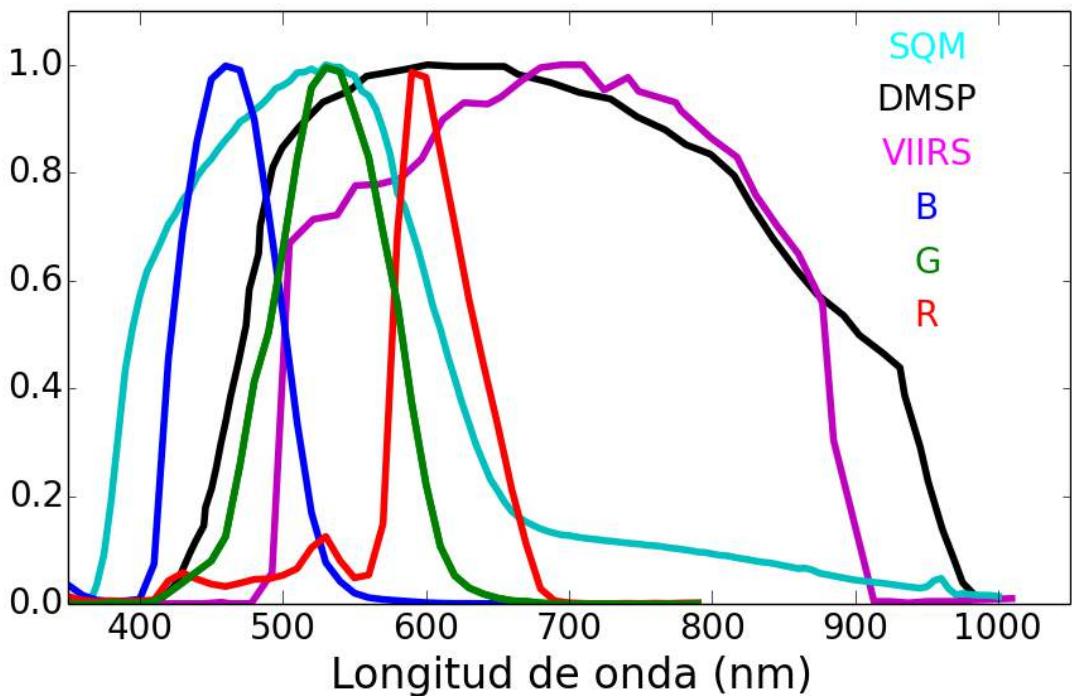


Figura 3.21: Respuesta spectral de los canales RGB de la cámara Nikon D3S y de las bandas nocturnas de las misiones espaciales DMSP/OLS y VIIRS y del fotómetro SQM.

3.5. Corrección de linealidad: Efecto del Anti-blooming

El Anti-blooming o sistema anti derrame (sin uso en castellano) es un sistema para ampliar el rango dinámico de los sensores de estado sólido a costa de la pérdida de linealidad en un determinado rango. Este sistema es común en cámaras Réflex digitales comerciales tanto con chips CCD como CMOS. Para corregir este efecto, utilizando el mismo montaje que en la figura 3.6, se tomaron imágenes de campo plano con todo el rango de tiempos de exposición en tercios de paso para dos valores de ISO, 200 y 1600. Se ha observado que la linealidad se conserva en 14 bits prácticamente desde 100 cuentas hasta 10.000 cuentas para todos los ISO. La parte menor de 100 cuentas presenta problemas derivados del sistema de reducción de ruido ya comentados en la sección 3.3.1 y a que a muy bajos tiempos de exposición aparecen fenómenos como el parpadeo de las fuentes, la frecuencia del reloj de la cámara o viñeteo por el obturador (Zissell 2000).

Nikon no proporciona las características de sus sensores, pero otros fabricantes sí las dan, como por ejemplo Texas Instruments. Se puede ver cómo después de alcanzar un determinado

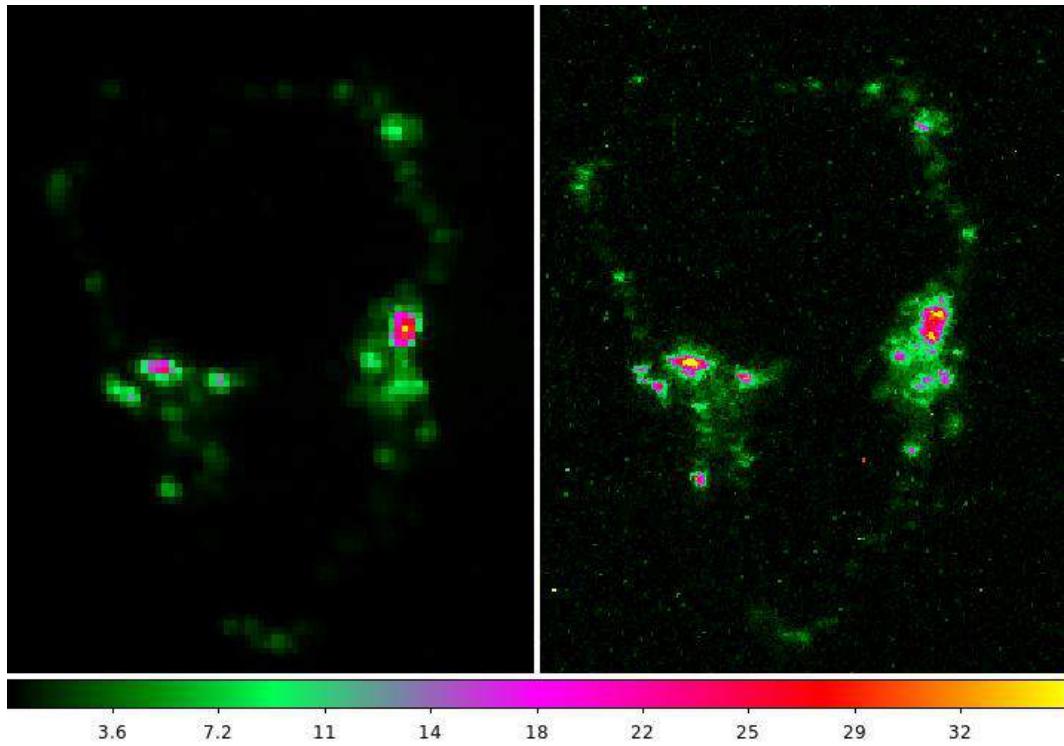


Figura 3.22: Comparación de las imágenes de la isla de La Palma obtenidas en la calibración en la banda G (derecha) con la de referencia del VIIRS/DNB 2013(izquierda). La escala es común a ambas imágenes y está en $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$.

nivel de cuentas, la cámara deja de ser lineal estrictamente. Pero no es totalmente no lineal, simplemente cambia la pendiente de la respuesta de la cámara (ver figuras 3.26 y 3.27). Esa pendiente varía con la ganancia/ISO. Esto explica el diferente comportamiento de las cámaras en el régimen de anti-blooming con los diferentes ISO (Texas Instruments 1991). En resumen, a partir de una determinada señal, la cámara tiene una ganancia diferente. Otros fabricantes sí proporcionan este tipo de información, como se ve en la figura 3.25. Un resultado similar es encontrado por Park et al. (2015) para la linealidad de otra cámara (EOS 550D con filtro de corte infrarrojo eliminado).

3.6. Clasificación de fuentes de contaminación lumínica mediante diagramas de color

En esta sección se discute la posibilidad de clasificar mediante diagramas de color el tipo de fuentes que producen la contaminación lumínica. La clasificación de fuentes de luz mediante imagen multiespectral usando imágenes de la ISS ya fue abordada por Metcalf (2012), sin

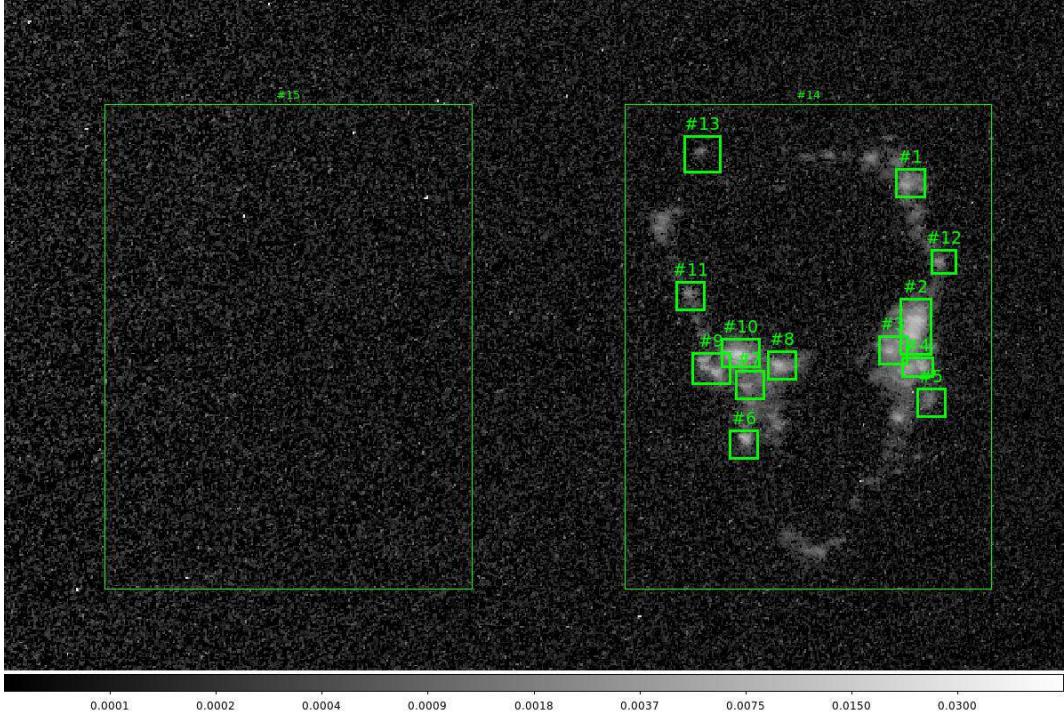


Figura 3.23: Regiones estudiadas de la isla de La Palma. La región #15 corresponde a una zona sin iluminación usada como muestra del fondo, la región #14 corresponde a toda la isla. Las demás regiones corresponden a los principales núcleos iluminados de la isla.

embargo no tuvo en cuenta la respuesta espectral real de la cámara Nikon D3S, sino de la Nikon D3 (Cao et al. 2009).

Existe un discrepancia importante entre la fig 1. de Cao et al. y fig. 3.8 de este trabajo. Aparentemente esta discrepancia se puede deber a no haber corregido de la respuesta espectral del sensor. Además Metcalf (2012) parece que no tiene en cuenta la falta de linealidad por encima de cierto umbral y la mayor parte de la imagen de muestra utilizada (ISS026E006241) está en dicho régimen. Tampoco realiza ninguna calibración con fuentes independientes, lo que sí se ha hecho para esta tesis, por lo que Metcalf (2012) no podía conocer si los colores sintéticos eran correctos o no. Esto se puede ver claramente en la figura 29 de Metcalf (2012), donde el centro del núcleo está saturado y no se considera, la zona adyacente está en régimen no lineal y es identificada de manera incorrecta, y sólo en las partes exteriores, donde no está saturada la imagen, sí se identifica correctamente la lámpara. Esto es identificado por Metcalf (2012) fig. 30, pero no propone ninguna solución.

En esta sección se aborda una metodología diferente, no tan ambiciosa como la de Metcalf (2012), que pretendía identificar únicamente el tipo de fuente para cada píxel. Para evitar la

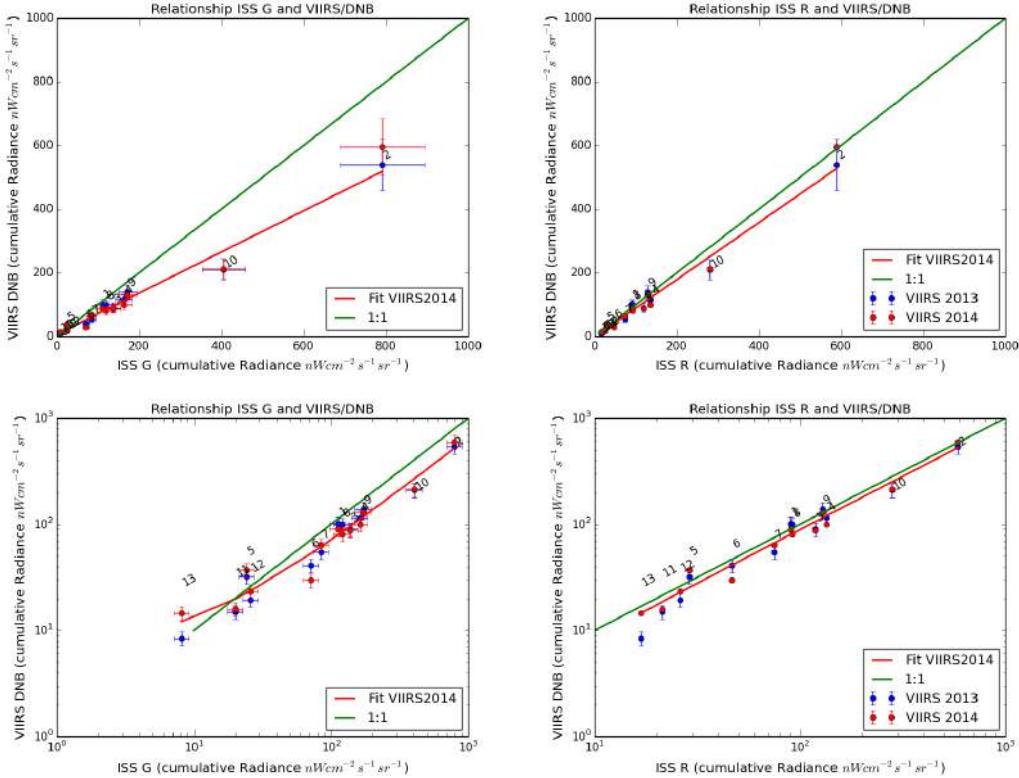


Figura 3.24: Relación entre las radiancias acumuladas comparadas entre la imagen de la derecha ISS y izquierda VIIRS (fig. 3.22). Se ha corregido el efecto de la diferente resolución. La línea roja corresponde a la pendiente 1:1. La diferencia entre ambas es compatible con un método diferente en la sustracción del fondo, con la incertidumbre en la calibración y las fuentes encendidas a las diferentes horas de las tomas. Esto nos indica que la calibración realizada es correcta.

confusión píxel a píxel, en la primera aplicación se ha integrado todo el flujo de una región. Y en la segunda se ha aplicado un filtro de mediana 5×5 a cada píxel antes de establecer la clasificación final.

3.6.1. Aplicación a la isla de la Palma

La isla de La Palma es uno de los lugares privilegiados del mundo para la observación astronómica. Por ello se sitúa en el Observatorio del Roque de los Muchachos el Observatorio Europeo del Hemisferio Norte (ENO). Las condiciones excepcionales de este emplazamiento ya fueron puestas de manifiesto por Muñoz-Tunón et al. (1997) y confirmado por Benn & Ellison (1999). Para proteger el observatorio se aprobó una ley que protege los cielos de la Isla de

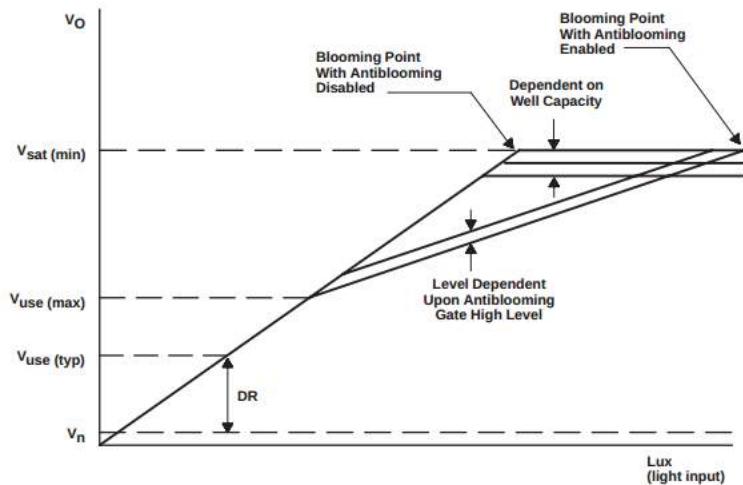


Figura 3.25: Ejemplo de información sobre el comportamiento del anti-blooming de (Texas Instruments 1991).

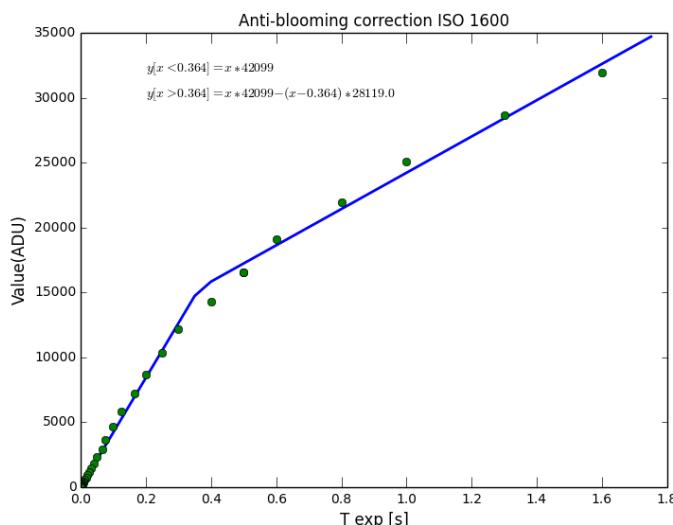


Figura 3.26: En la figura se observa cómo varía la señal recibida por la cámara para un campo plano de iluminación constante. Claramente la señal aumenta con el tiempo de exposición. Se aprecian dos regímenes claros en la respuesta de la cámara a un campo plano. Se han ajustado dos rectas.

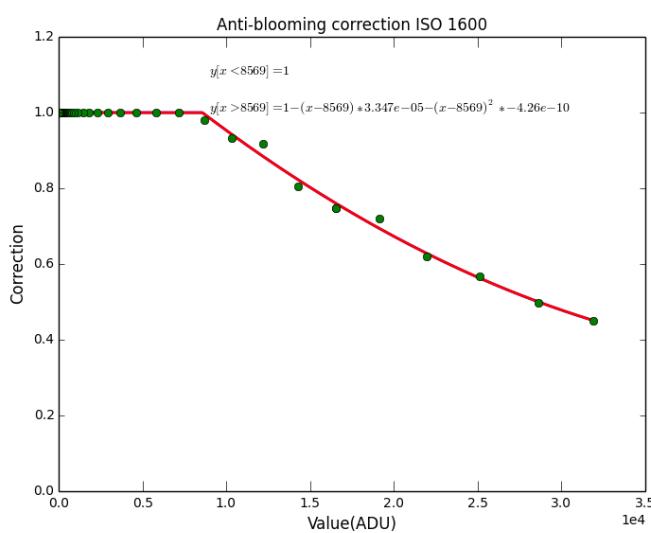


Figura 3.27: Tomando como referencia la figura 3.26, se considera que no es necesaria corrección a la señal hasta un determinado valor y sí es necesaria una corrección en adelante. Para corregir este efecto se han ajustado la corrección de linealidad en dos tramos con una función paso de tres parámetros mediante la rutina de `numpy.optimize.leastsq`.

La Palma y parte de la Isla de Tenerife¹⁰. En esta ley se establece la prohibición del uso de Halogenuros Metálicos (MH), lámparas de Vapor de Mercurio (MV), LED y lámparas de alta presión de sodio después de las 24:00. Por ello, la tele detección y clasificación del tipo de fuentes es de gran importancia en esta isla.

La imagen con la que se realiza nuestro estudio (ISS037-E-51739) fue tomada con anterioridad a las 24:00, por lo que a esa hora aún no están prohibidas algunas de estas fuentes de iluminación. Por ello mismo podemos usar esto para ver cual abundantes son este tipo de fuentes. En otras imágenes podríamos determinar otros colores.

En el figura 3.28 se representan en puntos negros y flechas rojas los valores de los ratios G/R y B/G correspondientes a las regiones medidas en la figura 3.23. Es necesario que estos cocientes sean sobre los datos calibrados para que puedan coincidir con los colores sintetizados a partir de espectros (las estrellas verdes). Para las 5 regiones con flechas rojas lo más probable es que dominen las fuentes de iluminación de baja presión de sodio (5, 12, 11, 13 y 14). Para todos los puntos negros restantes salvo el 6 (Puerto Naos y Hotel Sol), parece que existe una mezcla mayor o menor de fuentes LPS y HPS. Esto es especialmente notable para 10 y 2 que corresponden a Santa Cruz de la Palma y Los llanos de Eridane, que son las poblaciones más importantes de la Palma. El punto 6 está claramente segregado del resto. Si bien existen lámparas de alta presión de sodio de gran potencia que pueden proporcionar dichos colores (HPS-C1 y HPS-C2 corresponden a las potentes luminarias de las cocheras del metro de Madrid), lo más probable es que sea una combinación de MH y HPS o LPS. Además una inspección cuidadosa en Google maps nos muestra cómo ese lugar corresponde a una cadena hotelera y tiene pistas de tenis.

Tras examinar la figura 3.28, se puede concluir que la mayor parte de las regiones presentan colores compatibles con que las fuentes dominantes sean de LPS, como se espera. Sin embargo, las zonas más brillantes de la isla como son las zonas 2, 10, 8 y 6 presentan unas desviación importante en la fotometría esperada para lámparas de LPS. Por tanto son zonas a vigilar. La contribución en flujo correspondiente a esas zonas supone el 49 % del flujo total de la isla, por lo que nos podemos plantear si realmente es válida la afirmación de Aubé & Kocifaj (2012) de que antes de las 24:00 el 80 % de iluminación es LPS. De manera adicional, mediante comunicación privada, Javier Díaz Castro (OTPC¹¹), indica que en ocasiones el cambio no se realiza en algunas zonas, por lo que este efecto puede ser mayor de lo que se espera después de las 24:00. No obstante, el color de la región #14 que engloba la isla completa sí cuadra con la posibilidad de que dominen las lámparas LPS en la isla, excepto en los lugares citados. Para dilucidar esta cuestión es necesario disponer de imágenes con mayor señal ruido, las cuales ya

¹⁰25332 LEY 31/1988

¹¹ Oficina Técnica para la Protección de la Calidad del Cielo

han sido requeridas a la Agencia Espacial Europea. Esta técnica por tanto puede ser utilizada para verificar el cumplimiento de la Ley del Cielo de Canarias.

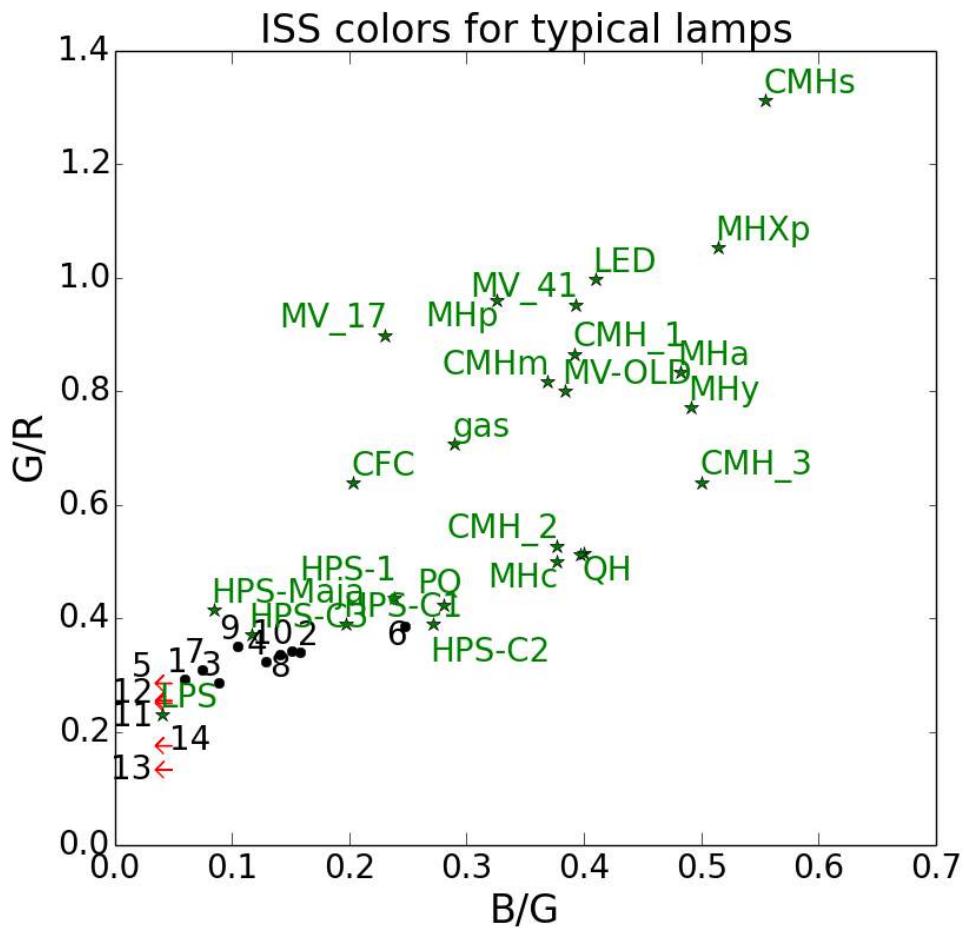


Figura 3.28: Ratios entre los canales G/R y B/G para las regiones mostradas en la fig. 3.23 en color negro. En verde los valores teóricos de los espectros calculados mediante fotometría sintética a partir de espectros reales. Las flechas rojas indican puntos en los que no hay suficiente señal en el canal azul para dar una estimación del valor real del cociente B/G. Espectros tomados de Tapia Ayuga et al. (2015).

3.6.2. Aplicación a la corona metropolitana de Madrid

Madrid es, con mucho, la provincia con mayor población y consumo en alumbrado público de España y también la de mayor emisión. Si comparamos la capital y su corona metropoli-

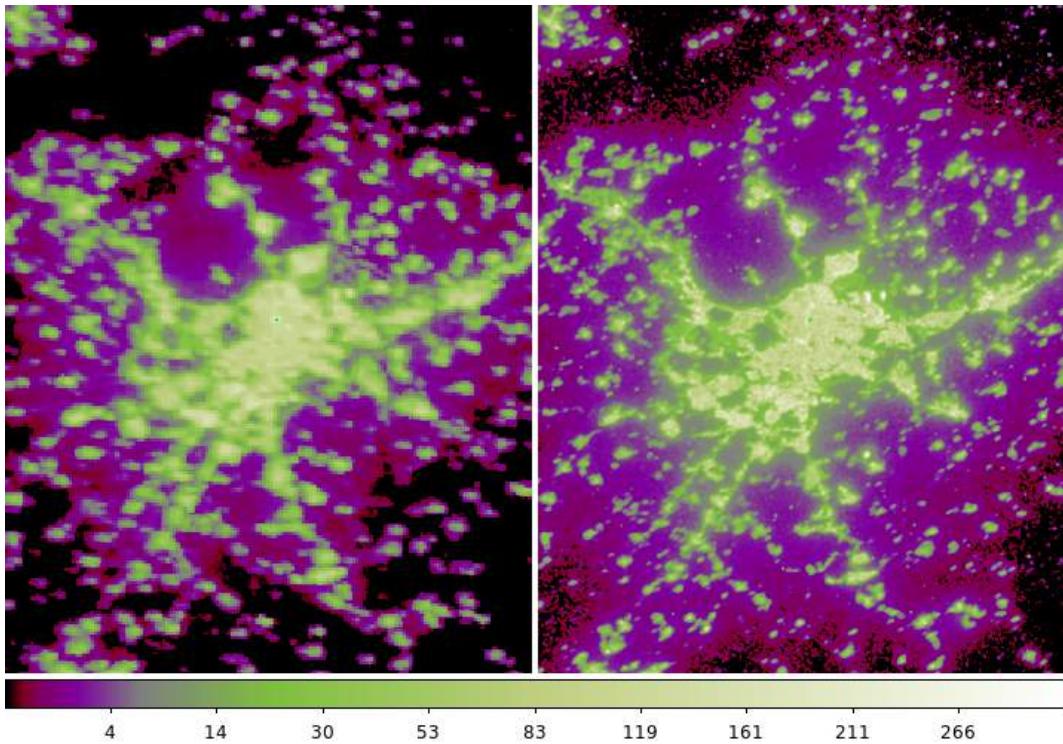


Figura 3.29: Imagen de Madrid y alrededores desde VIIRS (izq.) mayo 2014 e ISS 26-27/07/2014 (dcha.).

tana con el resto de su región de influencia, la primera emite 1.08 GW/sr ($\sim 30\text{km}$), frente a los 0.58 GW/sr que emite su zona externa ($\sim 100\text{km}$), a pesar de estar en dicho círculo exterior de influencia capitales de provincia como Guadalajara y otras ciudades importantes como Segovia o Toledo (Véase fig. 3.32).

La imagen 3.29 corresponde a la toma del 26 de julio de 2014 a las 23:59:55.4 TU comparada con el mosaico bimensual de VIIRS de 2012 ($\sim 1 : 30$ TU.). Se ha realizado una calibración como se describe en el caso anterior y posteriormente se ha escogido un grupo de imágenes para hacer una composición de alto rango dinámico (HDR) (fig. 3.30). Las imágenes utilizadas son ISS040E081262 y ISS040E081258. Como se puede apreciar en la figura 3.31, se han escogido estas dos imágenes dado que son las imágenes con mayor recubrimiento fotométrico. La imagen 58 fue tomada con el objetivo Nikkor 85 mm f/1.4D IF, con un tiempo de exposición de 1/8 s, la 62 con idénticos ajustes salvo el tiempo de exposición (1/100 s). Esta diferencia de tiempo de exposición nos permite escoger de cada imagen la región con mejor señal ruido de cada una, pero a su vez no saturada. Se observa cómo en todas las tomas hay una parte significativa de la imagen que supera las 10.000 cuentas en la región central de Madrid. Por tanto, esas zonas están en la región no lineal. Esto es cierto para todas las imágenes salvo la ISS040E081262. En

cambio, en general la zonas no iluminadas de Madrid (Casa de Campo, Monte de El Pardo y regiones no urbanizadas, tienen poca señal excepto en la imagen ISS040E081258. Por ello, se han compuesto estas dos imágenes de tiempos de exposición diferentes para aumentar el rango dinámico.) Una vez corregidas las imágenes de sus ajustes según la ecuación 3.6, la calibración del canal G (Fig. 3.19) y el ancho de banda de VIIRS/DNB (3302Å). Para hacer la composición se realizó una máscara de selección de píxeles en torno a los $0.6 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}/\text{\AA}$. Previamente a la composición lineal hay que realizar una rectificación de las imágenes mediante puntos de control como se describe en la sección 4.3.2, se ha escogido interpolación bilineal para el remuestreado de la imagen. La ser imágenes muy cercanas en el tiempo, hay poca diferencia de ángulo entre ellas y el solapamiento es casi perfecto(tan solo se pueden observar pequeñas sombras en el lado noroeste de algunos municipios en la fig. 3.30).

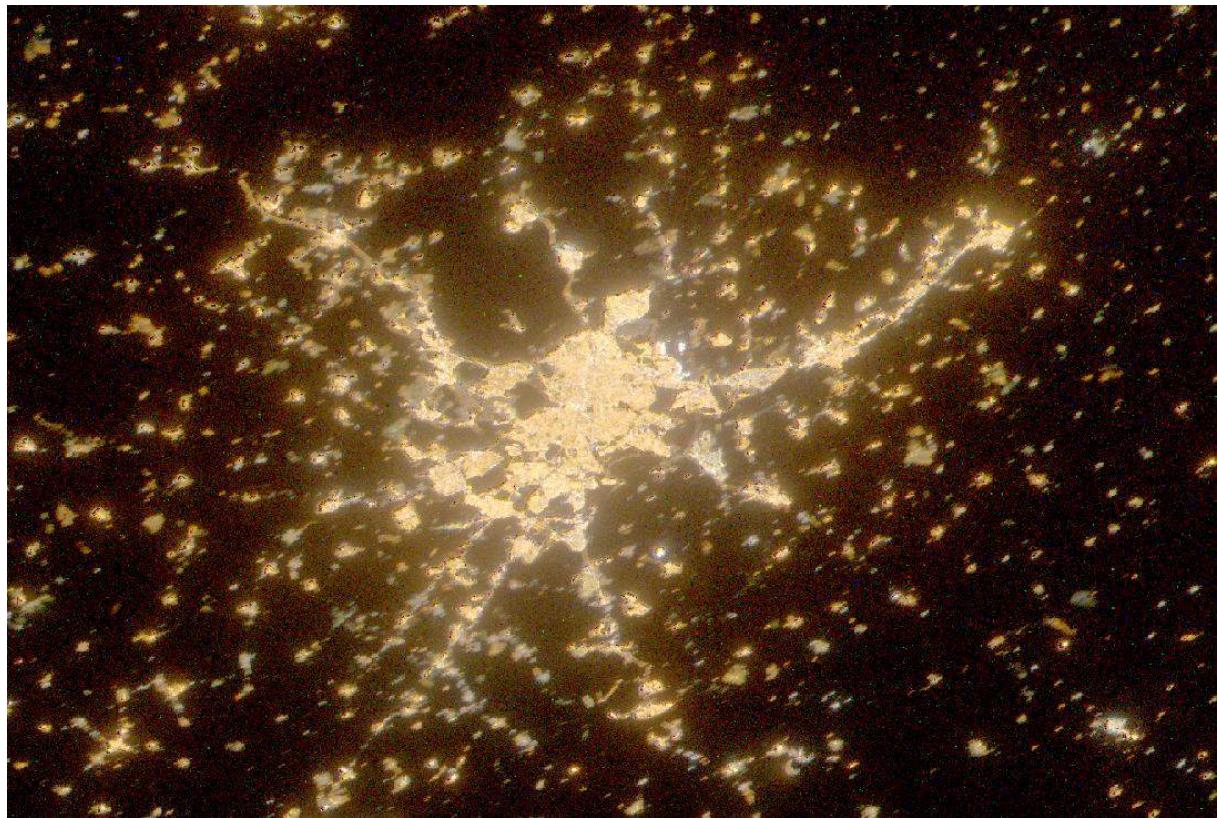


Figura 3.30: Composición de imágenes ISS en HDR de Madrid y alrededores.

Se puede apreciar en la figura 3.29 que la parte difusa de la imagen tiene un alcance mayor que la de VIIRS/DNB. Esto se debe a que el contenido de aerosoles fue alto en esa fecha en comparación con el contenido de aerosoles en que fueron tomadas las imágenes de VIIRS/DNB de 2014 (0.3 Aerosol Optical Thickness 26-27/07 vs 0.05-0.1 3 y 31/05). Esto se aprecia en la fig. 3.33, donde la parte brillante correspondiente a $0.7-2.5 \log([nWcm^2/sr])$ pasa por la

recta 1:1, pero desde 0.3-0.7 $\log([nWcm^2/sr])$ la relación está desplazada 0.5 $\log([nWcm^2/sr])$ hacia arriba en el caso de la ISS debido a la mayor concentración de aerosoles. A partir de 0.3 $\log([nWcm^2/sr])$, la imagen no tiene señal ruido suficiente para trazar el efecto de la luz difusa visible en VIIRS/DNB.

El mismo ejercicio se ha realizado para las imágenes ISS030E188208 y 10. En este caso estas imágenes fueron tomadas el 28/03/2012 a las 01:58:27 TU, con idéntico objetivo pero apertura 1.6 y exposición de 1/15 s y 1/4 s respectivamente. La diferencia de tiempos de exposición es menor por lo que rango dinámico también es menor. Además, en este caso la imagen fue más zenital y por tanto menor campo. El contenido en aerosoles fue de 0.1 Aerosol Optical Thickness, por lo que fue mucho más similar al de la imagen de VIIRS/DNB. Esto se pone de manifiesto en la figura 3.34.

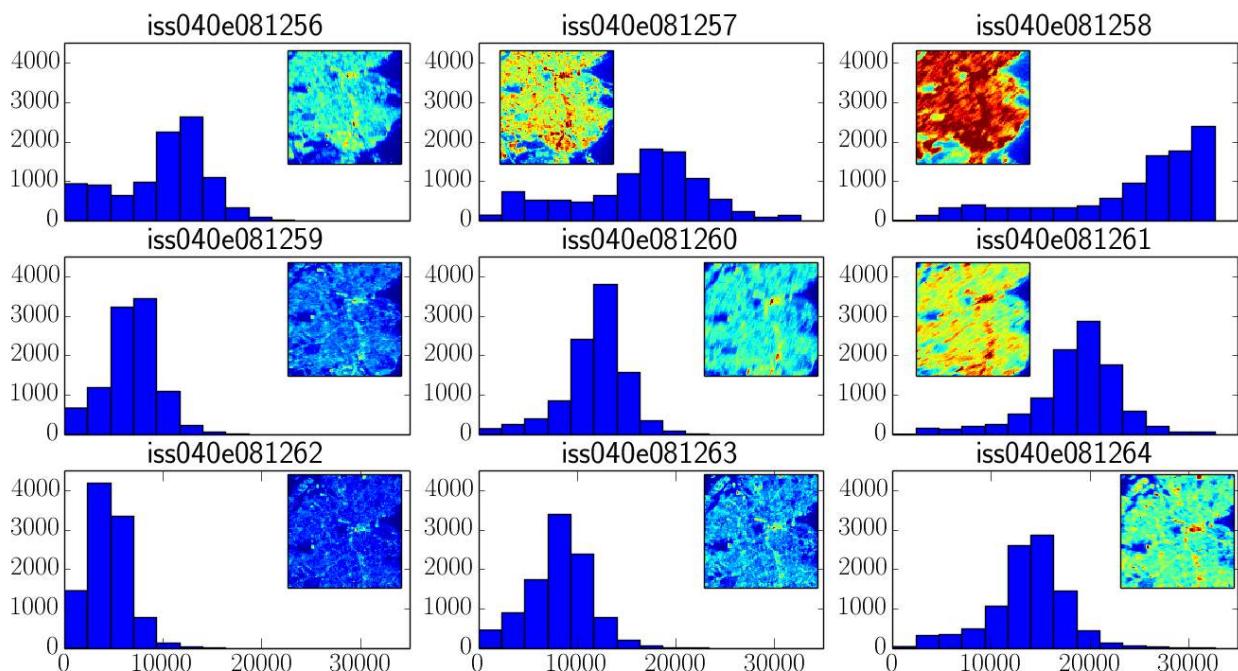


Figura 3.31: Histograma de las imágenes de la serie ISS40E081256-64.

Una vez comprobada la validez del proceso de calibración, se puede aplicar la selección por diagramas de color a las diferentes imágenes de Madrid de las que se dispone. Hemos probado a realizar una categorización mediante algoritmos de “clustering” o separación de poblaciones. Se ha probado a realizar una clasificación automática utilizando el algoritmo *Logistic Regression 3-class Classifier* de Pedregosa et al. (2011) tomando como referencia tres zonas características del mismo área (fig 3.35) en las zonas descritas en la tabla 3.4. Se aprecia que

aunque no disponemos de espectros que tengan un ratio B/G mayor de 0.55 (véase figura 3.28), en el gráfico 3.35 aparecen puntos con B/G hasta 2. Esto es debido a la saturación y falta de linealidad. Al saturar a un menor nivel el canal B que el canal G, este canal no sufre estos efectos. Cuando calibrados, se compensan los efectos y aparecen valores altos de B/G. Este efecto también se aprecia en G/R pero es menos acusado. Este método proporciona unas regiones que empíricamente podemos suponer que corresponden a HPS, MV y MH, pero también observamos que hay bastantes zonas de mezcla. Para evitar sesgos en regiones es necesario contar con imágenes de mayor resolución, como las que se pueden obtener con las técnicas descritas en el capítulo .

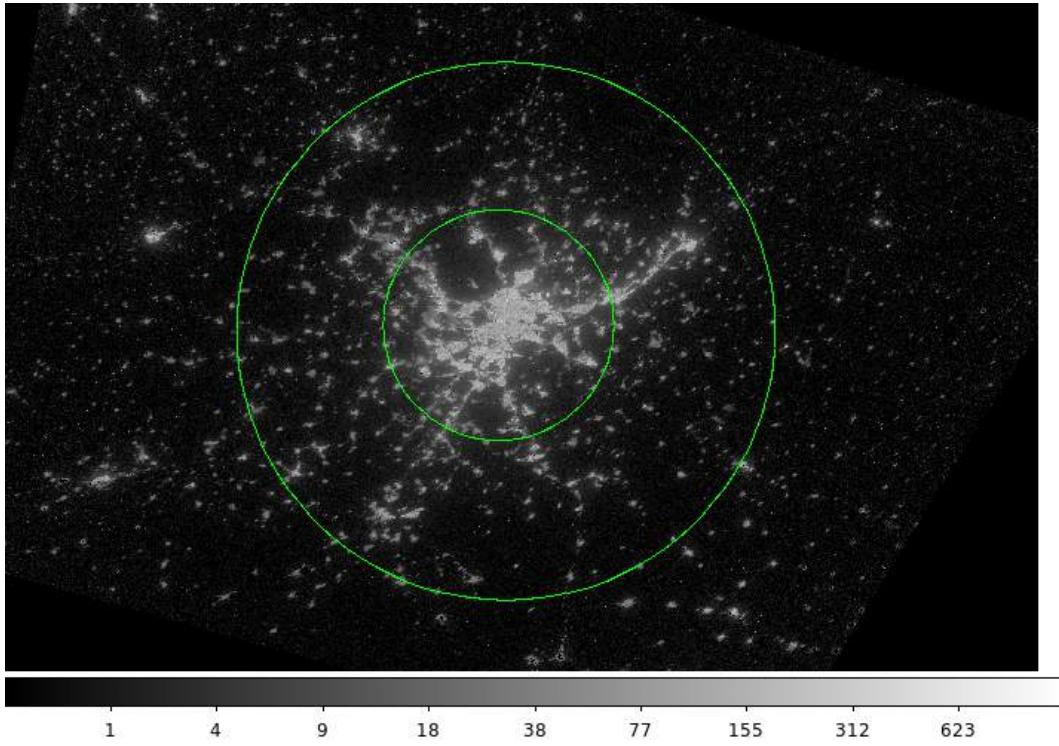


Figura 3.32: Detalle de la regiones corona y anillo exterior utilizadas en la medida. Iguales de la tabla 2.2

Teniendo en cuenta el efecto de la extinción estudiado en la sección 3.4.8 se han definido visualmente unas regiones del diagrama B/G vs G/R que corresponderían a lámparas HPS, MV y MH (fig. 3.36). Estas regiones corresponden a HPS con $G/R < 0.45$ y $B/G < 0.4$, MV con $G/R > 0.5$ y $B/G < 0.4$; y MH con $G/R > 0.5$ y $B/G > 0.4$. El resultado de esta clasificación se muestra en la imagen 3.37. Se observa que el 65 % de las zonas iluminadas corresponden a HPS, el 26 % a MH y el 9 % a MV. Este valor no es fijo, ya que Madrid va cambiando su iluminación durante la noche. Esta evolución se aprecia tanto en las imágenes 3.39 como en el brillo de cielo

	Región	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
MV	Campus Somosaguas	40.4303911	-3.7897374
HPS	Valdecarros	40.3578424	-3.58146
MH	Aeropuerto T4S	40.4934997	-3.5639584

Tabla 3.4: Regiones de referencia para clasificación automática.

como veremos en la sección 7.2. Gran parte de este cambio es debido al apagado del alumbrado ornamental de acuerdo con la Ordenanza Reguladora de la Publicidad Exterior ANM 2009 ²¹² que indica que en el periodo comprendido entre el 1 de noviembre al 30 de marzo pueden estar encendidos hasta las 12 de la noche y en el periodo de 1 de abril a 31 de octubre, hasta la 1 de la mañana y 2:30 los viernes, sábados y vísperas de festivo (ver figuras 3.38 y 3.39).

Además de la iluminación que es posible detectar en las imágenes, es importante considerar que también la luz que escapa por las ventanas de hogares, los faros de los coches y los escaparates y otra iluminación exterior de los comercios contribuyen a la cantidad de luz emitida.

Rivas-Vaciamadrid es un municipio de la corona metropolitana de Madrid situado al sur este de la capital. Esta localidad es de especial interés ya que su alumbrado público fue modificado recientemente (verano de 2014) a LEDs blancos¹³. Se ha realizado un análisis de las ultimas imágenes obtenidas por los astronautas y se ha llegado a la conclusión de que Rivas ha aumentado en la cantidad de luz emitida en la banda G entre un 20-23 % tras el cambio. Para ello, además de la ya mencionada corrección por comparación con VIIRS, se ha medido como control el vecino municipio de Velilla de San Antonio (Véanse las figuras 3.40 y 3.41). Dado que no se dispone de medidas a nivel de calle, podría suponerse que el cambio se realizó de manera que el número de lúmenes en la calle fuera el mismo y el incremento se deba solo al cambio de espectro de la lámparas. Sin embargo, la banda de observación es la misma en que se miden los lúmenes y nuestro canal G, por lo que un incremento en el canal G es necesariamente un incremento en los lúmenes.

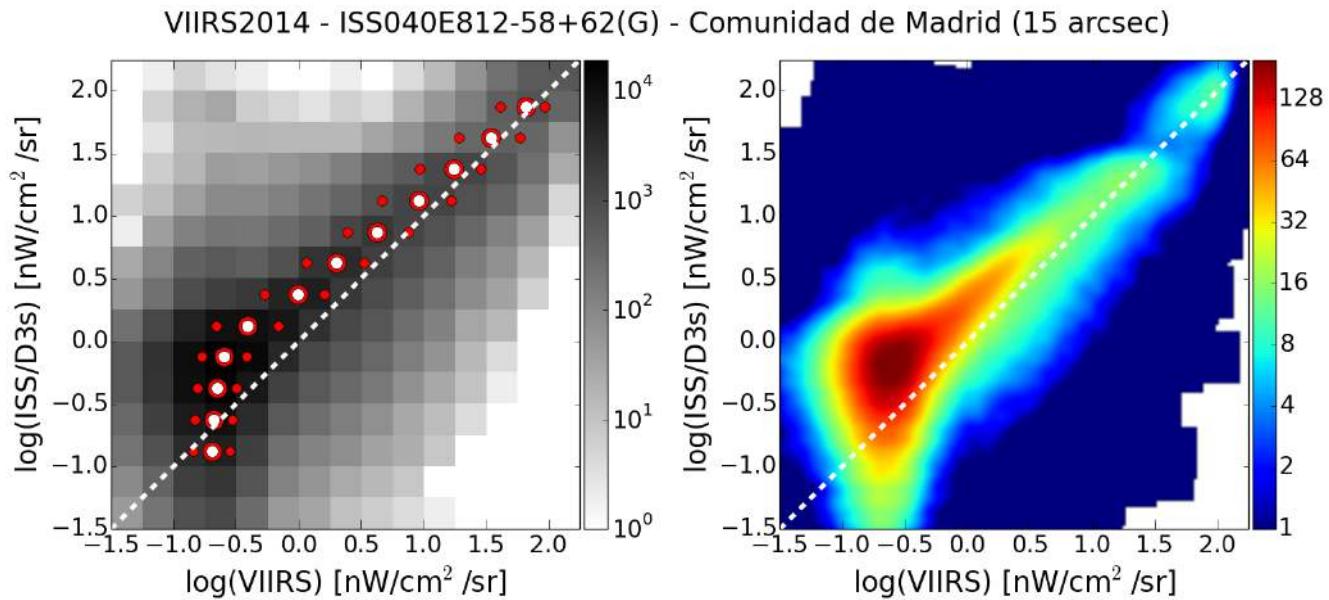


Figura 3.33: Comparación de intensidades entre VIIRS/DNB 03-31/05/2014 y ISS040E0812-58+62 27/07/2014. La línea blanca marca la recta 1:1. Se aprecia como la parte brillante (fig. 3.30) pasa exactamente por la recta 1:1. Sin embargo, la parte más débil está desplazada hacia arriba, de forma paralela a la recta 1:1 con una diferencia de 0.5, debido a la mayor concentración de aerosoles el 27/07/2014. Los puntos rojos vacíos representan la media de la distribución y los puntos rojos pequeños representan los cuartiles.'

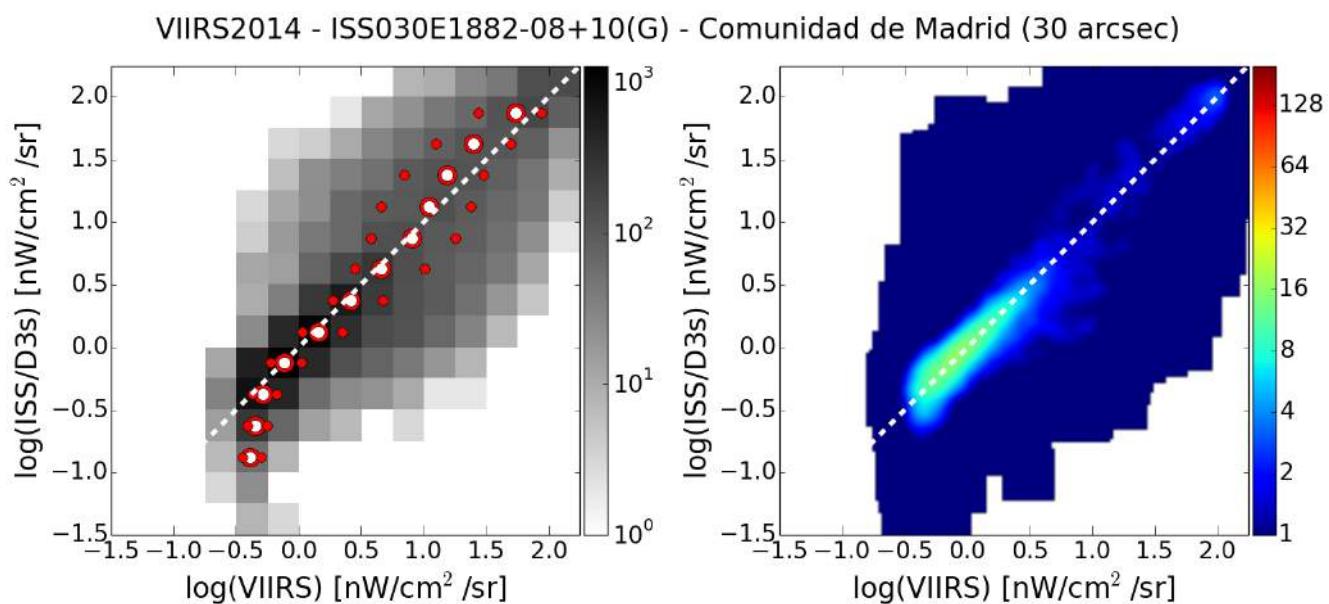


Figura 3.34: Comparación de intensidades entre VIIRS/DNB 03-31/05/2014 e ISS030E1882-08+10 28/03/2012. La línea blanca marca la recta 1:1. Se puede ver que el rango dinámico es menor, pero la distribución de intensidades pasa exactamente por la línea 1:1.

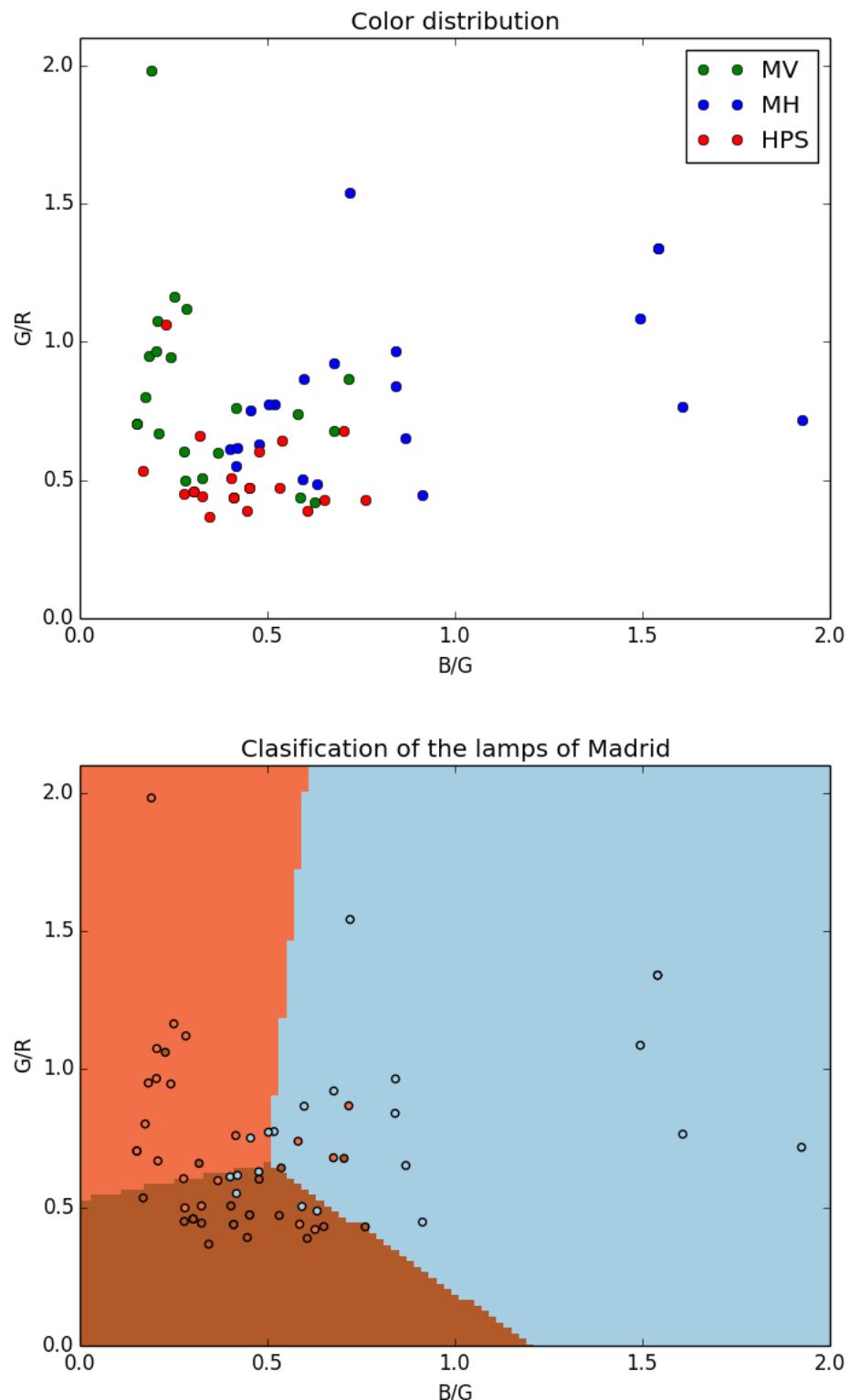


Figura 3.35: Clasificación de los colores de las imágenes en función de su tipo de espectro. La clasificación se ha realizado mediante el algoritmo *Logistic Regression 3-class Classifier* de Pedregosa et al. (2011)

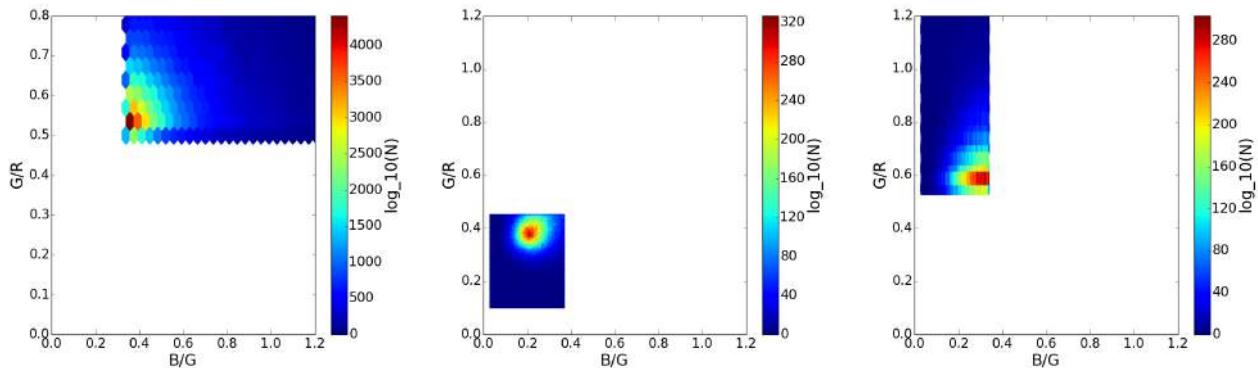


Figura 3.36: Áreas del diagrama seleccionadas para la clasificación de lámparas. A la izquierda, las clasificadas como azules. Centro naranjas y derecha como verdes. Las primeras corresponden principalmente a halogenuros metálicos y vapor de mercurio, las segundas a sodio de alta presión, y las tercera a vapor de sodio muy viejo. En verde aquellas con un gran contenido en verde pero no en azul (MV antiguas, gas más camisa y transición entre mercurio nuevo y viejo.). En rojo las lámparas de sodio (HPS, LPS), gas sin camisa y similar.

3.6.3. Aplicación a 6 capitales europeas

Una vez desarrolladas las herramientas de análisis y confirmada la calidad de la calibración, en esta sección se estudian las diferencias entre seis capitales europeas: Madrid, París, Londres, Berlín, Varsovia y Amsterdam (Kyba et al. 2014a). Se han escogido estas ciudades porque fueron fotografiadas por los astronautas Don Pettit y André Kuipers durante la misión ISS030 con el Nightpod. Estas seis imágenes están tomadas durante la misma noche y con idénticos ajustes (Texp. 1/50, Objetivo. 180 mm 2.8, ISO 1600, etc.). La única diferencia es que fueron tomadas en diferentes pases, por lo que la hora local de cada ciudad es diferente como se puede ver en la tabla 3.5.

Berlín es la capital de Alemania y fue destruida en un 80% durante la segunda guerra mundial. Tras esta fue dividida en cuatro sectores a entre las potencias vencedoras. En 1949 quedó dividida en “solo” dos partes. Esta división produjo un aislamiento del lado oeste. Para mantener una mayor independencia energética, el lado oeste mantuvo el alumbrado público de gas durante mucho tiempo, mientras el lado este actualizó el alumbrado público a sodio de alta presión.

¹²http://www.madrid.es/UnidadWeb/UGNormativas/Normativa/2009/ficheros/ANM2009_2.pdf

¹³<http://www.lighting.philips.es/projects/rivas-vaciamadrid.wpd>

Durante los últimos 70 años Berlín ha actualizado su alumbrado público en el lado oeste y en la actualidad conviven cinco tecnologías de iluminación. LED, fluorescentes, vapor de mercurio, gas y sodio de alta presión. Sólo las lámparas de sodio son de color cálido, el resto de las tecnologías son de luz fría. Una mención especial merecen las lámparas de gas de Berlín. Berlín aloja más del 50% de las farolas de gas del mundo, unas 40.000. Los Berlíneses las han defendido como parte de su cultura y a pesar del alto coste de uno de los componentes, las camisas, los estudios promovidos por los ciudadanos indican que no es rentable su sustitución¹⁴ y se ha mostrado que no hay más crímenes en dichas calles.

En las zonas residenciales se han sustituido principalmente por lámparas de vapor de mercurio. Los viales más importantes son iluminados por fluorescentes o lámparas de sodio de alta presión. En un principio el sistema de fluorescentes era doble, con el objetivo de reducir la iluminación en la segunda parte de la noche. Sin embargo, el apagado repentino de la iluminación producía más accidentes que la menor iluminación, por lo que permanentemente está en funcionamiento el modo de ahorro. El nivel de iluminación es notablemente menor que en otras capitales europeas. Las autovías de circunvalación y salida de la ciudad no están iluminadas a pesar de no haber límite de velocidad. Su festival de iluminación es uno de los más importantes de Europa.

Amsterdam es la capital de los Países Bajos y una ciudad en la que los canales ocupan más área que las calles. En la ciudad conviven diversas tecnologías de iluminación como el sodio de alta presión y otras. Su festival de iluminación también es muy reconocido. La ciudad cuenta con alumbrado desde el siglo XVIII.

Varsovia es la capital de la Polonia. Desde el fin de la guerra fría ha sufrido un crecimiento económico muy importante desde su entrada en la UE en 2004. Domina la iluminación de sodio de alta presión, si bien aun quedan restos de la antigua iluminación de vapor de mercurio.

París es la capital de Francia y como dice Wikipedia:

París tiene muchos sobrenombres, el más famoso de los cuales es el de “Ciudad de la Luz” (*la Ville lumière*), nombre que remite a su fama como centro de las artes y la educación, pero también (y tal vez por lo mismo) a su adopción temprana de la iluminación urbana (1818).

La iluminación en París domina el sodio de alta presión y ha llevado a cabo una profunda reforma de su alumbrado público los últimos 15 años reduciendo su consumo en un 10%, pasando

¹⁴http://www.gaslicht-kultur.de/argumente_EN.html

de 162 GWh a 145 GWh entre 1993 y 2006. El alumbrado público de pares estaba cedido a EDF por 55 años y el acuerdo terminaba en 2009. Realizó varios cambios de iluminación modificando sus faroles históricos para conseguir una emisión al hemisferio superior nula, salvo por la presencia de cristales y difusores.

Londres es la capital histórica del Reino Unido, sin embargo, la división administrativa actual data de 1968 cuando se unificaron varios municipios en el Gran Londres. El Londres actual abarca la antigua ciudad de Londres, Westminster, muchos otros municipios de menor importancia histórica. Fue la primera ciudad en disponer de alumbrado público de gas en 1807 que continua en funcionamiento en algunos lugares como el entorno del Buckingham Palace y Hyde Park. La ciudad de Westminster y algunas otras regiones del centro están iluminadas con tecnología de halógenos metálicos. En cambio los extrarradios están iluminados con sodio de alta presión. El nivel de iluminación en las calles centrales es bastante bajo debido a la gran cantidad de iluminación ornamental. En la historia de la iluminación de Inglaterra se da uno de los casos más curiosos del llamado “sesgo de confirmación”. En el siglo XVIII Londres fue renovado, pero los ciudadanos de la ciudad de Birmingham pensaron que su nivel de crimen era menor respecto al de Londres por tener calles más oscuras (Jane Box en Meier et al. (2014)). En este caso, se daría el mismo caso que en la ciudad de Berlín. Todo apunta a que la iluminación no tiene efectos reales sobre la seguridad ciudadana de manera notable (Paredes Gil 2009).

Madrid es la capital de España. La ciudad mantuvo algunas lámparas de gas hasta 1971 cuando la “Operación alumbrado” retiró los últimos faroles de gas que quedaban en la capital. Desde que la ciudad es capital con Felipe II hay constancia de normativa sobre alumbrado vial, en principio de lámparas de aceite. En época de Carlos III se pasa al uso de velas de sebo de mantenimiento público y en 1832 se con Fernando VII el primer alumbrado público de gas en la Puerta del Sol (por ello el nombre de faroles fernandinos). En 1878, de nuevo en la Puerta del Sol, se estrenaron las primeras bombillas eléctricas. Pero en Madrid no domina la electricidad al gas hasta 1929. Ya en 1935 se instalas las primeras lámparas de sodio y mercurio¹⁵. En 1982 ya es considerada una de las ciudades más o “mejor” iluminadas de Europa¹⁶ con 126.000 puntos de luz. Entre 1982 y el año 1997 se realiza una lenta transición en la que poco a poco van desapareciendo las lámparas de vapor de mercurio de la ciudad. A partir del año 1997, la presión mediática por parte del Grupo de Cielo Oscuro de la Agrupación Astronómica de Madrid y después el Grupo de Protección del Cielo, hacen que desaparezcan las lámparas de vapor de mercurio del alumbrado dependiente del ayuntamiento y se comience a tomar conciencia del

¹⁵<http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/madrid/abc/1971/01/16/011.html>

¹⁶http://elpais.com/diario/1982/02/12/ultima/382316403_850215.html

problema de la contaminación lumínica. Se da la paradoja de que aun mejorando el tipo de farolas de la ciudad, no se disminuye el gasto energético ni baja el brillo de cielo. Esto se debe a la explosión demográfica de los alrededores de Madrid y a que no hay reducción de potencia, lo que hace que los globos translúcidos den lugar a globos semiopacados que en la práctica emiten más luz que los anteriores. Desde 2007 se habían empezado a instalar de manera notable nuevos faroles fernandinos sin emisión al hemisferio superior. Sin embargo en diciembre de 2014 se ha concedido la gestión del alumbrado público a manos privadas lo que esta provocando una migración a iluminación de tipo LED. Otra paradoja es que en 1982 Madrid con 3,158 millones de habitantes ya era considerada una ciudad bien iluminada con 126.000 puntos de luz, y que en 2015 con 3,155 millones de habitantes, disponga ya de 225.000 puntos de luz. Este hecho es una buena pista de la razón por la que Madrid es, según las imágenes de satélite, la capital más iluminada de Europa (Kyba et al. 2014a).

Análisis comparado Las poblaciones metropolitanas y urbana de estas ciudades están claramente diferenciadas. Es importante notar que en casos como el de París o Londres, donde hay un continuo entre el municipio y la corona metropolitana, ésta es casi imposible de distinguir de la ciudad misma. En cambio, Madrid y Berlín tienen una clara región de separación con su corona, pero con ciudades importantes en la misma. Por otro lado Varsovia y Amsterdam, son ciudades más pequeñas con una población metropolitana más distribuida. Otro factor importante es la densidad de población. En Sánchez de Miguel & Zamorano (2010) ya se puso de manifiesto la importancia de la densidad de población con la cantidad de iluminación y en el caso de estas capitales se puede apreciar una leve tendencia en el mismo sentido, ya que Madrid tiene mayor densidad de población que las demás, pero este es un punto que debería de ser estudiado con detalle (ver tabla 3.5).

Las imágenes han sido corregidas del efecto de las ventanas de acuerdo a lo expuesto en sección 3.4.6. En la tabla 3.6 se detallan los valores de brillo medio en $nW/cm^2/sr$ de las regiones dispuestas en la figura 3.46. En primer lugar se tomó como referencia la imagen de VIIRS 2014 sin tener en cuenta la distribución espectral de las fuentes. De esta manera, se escalan las imágenes a lo que mide el VIIRS para cada una de las ciudades, reduciendo la resolución espacial de la imagen ISS en 20 píxeles con un filtro gausiano y análogamente la imagen VIIRS en 5. En el segundo caso, se ha tomado como referencia la ciudad de Madrid por tener una mayor cantidad de lámparas de sodio según el análisis de la tabla 3.6, utilizando ahora un filtro de 5 píxeles para ambas imágenes. El offset se calcula como la diferencia entre la intensidad VIIRS y la intensidad ISS para $80\text{ }nW/cm^2/sr$. Dada la gran dispersión en la distribución de densidad, se estima usando un ajuste lineal mediante el algoritmo RANSAC (Fischler & Bolles 1981). A continuación se aplica la diferencia encontrada en Madrid a todas

las imágenes.

En la figura 3.45 se puede apreciar la gran diferencia entre el offset para Madrid y para Berlín. La razón de esta gran disparidad se explica por la gran diferencia en intensidad y distribución espectral de sus lámparas. Según la tabla 2.3, las lámparas predominantes de Berlín oeste, que son lámparas de gas, vapor de mercurio y fluorescentes, harían que la imágenes de VIIRS fuese entre 1.33 y 1.58 veces más débil. Si esto se une a la diferencia de la imagen de Madrid(1.43) obtenemos una diferencia de 1.9-2.3, que está más cerca del calculado 2.8. Sin embargo, esto no es suficiente para explicar completamente la diferencia. El resto probablemente sea debido a diferencias intrínsecas en la imagen VIIRS, a la extinción o al ángulo de la toma de la imagen o a otros efectos no tenidos en cuenta.

Dado que todas las imágenes fueron tomadas la misma noche y con el Nightpod, consideramos que es más conveniente usar la corrección basada en la ISS. Es importante el uso de uno y otro ya que en los casos extremos de Madrid y Berlín estaríamos hablando de pasar de una diferencia de que Madrid fuese 6.6 veces más brillante que Berlín a “tan solo” 3.4 veces.

Es notable la gran diferencia de la distribución de tipos de tecnología de iluminación que se detecta en las imágenes (fig. 3.43). Se aprecia claramente que en las ciudades de Madrid, París, Londres y Varsovia domina el uso de lámparas sodio. En Madrid los halogenuros metálicos se utilizan principalmente en el aeropuerto (arriba a la derecha) y en urbanizaciones privadas (arriba). En Londres, en cambio, el centro de la ciudad es el que utiliza este tipo de iluminación, principalmente para monumentos, pero también para calles. Se ve este efecto pero a mucha menor escala en Varsovia y París, aunque en estas ciudades principalmente este alumbrado es para iluminación de monumentos. París llama la atención por su heterogeneidad y la presencia importante de lámparas de Mercurio (fig.3.47). En el caso de Berlín, es ya icónica la diferencia Este-Oeste, donde el oeste usa principalmente lámparas de gas, fluorescentes y vapor de mercurio y el este usa lámparas de sodio. Amsterdam presenta un caso más extremo si cabe que París, en donde se entremezclan sodio, vapor de mercurio y halogenuros de manera casi aleatoria. Esto se puede apreciar en las imágenes disponibles en Internet (fig. 3.49) donde una calle del centro puede ser de sodio, y en la que se aprecian multitud de zonas de color verde.

Idealmente, se deberían comparar estos resultados con los inventarios de lámparas. Sin embargo no ha sido posible conseguir ningún inventario fiable de ninguna de estas ciudades, salvo Madrid. El ayuntamiento de Madrid indica que de los 234.203 puntos de luz de la capital, el 100% son de sodio de alta presión a fecha de 31/12/2013¹⁷. Esto es sólo válido para el

¹⁷<http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Ayuntamiento/Estadistica/Areas-de-informacion-estadistica/Energia-gas-y-electricidad/Electricidad/Alumbrado-Publico?vgnnextfmt=detNavegacion&vgnextoid=7255786b10a59210VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnextchannel=c40a8131dd22a210VgnVCM1000000b205a0aRCRD&pk=5729708>

alumbrado gestionado por el ayuntamiento, ya que aun quedan farolas de vapor de mercurio en Ciudad Universitaria, por ejemplo. Se entiende pues, que el resto del vapor de mercurio y otros son, o bien de municipios limítrofes (La Moraleja/Alcobendas, Las Lomas/Boadilla del Monte, Majadahonda, Monte-rozas/Las Rozas) o el aeropuerto.

En un futuro próximo será posible usar Madrid como campo de pruebas, ya que en la actualidad está en fase de reconversión a tecnología LED¹⁸.

Existe una clara conexión entre la abundancia de sodio y la intensidad relativa de cada ciudad. Esto se puede explicar bien por la mayor eficiencia del sodio para la emisión de luz, o porque esta tecnología es novedosa y a pesar de su eficiencia produce una mayor emisión (Kyba et al. 2014b). También se podría especular sobre el efecto de la visión mesópica para explicar este fenómeno (Fotios & Cheal 2011), ya que debido a la menor iluminación de esta zona de la ciudad entraría en juego la visión mesópica que es más eficiente en el azul. Esta afirmación es utilizada habitualmente por la industria para justificar la bondad de la iluminación de color azulado, pero pensamos que no se puede aplicar en este caso ya que el deslumbramiento producido por la visión directa de las lamparas, impide al ojo llegar a el régimen mesópico. Aun considerando esto, la comparación entre el Berlín ESSTE (principalmente uso de sodio de alta presión) y Madrid nos indica que ese fenómeno, de existir, es de segundo orden.

Ciudades	Pob. Urb.(1)	Pob. Met.(2)	Imagen	LT	Dens. Pob.	Offset
Berlín	3,4	5,95	iss030-e-085815	22:36:00	3837	2,78
Amsterdam	1,1	2,16	iss030-e-085908	00:11:00	4926	1,77
Londres	8,4	13,6	iss030-e-085899	23:10:00	5354	1,41
París	2,2	12,3	iss030-e-085807	22:35:00	21347	1,56
Varsovia	1,7	5,13	iss030-e-085827	22:38:00	3309	1,53
Madrid	3,1	6,6	iss030-e-082053	03:23:00	5500-7081(3)	1,43

Tabla 3.5: Datos de las imágenes usadas.(1) Población Urbana en Millones de habitantes. (2)Población Metropolitana en Millones de habitantes. (3) Densidad sin contar el Monte del Pardo [habitantes/km²].

3.7. Usos de las imágenes nocturnas de la ISS

De este capítulo podemos concluir que las imágenes nocturnas tomadas desde la Estación Espacial Internacional pueden ser calibradas para su uso, siempre y cuando se realice con las

¹⁸<http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2014/>

	VIIRS ref		ISS ref		Color iluminación		
	Abs	Rel	Abs	Rel	Azul	Naranja	Verde
Berlín	23,5	1,0	35,7	1,0	48 %	28 %	23 %
Amsterdam	58,4	2,5	78,6	2,2	51 %	26 %	23 %
Londres	84,9	3,6	74,2	2,1	31 %	51 %	18 %
París	90,0	3,8	87,8	2,5	24 %	53 %	22 %
Varsovia	85,0	3,6	89,8	2,5	30 %	54 %	17 %
Madrid	155,0	6,6	120,0	3,4	26 %	61 %	13 %

Tabla 3.6: Intensidad de seis capitales europeas de manera comparada y porcentaje de la superficie iluminada por distintos tipos de espectros.

precauciones correspondientes, a saber:

- Conocer la respuesta espectral de la cámara y la corrección de iluminación del objetivo.
- No superar el rango lineal de 10.000 cuentas (en 14 bits)¹⁹.
- Verificar la concordancia de la calibración con VIIRS.
- Verificar que la fuente de comparación no tiene una diferencia de color significativa con el flujo estimado por VIIRS/DNB.

Con estas cautelas se pueden realizar medidas fotométricas con precisión similar o superior a las de VIIRS/DNB, con la posibilidad de disponer de información multiespectral y mayor resolución espacial.

Dado que las imágenes de la ISS son tomadas a cualquier hora, es posible estimar cual es la evolución temporal del total de energía inyectada en la atmósfera. Al mismo tiempo, gracias a sus tres bandas podemos distinguir entre diversos tipos de iluminación y estudiar dónde y cuándo se usan estos. En la sección de aplicaciones se ha demostrado cómo es posible identificar puntos conflictivos en la aplicación de la Ley del cielo de Canarias (Puerto Naos y Hotel Sol), así como verificar que en conjunto la Isla de La Palma cumple la Ley del Cielo.

En el análisis de Madrid, se ha comprobado que podemos medir el cambio de la iluminación ornamental que supone aproximadamente un 45 % de la contaminación lumínica producida por el centro de la ciudad. Para el caso de Madrid, ha sido posible combinar varias imágenes y crear una composición de Alto rango dinámico que permite estudiar la emisión difusa visible en el DMSP/OLS y VIIRS/DNB. Se aprecia que esta emisión difusa es muy afectada por el contenido de aerosoles, como era de esperar, y se abre una línea de investigación muy interesante. Se ha determinado la presencia de diferentes tecnologías de iluminación mediante

¹⁹Calibración en proceso para poder dar uso al rango superior hasta las 32.000 cuentas de saturación.

diagramas de color y establecido que Madrid tiene entorno al 65 % de vapor de sodio en su corona metropolitana, frente al 100 % del alumbrado público que indican las estadísticas del ayuntamiento.

Estas mismas técnicas pueden ser exportadas a otras regiones, tal y como se muestra para seis capitales europeas donde hemos podido estudiar diversidad de estrategias de iluminación (Madrid vs París vs Londres), diferencias históricas (Berlín), diferencias en uso de tecnología (Berlín/Madrid).

En definitiva, podemos determinar con mucha mayor resolución espectral-temporal-espacial todos los parámetros que están ligados al estudio de la contaminación lumínica .Sin embargo, no es una tarea fácil que esté exenta de dificultades y de momento se necesita:

- Conocer mejor las propiedades ópticas de las ventanas de la ISS.
- Mejorar el conocimiento del rango no lineal de las cámaras D3S y sucesoras.
- Contrastar el método con medidas de tierra en el caso de la iluminación.
- Implementar la corrección de extinción a partir de la posición real de la ISS.

Todas estas dificultades han aparecido como resultado del análisis. De momento han sido estudiadas de manera somera por la falta de información pero deben ser tratadas en profundidad en un futuro. A pesar de estas, el resultado es abrir una nueva ventana para el estudio de la contaminación lumínica y el uso de la iluminación.

3.8. Resultados

- Se han realizado las primeras calibraciones absolutas de las imágenes ISS/D3S mediante fotometría con estrellas y con fuentes en tierra.
- Las imágenes calibradas permiten su explotación científica para la medida de radiancias. Se ha aplicado el procedimiento a los casos de la Comunidad de Madrid y de la Isla de La Palma, obteniendo resultados similares a los proporcionados por el satélite VIIRS/DNB.
- Se han clasificado por primera vez con éxito las diferentes tecnologías de iluminación a partir de las imágenes de la ISS mediante diagramas color-color usando los canales R, G y B de las cámaras. Esta capacidad multiespectral de la ISS/D3S permite evaluar cambios en tipo de alumbrado para los que los satélites de una sola banda pancromática no están preparados.
- Se han estudiado 6 capitales de la UE con imágenes de la ISS, mostrando que Madrid es la más contaminante de las capitales (hasta 6.6 veces más brillante que Berlín) y la que mayor uso del sodio de alta presión tiene (61 % del área total de toda la iluminación, frente al 100 % estimado por el ayuntamiento en alumbrado público).

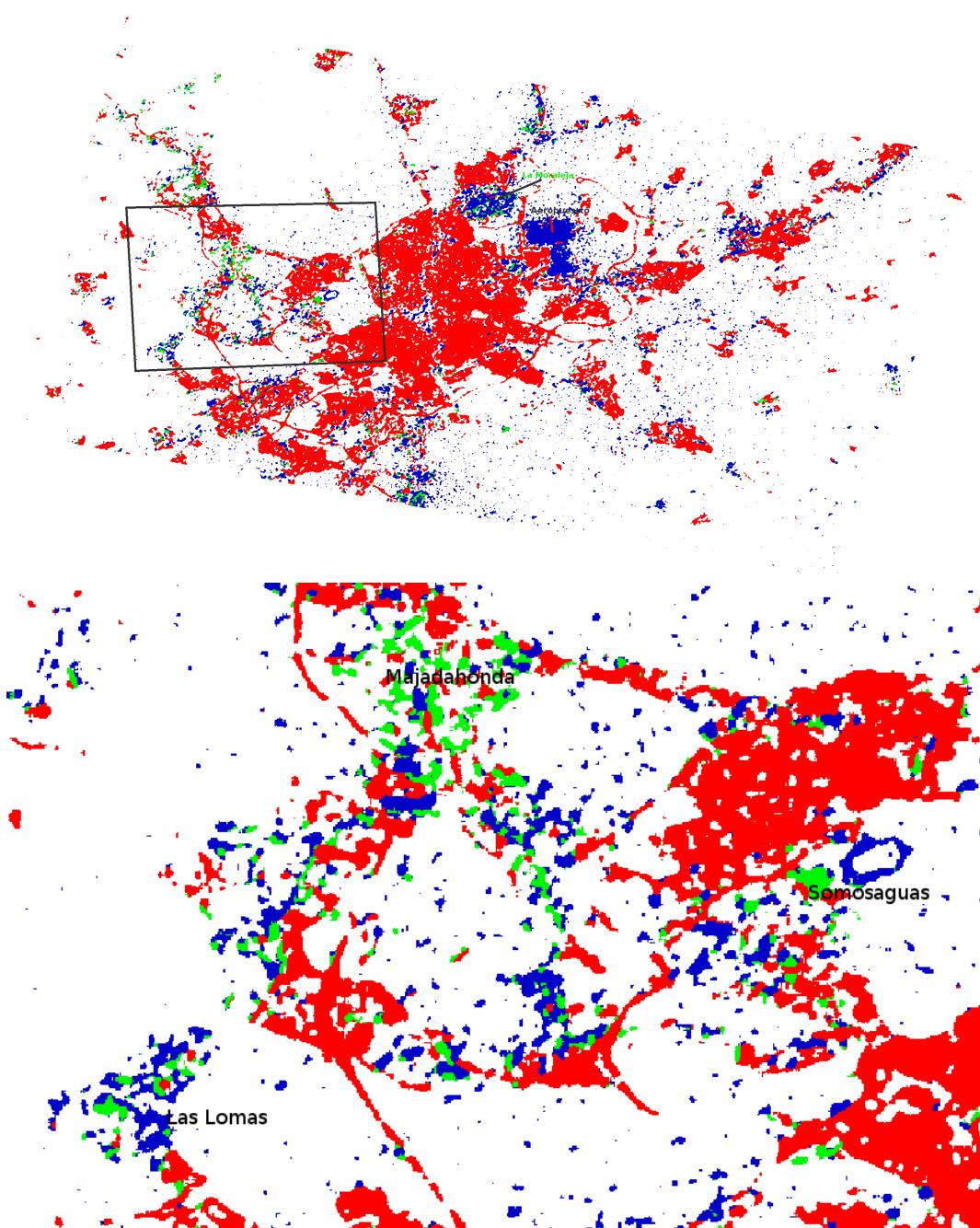


Figura 3.37: Arriba mapa general de Madrid, clasificado por tipo de luminarias en función de su posición en el el diagrama color-color. En azul se marcan las lámparas que corresponden a espectros con alta temperatura de color (MH, CMH, MV nuevas, ...). En Madrid, se puede asegurar que no hay iluminación de gas, por lo que los colores corresponden a rojo HPS, verde MV antiguas y azul MV, CMH o MV nuevas. En la parte inferior se destacan algunas zonas del área noroeste que tienen iluminación peculiar. Las Lomas, una urbanización de alto poder adquisitivo domina en vapor de mercurio con mezcla de nuevo y viejo. En Majadahonda, una gran cantidad de sodio, sodio blanco y vapor de mercurio. En el campus de Somosaguas dominan las lámparas de vapor de mercurio extremadamente viejas.

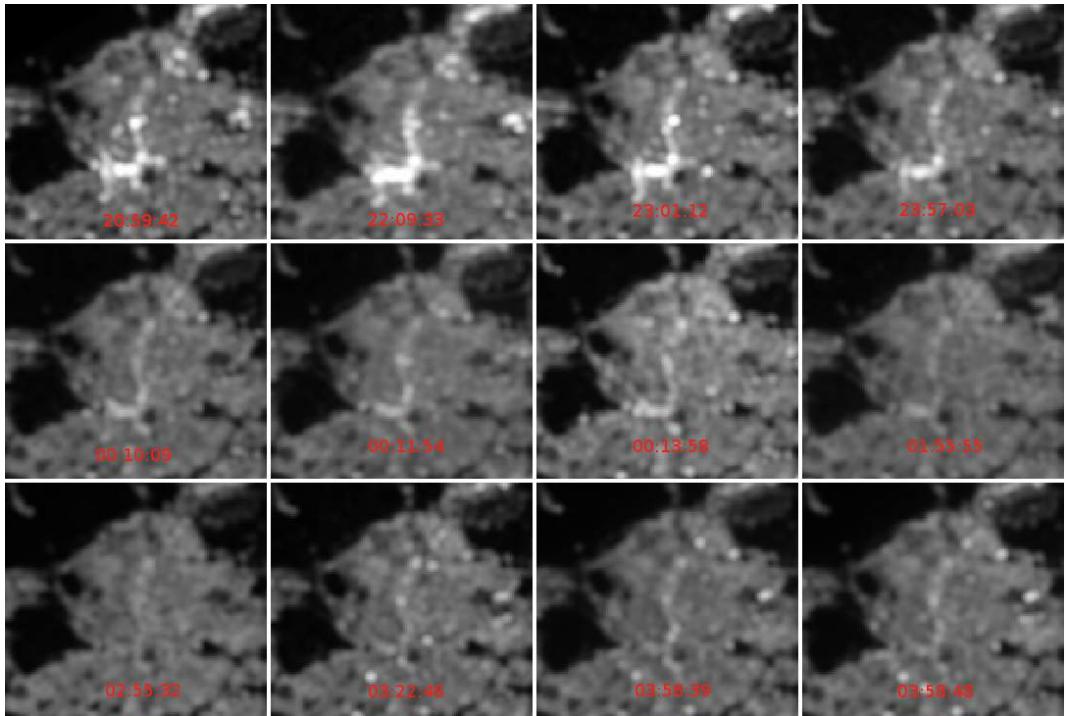


Figura 3.38: Evolución del centro de Madrid con el tiempo a partir de imágenes tomadas desde la ISS durante los años 2012 a 2014. Tiempo en hora local.

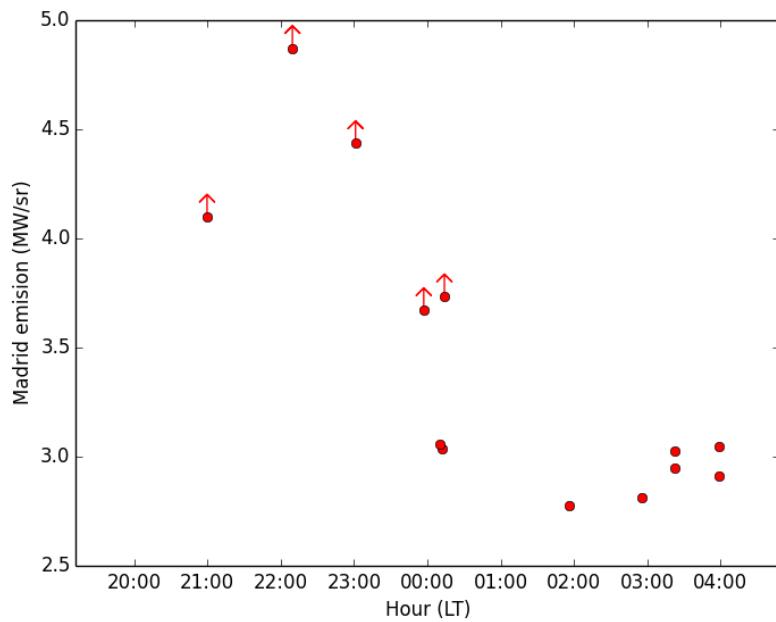


Figura 3.39: Gráfico de la evolución con las mismas imágenes del gráfico anterior.

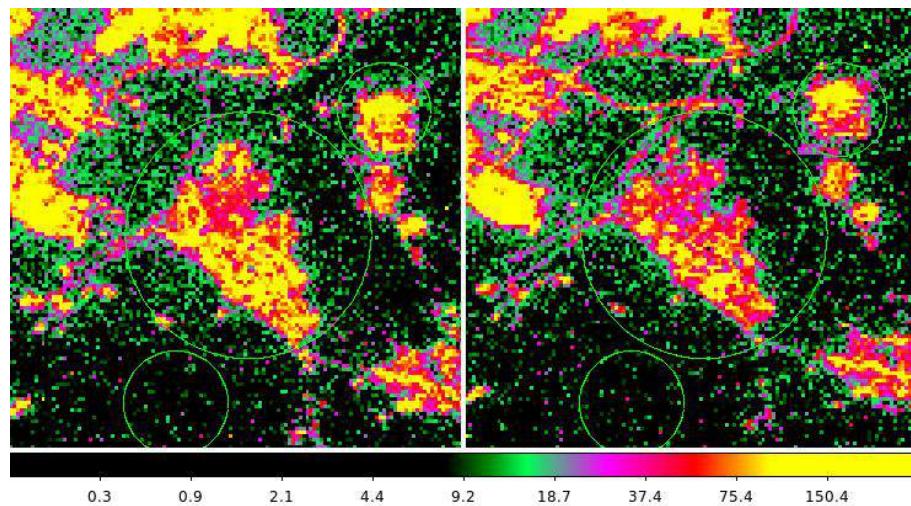


Figura 3.40: Detalle de las imágenes ISS040E081262 (izda.) e ISS026E026495 (dcha.) en el canal G, tomadas en 2014 y 2011 respectivamente. Se marcan las regiones utilizadas como control y fondo arriba y abajo de Rivas, en el centro.

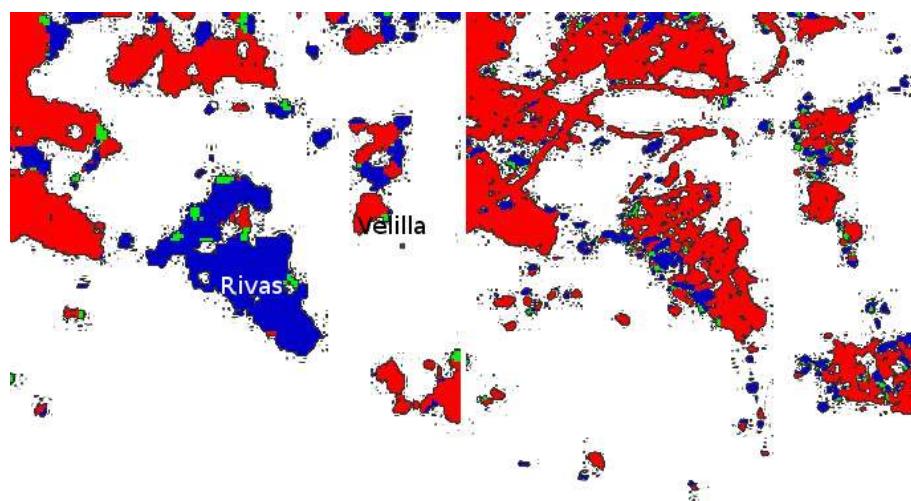


Figura 3.41: Clasificación de las fuentes de luz de Rivas-Vaciamadrid y entorno en 2014(izda.) y 2011(dcha.), en las imágenes anteriormente mencionadas. Se aprecia claramente el cambio de color de Rivas de sodio a LED blanco.

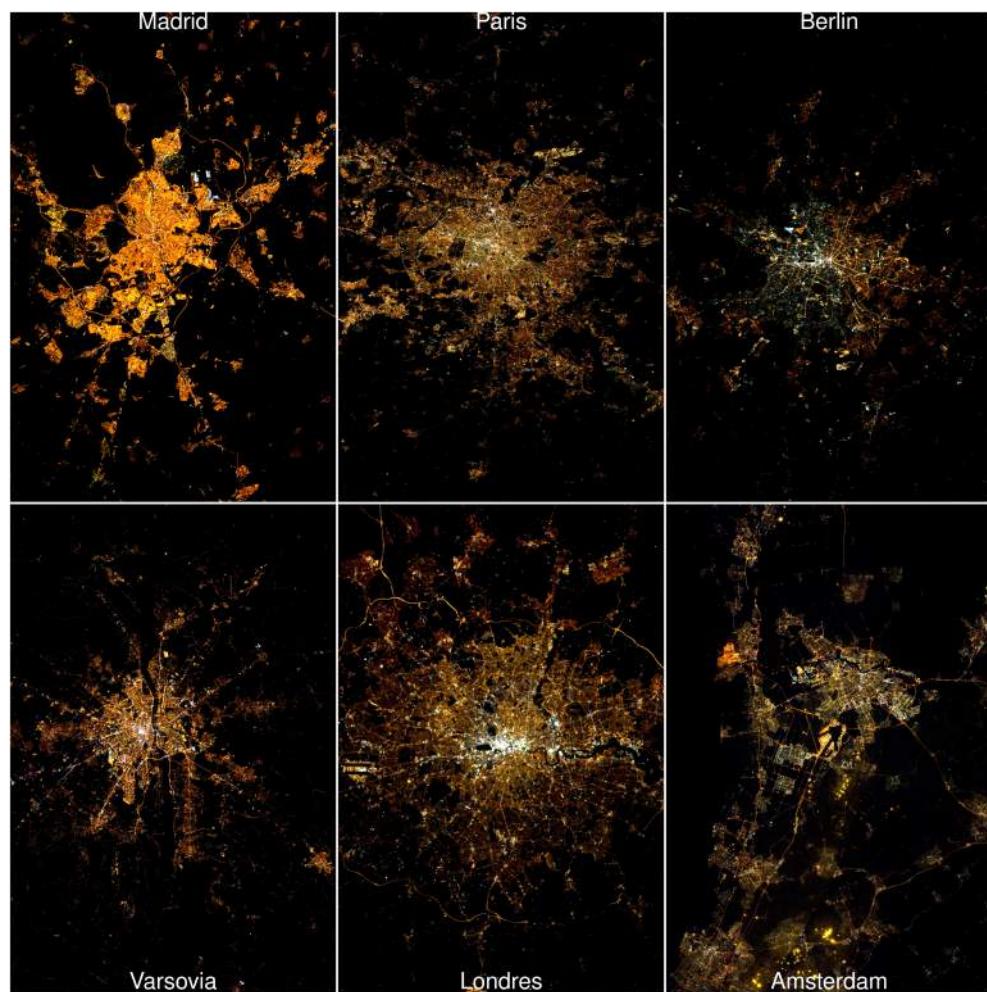


Figura 3.42: Imágenes de las capitales europeas estudiadas sin procesar. Se observa claramente la diferencia en intensidad y color de las ciudades.

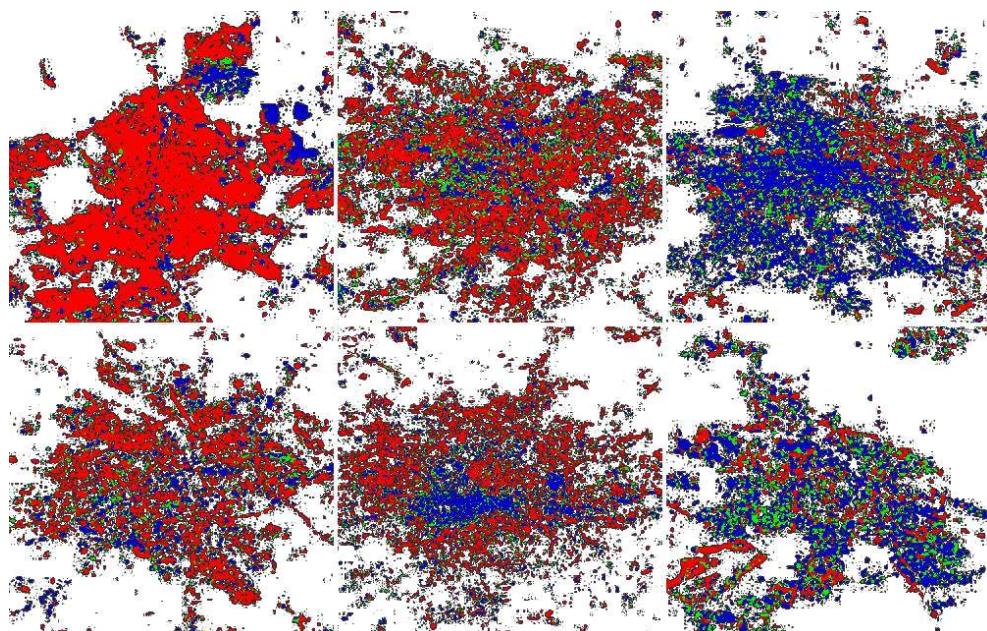


Figura 3.43: Distribución comparada de colores entre las capitales europeas.

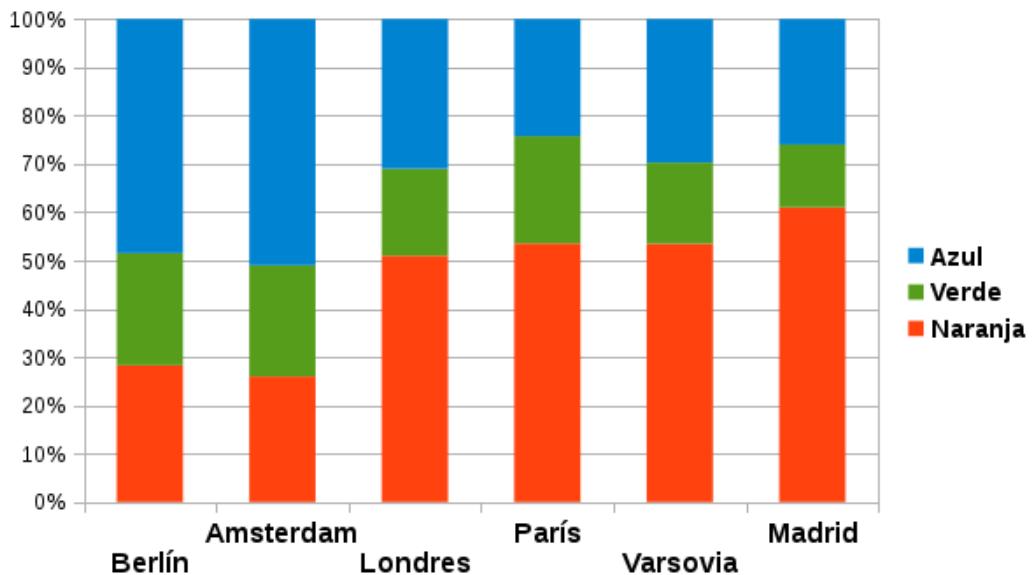


Figura 3.44: Porcentajes de distintos tipos de lámparas para las ciudades estudiadas.

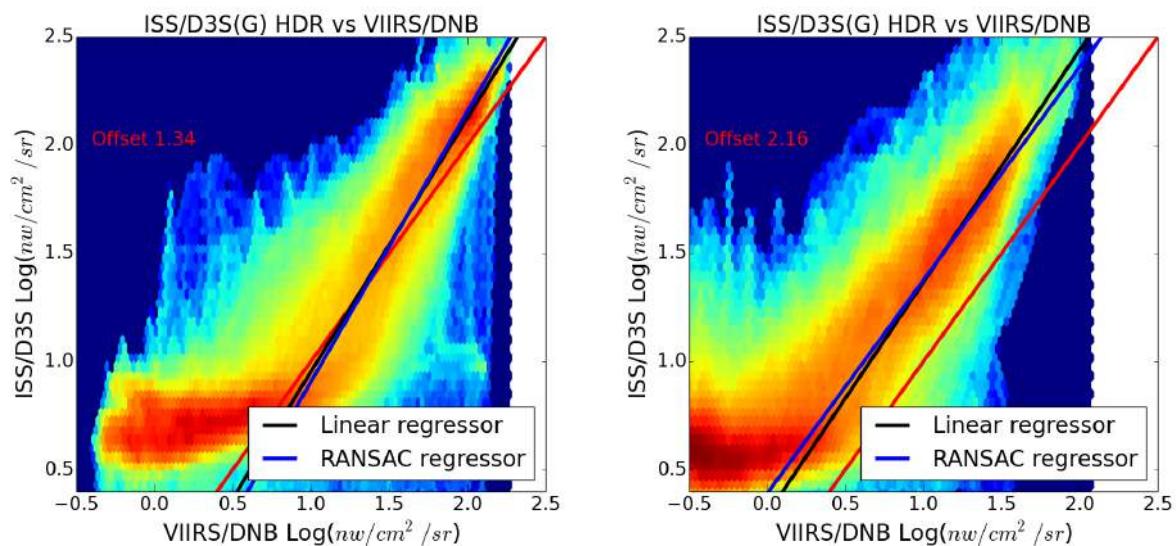


Figura 3.45: Relación entre radiancias medidas con ISS/D3S y VIIRS/DNB para las ciudades de Madrid (izda.) y Berlín (dcha.). El desplazamiento respecto a la línea 1:1 se explica por la diferente predominancia de unos tipos de iluminación en una y otra ciudad, la distinta respuesta espectral de cada instrumento y otros factores como la extinción y la inclinación de la toma.

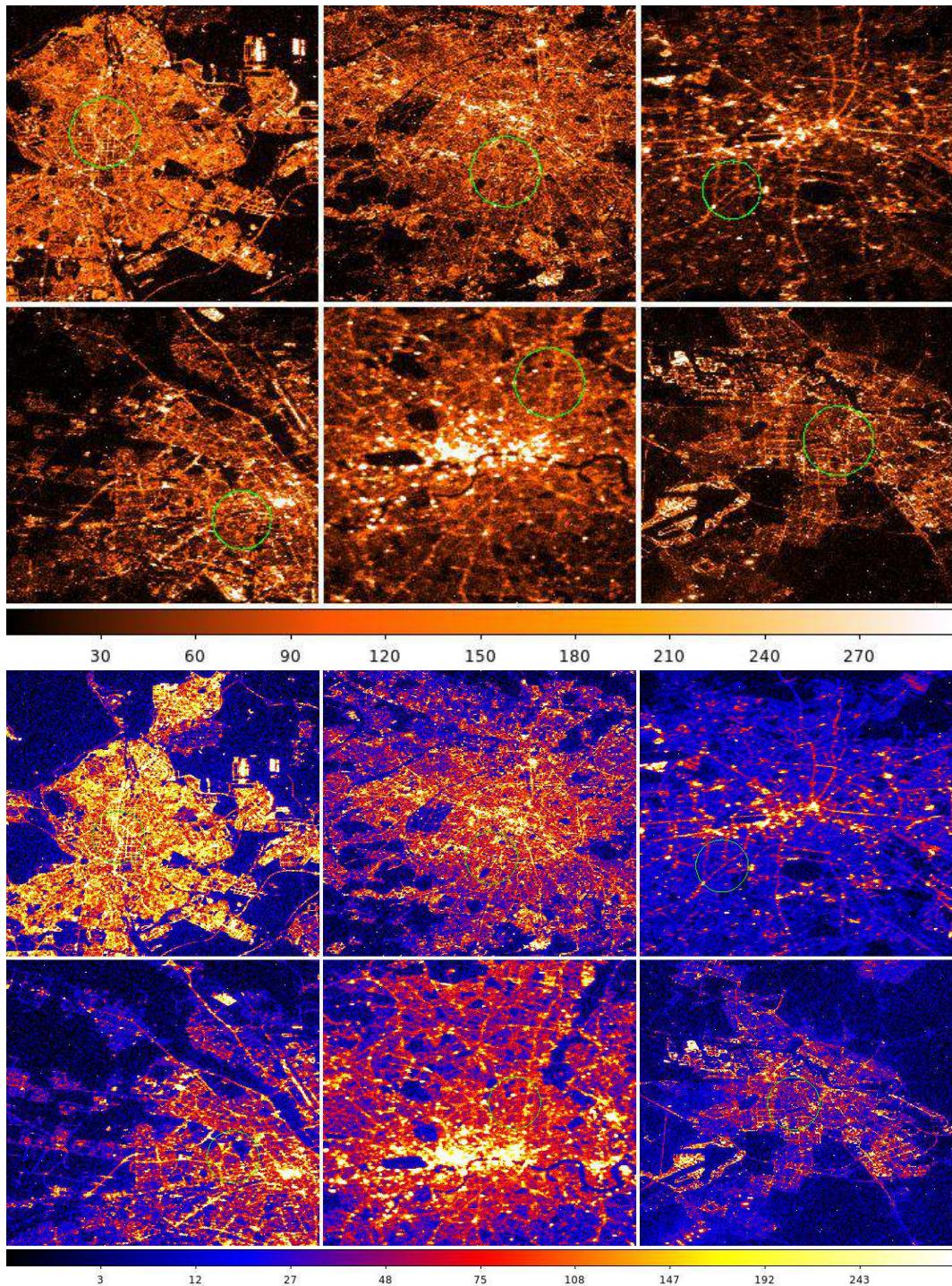


Figura 3.46: Comparación de intensidades entre capitales europeas. De arriba abajo y dcha. izqa. Madrid, París, Berlín, Varsovia, Londres, Ámsterdam. La primera figura se han tenido como referencia la ISS, en la segunda VIIRS.



Figura 3.47: París de noche desde la torre de Maine-Momparnasse. Se aprecian claramente los colores de las diferentes calles de París. Autor: Benh Lieu Song. Licencia GFDL/Wikimedia.

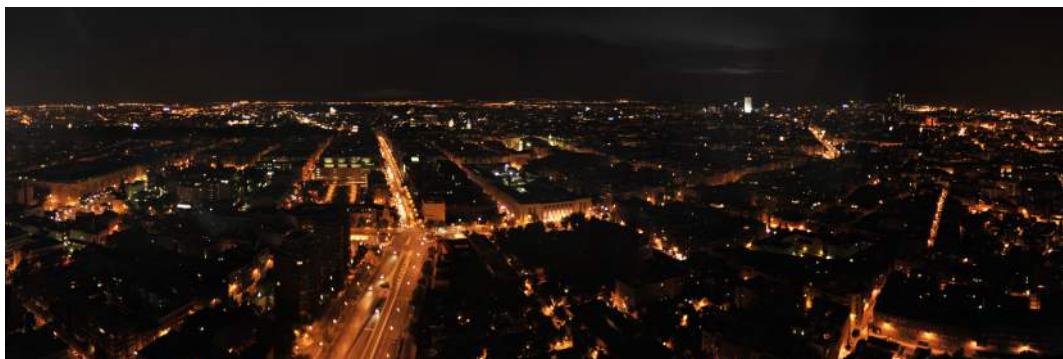


Figura 3.48: Madrid de noche desde Torrespaña. Se puede observar que todas las calles están iluminadas con sodio de alta presión. Sin embargo se observan monumentos y zonas privadas con alumbrado de vapor de mercurio y otros.



Figura 3.49: Imagen de las afueras de Amsterdam. Se observa una mezcla de tecnologías, con claras partes verdes que pueden ser vapor de mercurio. Autor: Philip Hens. Usada con permiso.

Capítulo 4

Catálogo de imágenes ISS multiespectrales

4.1. Introducción

Hasta el año 2003 no existían imágenes nocturnas de la Tierra en más de una banda en el rango visible. El astronauta Don Pettit (Pettit 2008) probó en la lanzadera espacial un sistema de compensación de movimiento para poder realizar imágenes con cámara fotográfica digital con suficiente exposición para captar las luces de las ciudades. La mejora en sensibilidad de las cámaras reflex digitales permitió continuar con la toma de imágenes, pero en 2010 se instaló en la estación el módulo Cupola que permitía una mayor capacidad de observación de la tierra y en 2011 se subió el trípode especial Nightpod (Sabbatini & Esposito 2011), como versión mejorada del mecanismo desarrollado por Pettit. En el periodo que va de 2003 a 2010 se realizaron 35.995 imágenes nocturnas, desde el 01/01/2011 hasta el 26/11/2014 se habían tomado 423.520. Este crecimiento exponencial impidió que el servicio de almacenamiento de imágenes de los astronautas *The Gateway to Astronaut Photography of Earth* pudiera abordar la inmensa tarea de clasificación de las mismas.

En esta base de datos o repositorio de imágenes se recogen todas las obtenidas por los astronautas de las diversas agencias espaciales que participan en la Estación Espacial Internacional. Este servicio ha experimentado una profunda renovación los últimos años. Algunas de las mejoras introducidas en el servicio han sido a petición de los miembros de nuestro equipo. Desde el portal *The Gateway to Astronaut Photography of Earth* se proporciona para cada imagen la información técnica sobre su adquisición (metadatos), imágenes JPEG, enlace al fichero original RAW y, desde 2013, también una estimación del Nadir de la ISS en el momento de la adquisición de la imagen basado en la hora de la toma de la imagen. Si esta hora no es correcta, que es sincronizada de manera manual por los astronautas¹, la ubicación es incorrecta.

La página web proporciona varias herramientas de búsqueda de imágenes. Pueden bus-

¹Comunicación privada William L. Stefanov 24/10/2014

carse las imágenes dentro de las ya catalogadas, por número de misión, rollo y numero de fotograma (*Mission-Roll-Frame*) o la herramienta de búsqueda de imágenes no catalogadas (*Uncataloged ESC*). Todas estas herramientas proporcionan tablas dinámicas que permiten acceder a algunos campos de la base de datos, pero no hay manera de hacer búsquedas SQL directas. Las tablas permiten previsualizar una miniatura de la imagen original. Cada imagen tiene una ficha con información sobre la misma: una muestra de los datos metadatos de la captura (EXIF), la focal utilizada, el modelo de la cámara, momento de la captura, acceso a la imagen en media y alta resolución en formato JPG. Los datos originales RAW(2012) o una estimación de la posición de la ISS(2013) también se pueden obtener de en esta fichas, así como una herramienta para el cálculo estimado del footprint.

En la misma página web hay otras herramientas útiles como una para calcular la posición de la ISS en un instante determinado (útil cuando la hora es incorrecta pero puede ser estimada por otros métodos) y en qué momento pasó la ISS por un lugar determinado. Esto es especialmente útil para la planificación de observaciones.

La catalogación de las imágenes nocturnas es un paso previo muy importante. Permite, por ejemplo, encontrar imágenes de zonas concretas con un interés especial. Más interesante todavía, permite recuperar series de imágenes del mismo lugar obtenidas en momentos o fechas diferentes y estudiar la evolución temporal de la contaminación lumínica. Esta parte del trabajo de tesis ha sido fundamental para el desarrollo de la misma y a ella se han dedicado muchos esfuerzos. Ha resultado muy útil la ayuda prestada por estudiantes y otros investigadores voluntarios. En este capítulo se mostrarán las estrategias seguidas para la catalogación de las imágenes de interés científico.

4.2. Catálogo de la selección manual y semiautomática

Clasificación manual Hasta el año 2013 la NASA no proporcionaba información sobre la localización de las imágenes tomadas por sus astronautas salvo para aquellas que habían sido catalogadas por su equipo, una pequeña fracción del total. De las imágenes nocturnas que son de interés para este estudio sólo estaban catalogadas por NASA las correspondientes a grandes ciudades y otras eran conocidas por su difusión en Internet por parte de aficionados entusiastas que rebuscaban en el repositorio. Por ejemplo Peter Challupner (@PC0101) nos puso sobre la pista de una imagen muy sesgada de Madrid (ISS016-E-26126) obtenida el 30/01/2008 cuando en 2010/03 empezamos a solicitar a través de Twitter al astronauta de JAXA Soichi Noguchi (@Astro_Soichi) que apuntara la cámara hacia Madrid como ayuda a los estudios de contaminación lumínica. En 2010/04 Soichi Noguchi realizó la primera imagen nocturna útil de Madrid (ISS023-E-29556).

La estudiante Alicia González (becaria de Excelencia de la Comunidad de Madrid en la UCM) realizó una búsqueda sistemática del repositorio de la NASA en busca de imágenes de Madrid de noche, encontrando una docena de imágenes obtenidas desde 2003 con condiciones meteorológicas adversas (<http://guaix.fis.ucm.es/node/1448>). Posteriormente (entre 2009 y 2013) otros estudiantes de la UCM como Marian López Cayuela (como continuación de su Trabajo Académicamente Dirigido) y Guillermo Martín Martínez ayudaron a la clasificación visual de las imágenes inspeccionando las nuevas adquisiciones de manera visual (más de 100.000 imágenes). De manera adicional, Peter Challupner ha estado proporcionando imágenes interesantes y mucha información sobre el estado de la ISS así como información sobre la toma de las imágenes que ha sido de gran utilidad.

Finalmente se localizaban y catalogaban las imágenes más relevantes usando los metadatos de las mismas. Para estimar la posición de la Estación Espacial Internacional, se empleó de la página web www.calsky.com (Roth & Roth 2009). Esta página proporciona efemérides de la estación espacial en un rango de dos años dentro del menú Satellites/ISS/Groundtrack. Se clasificaron más de 1695 imágenes por este procedimiento. Estas imágenes forman parte del catálogo inicial del proyecto CitiesAtNight (Sánchez de Miguel et al. 2014a), del cual hablaremos en la siguiente sección. Este catálogo puede ser consultado en la dirección <http://www.nightcitiesiss.org>.

Tras comprobar que algunas imágenes presentaban campos de estrellas fácilmente reconocibles, se solicitó formalmente a los responsables del repositorio los ficheros originales (RAW) de algunas de estas imágenes. Su análisis permitió comprobar que eran calibrables fotométricamente (véase la sección 3.4.7). Se realizó un informe técnico con recomendaciones sobre técnicas de observación, como el horquillado para la toma de imágenes, que se remitió a la NASA Zamorano et al. (2011a). Muchas de las recomendaciones se aplicaron en siguientes años, si bien no podemos asegurar que fueran debidas a dicho informe.

Clasificación semiautomática La clasificación manual se mejoró con la ayuda de José Gómez Castaño que diseñó un embrión del proyecto CitiesAtNight, bajo las especificaciones técnicas acordadas en el equipo. El procedimiento disponía de funcionalidades que actualmente han quedado obsoletas tras la nueva información que proporciona la base de datos de la NASA. El primer paso antes de proceder a la clasificación de todo el archivo de la NASA consiste en filtrar las imágenes potencialmente interesantes. Sin embargo, en aquel momento era imposible saber a priori si una imagen era diurna o nocturna². Por tanto, se utilizó un método de análisis del histograma de la imagen para seleccionar las imágenes nocturnas, ya que éstas presentan

²En la actualidad es trivial ya que en el formulario de imágenes no catalogadas se puede solicitar que sólo muestre las imágenes en que la altura del Sol es menor que 0 grados de altura sobre el horizonte.

típicamente histogramas centrados en valores muy bajos, por debajo de 11 ADU. En cambio las diurnas solían tener valores muy altos, por encima de 90 ADU (Sánchez de Miguel et al. 2014b). Este método requería de supervisión humana adicional ya que genera muchos falsos positivos que debían descartarse manualmente. Se clasificaron alrededor de 5.000 imágenes mediante este software. Esta versión del catálogo no está accesible en este momento, si bien existe una copia del mismo. No se continuó en esta línea ya que ha sido superado por el trabajo de los voluntarios de Cities At Night.

4.3. Programa de ciencia ciudadana: Cities at Night

Como hemos visto en la introducción, uno de los aspectos más importantes de la detección de las fuentes de contaminación lumínica es determinar su naturaleza a partir de su espectro. Sin embargo sólo disponemos de una pequeña porción de la Tierra de la que existen imágenes multiespectrales o hiperespectrales desde el aire, por lo que estamos restringidos a los catálogos de las entidades locales o estudios monográficos como el informe VITO Van Tichelen et al. (2007) para estimar el tipo predominante de lámpara en regiones muy concretas del planeta. El archivo de las imágenes tomadas desde la Estación Espacial Internacional dispone de más de 120.000 imágenes nocturnas tomadas con objetivos de focales comprendidas entre los 40 mm y los 999 mm, y supone la mayor base de datos de imágenes de satélite multiespectrales que existe en la actualidad.

El primer paso para que dicho archivo pueda ser de utilidad en el estudio de la contaminación lumínica consiste en cribar el mismo y categorizar las imágenes, ya que entre esas imágenes no sólo hay datos de tomas de ciudades, sino que existen imágenes de astros, nubes, tormentas, puestas de sol, imágenes del interior de la estación espacial y también imágenes de poca calidad.

En segundo lugar, de nada sirven las imágenes si no conocemos su ubicación. En principio, el archivo de NASA proporciona datos del nadir de la Estación Espacial Internacional en el momento en que ha sido tomada la imagen, basados en la hora de cámara. Sin embargo, el nadir puede estar a cientos de kilómetros del objeto fotografiado ya que el astronauta apunta la cámara al sujeto de interés. Por ello cada imagen debe ser inspeccionada para buscar su lugar de origen.

En tercer lugar, la inclinación de las imágenes impide el uso de las imágenes originales. Esta inclinación debe ser corregida. Para evitar este problema debemos georreferenciar las imágenes mediante puntos de control (Habib et al. 2006).

Una vez georreferenciadas, las imágenes deben ser procesadas para calibrarlas fotométricamente, tal y como se ha descrito en el capítulo 3.

Esta tarea es inabordable para una sola persona, pero los programas de ciencia ciudadana permiten el análisis distribuido de información compleja. Por ello, para la elaboración del presente catálogo se ha acudido a la creación de un proyecto de Ciencia Ciudadana llamado Cities at Night o Ciudades de noche. La página principal del proyecto es www.citieatnight.org y su diseño ha sido realizado en colaboración MediaLAB-Prado.

Este tipo de procedimientos es común en el tratamiento masivo de datos que precisan la intervención humana, como puede ser Galaxyzoo (Lintott et al. 2008, 2011; Bamford et al. 2009; Skibba et al. 2009; Schawinski et al. 2010, 2009; Darg et al. 2010), o Clickworkers (Szpir 2002) y ha sido ampliamente discutido en publicaciones de metodología científica (Cheshire & Antin 2008; Haythornthwaite 2009).

Para la consecución de nuestro proyecto, se han creado tres aplicaciones web en la plataforma www.crowdcrafting.org. Las tres aplicaciones intentan cubrir las tres primeras fases de la calibración. El cribado / clasificación se realiza en la aplicación DarkSkies. La localización de las Imágenes, mediante la aplicación Lost at Night. Y la Georreferenciación, mediante NightCitiesISS. La calibración fotométrica puede ser realizada de manera automática una vez conocidos los parámetros fotométricos de la cámara y sus correspondientes ajustes y objetivo por lo que no se ha creado ninguna aplicación para dicha fase. A continuación describimos en qué consiste cada aplicación y los resultados provisionales de la misma.

La coordinación y diseño conceptual de todo el programa ha corrido a cargo de Alejandro Sánchez de Miguel, así como el análisis de los resultados y los test de calidad, y la programación de la aplicación Dark skies a partir del borrador elaborado por Daniel Lombraña. José Gómez Castaño ha realizado la programación de las aplicaciones Lost at Night y Night Cities, además de colaborar activamente en todos los aspectos del proyecto. Daniel Lombraña ha proporcionando la plataforma “Crowdcrafting”, desarrolló el primer borrador del proyecto Dark Skies y ha realizado labores de asesoría y soporte.

4.3.1. Plataforma Crowdcrafting.org

Crowdcrafting es una plataforma de ciencia ciudadana que utiliza el software libre PyBossa (Lombraña González et al. 2015). Esta plataforma, promueve la ciencia abierta compartiendo el código fuente de la tecnología, así como los datos y sus análisis³ Una de las características más interesantes de Crowdcrafting y su tecnología es que proporcionan plantillas para resolver problemas como: reconocimiento de patrones en imágenes, audio y vídeo, transcripción de documentos PDF, geolocalización.

Crowdcrafting y PyBossa además tienen un ecosistema de herramientas y aplicaciones

³Crowdcrafting:<http://crowdcrafting.org/>. Pybossa: <http://pybossa.com/>

que facilitan al investigador el análisis y trabajo con su proyecto. Dos de estas herramientas son: (i) *pbs* y (ii) *enki*. La herramienta *pbs* permite gestionar un proyecto desde la línea de comandos, permitiendo añadir, actualizar o eliminar tareas de un proyecto utilizando comandos muy simples. *Pbs* importa tareas directamente de ficheros CSV o JSON, facilitando la colaboración con otros investigadores, puesto que dichos formatos son estándares de facto para almacenar datos.

Por otro lado, *enki* permite realizar el análisis de los resultados de un proyecto de manera sencilla. Para proyectos de clasificación de datos, *enki* realiza un análisis en tan solo unas líneas de código, gracias a su integración con el paquete de análisis numérico Pandas y los notebooks de iPython.

La integración con iPython permite compartir en la web los análisis hechos en un navegador web, compartiendo no solo los resultados sino también la metodología utilizada. Esta característica hace especialmente potente el ecosistema PyBossa, dado que un proyecto desarrollado con esta tecnología permite compartir todo el proceso: datos, código fuente y metodología para que otros investigadores puedan repetir el experimento y validar los resultados.

En resumen, la plataforma Crowdcrafting y su tecnología nos ha permitido analizar cien mil imágenes en menos de un mes, y gracias a sus herramientas hemos podido realizar un análisis de manera sencilla y eficaz, tal como se muestra en este trabajo.

A continuación se describen cada uno de los proyectos creados en Crowdcrafting.

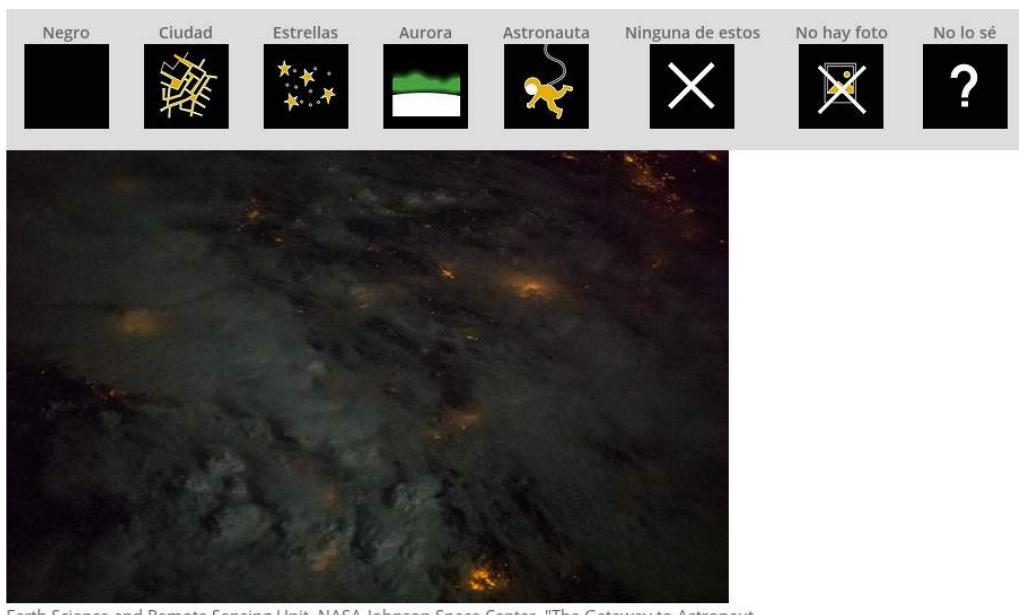
4.3.2. Aplicaciones web

Clasificación de imágenes: Dark Skies ISS

Con el objetivo de clasificar las imágenes nocturnas tomadas desde la Estación Espacial Internacional, se procedió a filtrar las imágenes no catalogadas del archivo. En la primera fase del experimento se procesó una muestra de las imágenes tomadas durante la misión 30 de la Estación Espacial Internacional debido a la presencia del NightPod. Sin embargo, debido al éxito del programa, se han clasificado todas las imágenes no catalogadas del archivo que cumplían las siguientes condiciones: Focal del objetivo comprendido entre 40 mm y 999 mm y altura del Sol en el momento de la toma 0.

La aplicación consiste en un interfaz simple en el que se muestra la imagen a clasificar. Al usuario se le proponen ocho categorías donde incluir la imagen a criterio del voluntario. Estas categorías son las siguientes:

Black/Negro Para que los usuarios incluyan imágenes totalmente oscuras que nos serán de ayuda para caracterizar el ruido de la cámara en diferentes ajustes.



Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA-Johnson Space Center. "The Gateway to Astronaut Photography of Earth."

Figura 4.1: Captura de pantalla de la aplicación Dark Skies. Consiste en un interfaz de iconos que representan las diferentes opciones de clasificación. Los iconos fueron diseñados por Juan Rodrigo Solera Sánchez-Seco y Marta Vela Ibañez , voluntarios en el taller “Madrid laboratorio Urbano” realizado en MediaLab-Prado.

City/Ciudad Esta categoría es la de mayor interés para nuestro proyecto y en ella se incluyen las imágenes en que el objeto principal es una ciudad y en ese caso se solicita al voluntario que evalúe:

Cobertura nubosa y enfoque Se clasifican mediante tres iconos en que aparecen la imagen de una ciudad sin nubes, otra con alguna nube y otra en que parece totalmente cubierto y de manera similar se debe evaluar el grado de enfoque de la imagen.

Stars/Estrellas Los voluntarios marcan las imágenes con campos estelares preferentemente compuestos por estrellas. Sin embargo han incluido también imágenes del Sol, la Luna, planetas y objetos puntuales tipo botes de pesca. La clasificación de este subgrupo puede ser realizada de manera automática mediante el uso de Astrometry.net Lang et al. (2010).

Aurora/Aurora Los voluntarios han identificado en esta categoría principalmente imágenes con airglow, auroras y otros fenómenos atmosféricos que en principio no son de interés para esta tesis. Sin embargo pueden ser de interés para otros estudios.

Astronaut/Astronauta Los astronautas rara vez aparecen en las imágenes del archivo, por lo que es complicado encontrarles. Por ello y con fines puramente lúdicos incluimos esta categoría. Ha sido utilizada por los voluntarios también para identificar partes importantes de la estación espacial o cualquier imagen en el interior de la nave.

None of this/Ninguno de estos En ocasiones, el objeto capturado no puede entrar en ninguna de las categorías anteriores. Unas veces debido que la hora de la cámara es errónea y por tanto su ubicación aproximada; otras a que se trata de una puesta de sol, un fallo en la captura, reflejos en los cristales, etc., etc. Por tanto esta categoría está para que los voluntarios, aun conociendo de que se trata el objeto lo cataloguen en esta sección miscelánea.

No Photo/No hay foto Algunas veces hay un fallo en el servidor de la NASA o en la configuración de la tarea y no aparece ninguna imagen asociada a la tarea. Esta categoría incluye esos casos.

I don't know/No lo sé Por último, creamos una sección para aquellas imágenes que la gente no era capaz de identificar.

Análisis y resultados El proceso de catalogación se realiza de manera independiente por varios voluntarios para mantener una calidad mínima de los datos. Dado el número tan alto de tareas a realizar (unas 120.000 imágenes nocturnas con focales comprendidas entre 40 mm y 999 mm), es necesario llegar a un compromiso entre el factor de repetición y la eficiencia de la clasificación.

Para estimar cual es el mejor factor de repetición, las primeras 6000 tareas se realizaron con un factor de repetición mínimo de 30. Después, comprobamos cual había sido la clasificación con factores de repetición menor. De esta manera vemos en la figura 4.2. que para el factor de repetición, 5 es el óptimo, ya que tan solo el 10% de las imágenes son clasificadas en una diferente categoría. Inspeccionadas las imágenes que corresponden al 10% que varía, observamos que son imágenes de gran campo en que no está claro para el voluntario qué categoría es la más adecuada.

Para verificar la calidad final hemos comparado los resultados de algunos de los voluntarios que han realizado un número muy importante de tareas con las más de 7000 tareas realizadas por nosotros que constituyen el grupo de control.

Tras aplicar un filtro de mediana a las respuestas de los voluntarios, hemos seleccionado 30.000 imágenes clasificadas como ciudades.

Localización de Imágenes: Lost at Night

Es el paso que se realiza una vez que se sabe con certeza que la imagen corresponde a una ciudad. Es necesario ya que desconocemos la ubicación de la mayoría de las imágenes y sólo se conoce el nadir de la ISS para orientarnos sobre en qué parte del planeta ha sido tomada la imagen.

La aplicación muestra la imagen problema con la posibilidad de girar la imagen y hacer zoom en la misma. A su lado, tenemos una pantalla con tres posibles mapas. Mapa de Google Maps, imagen de satélite diurna de Google Maps y mapa de Open Street map. En el extremo derecho tenemos la imagen Earth at Night 2012 de NOAA. Sobre esta última imagen se pinta un punto rojo que indica el nadir de la ISS.

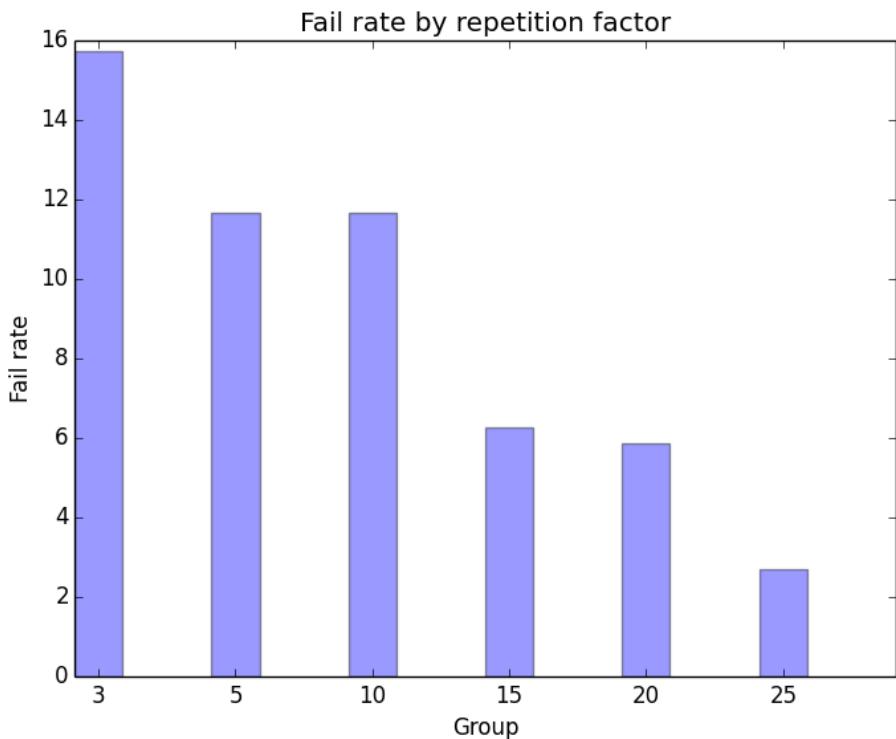


Figura 4.2: El porcentaje de diferencias en la clasificación según el número de repeticiones en la clasificación. Se aprecia como a medida que crece el número de voluntarios que inspeccionan una imagen, disminuye la cantidad de “errores”. Finalmente se optó por llegar al compromiso de que 5 fuese el número de voluntarios mínimo que inspeccionaran cada imagen, ya que solo hasta los 15 voluntarios se bajaba del 10% de “errores”.

Los voluntarios marcan una posición de la imagen que puedan reconocer y la correspon-

diente en el mapa. De esta manera, hasta 5 voluntarios revisan cada imagen y obtenemos las coordenadas del lugar. Los usuarios pueden visualizar en la parte superior derecha las coordenadas de la imagen y geográficas del lugar seleccionado.

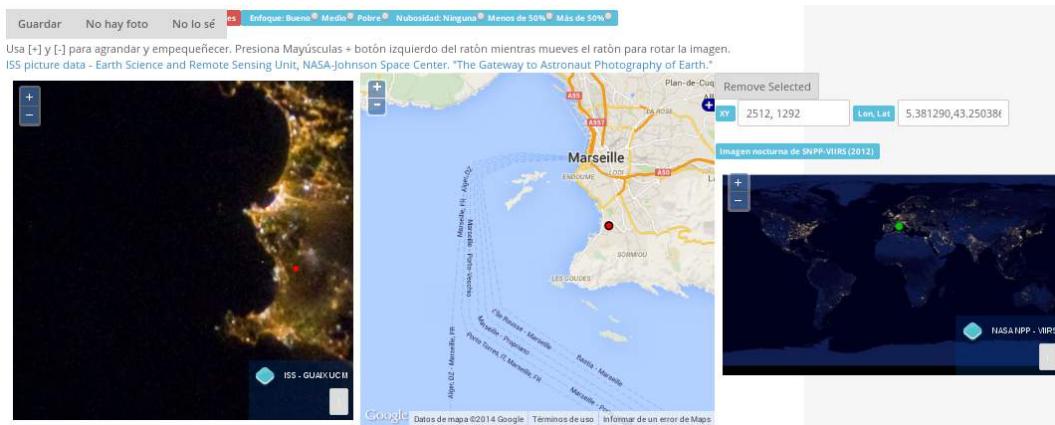


Figura 4.3: Captura de pantalla de la aplicación Lost at Night. Se muestra la imagen problema y a su derecha un mapa con varias capas. Además se añade un mapa nocturno

Análisis Las tareas se realizan actualmente con un factor de repetición de uno. Las respuestas son dadas en formato Json, en el que cada respuesta está identificada por un ID, hora, coordenadas, usuario, etc. Se procesan mediante un script de python.

Resultados De las 6857 imágenes ya procesadas a fecha de 27 de noviembre de 2014, se ha aplicado un filtro de mediana a las posiciones y seleccionado sólo aquellas imágenes que tiene al menos 3 respuestas. Obtenemos así la localización de 2300 imágenes.

Georreferenciación de Imágenes: Night cities ISS

Con el mismo interface que en la aplicación anterior, pero en este caso aplicado a una imagen de una ciudad o región ya conocidas, el usuario debe identificar regiones comunes en la imagen y en el mapa. De esta manera se establecen puntos de control que puede ser utilizados posteriormente para la georreferenciación.

La única variación en el interface de la aplicación anterior es que la cantidad de puntos que el usuario puede introducir es superior. El número mínimo recomendado es de 3 puntos. La gran cantidad de repetición de las tareas en esta fase (30) hace que haya imágenes con una gran cantidad de puntos.

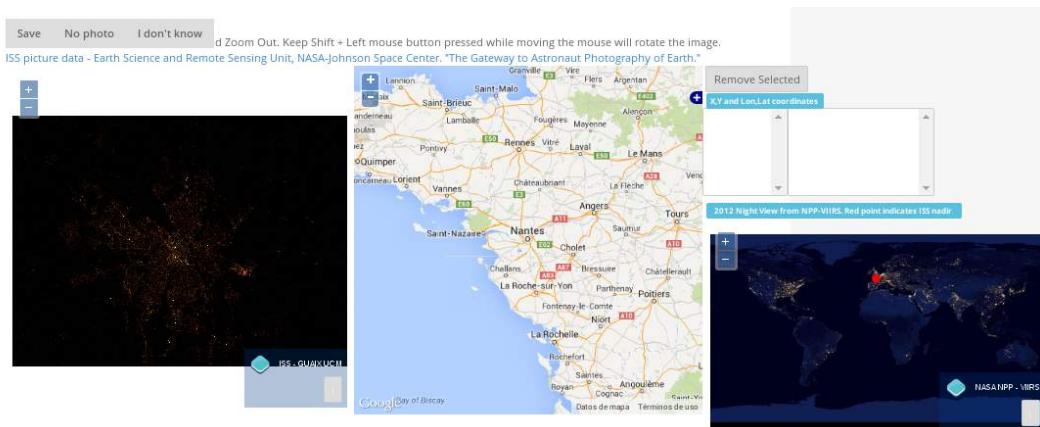


Figura 4.4: Captura de pantalla de la aplicación NightCities. La interface es idéntica a la de LostAtNight con la peculiaridad de que en esta se pueden marcar varios puntos en la imagen para realizar la georreferenciación.

Análisis Como en el caso anterior se utiliza un procedimiento de python para realizar la extracción de los datos. A continuación se genera un fichero GCP de puntos de control. Utilizando Gdal (Zhao et al. 2011) se rectifican automáticamente, creando una imagen geotiff que contiene toda la información geográfica. En un futuro, cuando se disponga de tomas de campo plano para todos los objetivos, se podrá añadir al procesado.

Resultados Se han georreferenciado más de 700 imágenes y una muestra está a disposición de los investigadores en la Google Maps Gallery. Tras su cierre han sido trasladadas al servidor de GUAIX temporalmente⁴. Se está trabajando en la publicación completa, en colaboración con la empresa Cartodb.

4.3.3. Divulgación de los resultados y captación de voluntarios

Las aplicaciones anteriores carecen de utilidad sin la participación de voluntarios que las usen. Por ello éramos conscientes de que era fundamental crear una página web atractiva que motivara a los voluntarios a participar en el programa y que de paso divulgara algunas de las razones por las que tiene interés esta investigación. Para poder realizar esta tarea con calidad decidimos participar en el “Taller Urbano de MediaLab-Prado”. Dentro del taller decidimos usar una plantilla de Bootstrap (<http://getbootstrap.com/>) para html5 con el objetivo de que la web fuese visible en dispositivos móviles y ordenadores. En el taller recibimos ayuda para hacer los iconos del interfaz de la aplicación DarkSkies, que fueron realizados por Juan Rodrigo

⁴<http://guaix.fis.ucm.es/gallerycitiesatnight>

Solera Sánchez-Seco y Marta Vela Ibañez. El diseño de la web fue realizado por el estudiante asesorado por Beatriz Fernández (soporte CSS) y Pablo Ripollés (soporte html5), participantes en el taller de Medialab-Prado. Finalmente la página web fue colgada en el dominio www.citiesatnight.org, hospedada en la servidor de <http://guaix.fis.ucm.es>, administrado por Sergio Pascual.

Las notas de prensa enviadas por la Universidad Complutense de Madrid en julio de 2014 (GDirección_de_Comunicación_UCM (2014)) y NASA en agosto del mismo año han tenido un efecto desigual en la captación de voluntarios. La primera campaña impactó en 49.000 usuarios únicos de los cuales un 50 % procedían de Estados Unidos, un 17 % de España, 4,7 % de Canadá, 4,5 % de Reino Unido, 3,8 % de Brasil y el resto de otros 157 países. Pero tan sólo se realizaron 6000 tareas antes del 14 de agosto de 2014. Las mayores fuentes de tráfico de este periodo fueron el periódico The Atlantic (35 %) y El Mundo (5 %). También son de destacar las visitas por Facebook (8 %). Tuvimos cobertura de la noticia desde los Twitters oficiales de ESA, CSA-ASC y Facebook oficial de la ISS (controlado por el JSC).

Tras el 14 de agosto y la publicación de la nota de prensa de la NASA Gaskill (2014), el impacto fue global y se hizo viral. Más del doble de usuarios visitaron las aplicaciones (106.300 a fecha de 16 de septiembre de 2014) y el impacto fue mayor en muchos países en que no había tenido impacto previamente. Un 31,39 % provenían de Estados Unidos, un 11 % de Alemania, 6,9 % de Nueva Zelanda, 4,5 % de Italia, 4,5 % de Reino Unido, 4,2 % de Canadá, 3,5 % de España, 3,4 %, de Lituania 3,1 %, de Letonia, 3,1 % de Dinamarca, 2,18 % de Australia y un 25,2 % de otros países (176). Estos voluntarios fueron mucho más eficientes y han generado más de 103.000 tareas. Estas circunstancias explican el gráfico de evolución de realización de las tareas (Figura 4.5)

4.4. Resultados

- Se ha creado una plataforma de Ciencia Ciudadana para la clasificación, catalogación y georreferenciación de las imágenes ISS/D3S del repositorio de la NASA.
- Hasta la fecha se han etiquetado más de 130.000 imágenes del archivo, se han localizado más de 2300 imágenes y se han georreferenciado más de 700. Esta base de datos constituye actualmente la mayor base de datos multiespectrales nocturnos del mundo, en la que han participado más de 15.000 voluntarios de todo el mundo.
- Los productos finales permitirán realizar un mapa global de la contaminación lumínica vista desde el espacio con mayor resolución espacial que la proporcionada por los satélites actuales y con información de color en tres bandas.

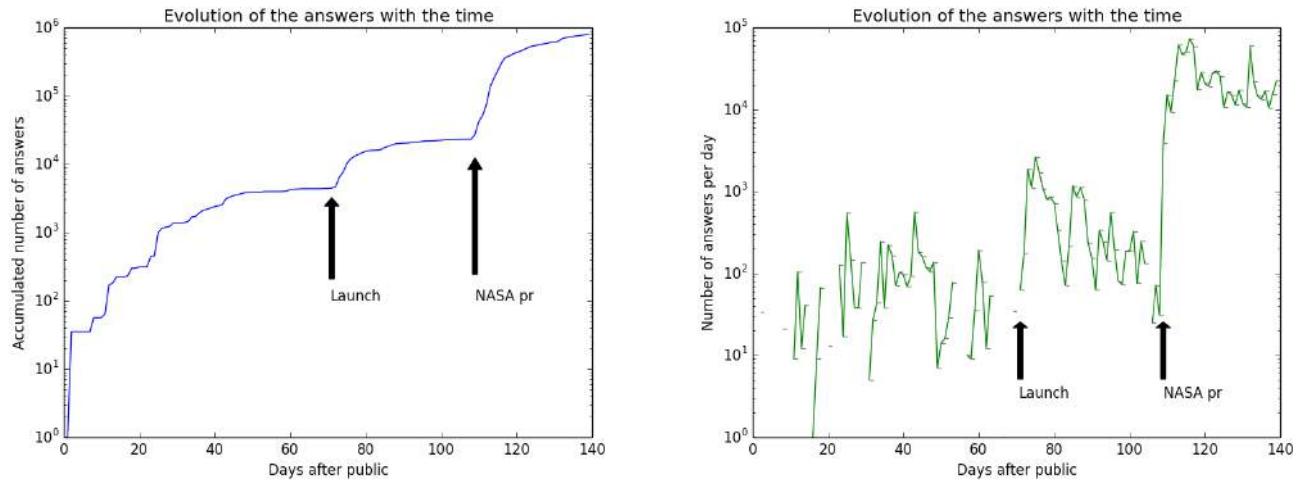


Figura 4.5: Evolución del número de respuestas en la aplicación DarkSkies. A la izquierda el número de respuestas acumulado y a la derecha el número de respuestas por día. Se destacan las fechas del lanzamiento oficial de las aplicaciones y el lanzamiento de la nota de prensa de NASA.

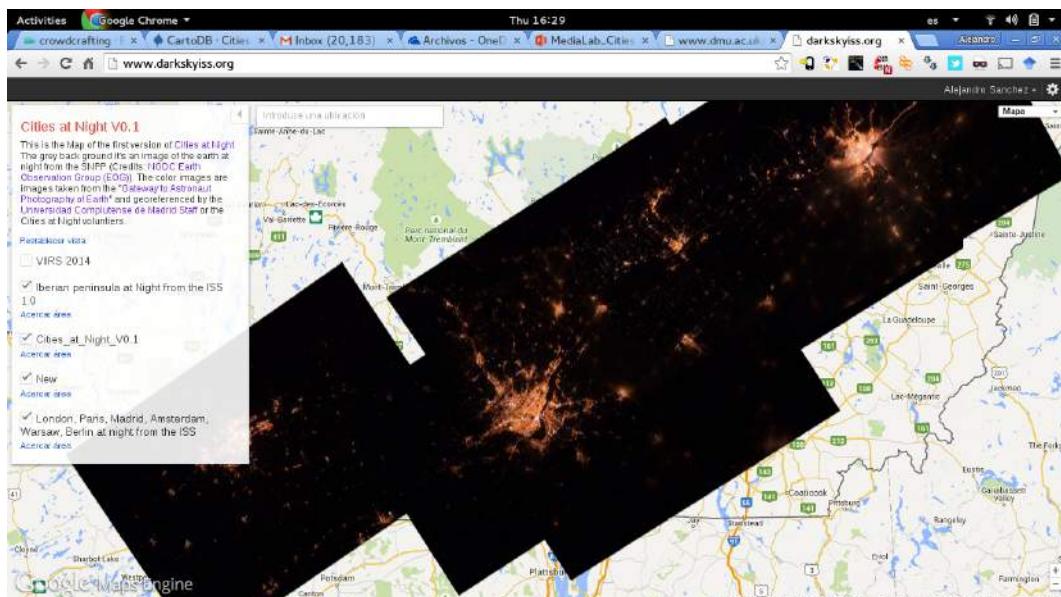


Figura 4.6: Ejemplo de imágenes georreferenciadas por voluntarios de Cities at Night. Fuente:<http://www.darkskyiss.org/>

Capítulo 5

Técnicas aéreas de teledetección de fuentes de contaminación lumínica

5.1. Introducción

Se han estudiado otras técnicas de observación ya probadas para compararlas con los métodos de detección y medida de fuentes de contaminación lumínica que se han descrito. Los resultados de esta sección son fruto del estado actual de diversos trabajos en marcha, de los cuales aún no se ha concluido el análisis científico de los datos. Sin embargo, el estado actual de dicho análisis nos permite conocer las bondades y limitaciones de estos métodos. Al final de este capítulo proporcionaremos una comparativa para poder orientar futuras exploraciones hacia el método de teledetección más adecuado para cada tipo de estudio.

Debido a su naturaleza nocturna, la contaminación lumínica es más difícil de detectar que los objetos tradicionales de estudio mediante teledetección, generalmente mediante vuelos y cámaras especiales. Por lo tanto es necesario adaptar los instrumentos a las condiciones de baja iluminación. A esta dificultad se añade el problema de disponer del rango dinámico suficiente para realizar los diversos estudios. De las imágenes de VIIRS/DNB podemos deducir por ejemplo que en el entorno de Madrid existen fuentes detectadas desde 0.2 hasta $300 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, pero en las imágenes de la ISS se registran fuentes mucho más intensas de $4500 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, es decir, que hay una diferencia de 4 órdenes de magnitud.

Por otro lado, la resolución espacial es crucial en algunos estudios. Por ejemplo Kuechly et al. (2012) discute la influencia de diferentes resoluciones espaciales a la hora de determinar de forma automática los usos del suelo. Encuentran que a partir de los 50 m de resolución hay una diferencia de un 17 % entre el valor calculado para el flujo estimado para la iluminación en calles comparado con un estudio con 1 m de resolución, mientras que hasta 20 m la discrepancia es sólo el 6 %. Se debe recordar que es necesario realizar medidas con una separación de 1.5 m

de acuerdo al Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior (RD 1890/2008), por lo que con una resolución de 20 m es imposible estimar la distribución de la luz en un vial.

Los datos de la ISS/D3S tienen una cierta resolución temporal ya que se obtienen a diferentes horas de la noche de acuerdo a la órbita de la ISS y la disponibilidad de los astronautas. Sin embargo sólo dispone de 3 canales, por lo que es imposible distinguir líneas espectrales. Para estudios de contaminación lumínica sería deseable aumentar la resolución temporal, espectral y espacial que, como se describe a continuación, aumentan los costes de manera significativa.

5.2. Imágenes aéreas con cámara hiperespectral

Las cámaras hiperespectrales son de uso común en teledetección diurna. Suelen ser radiómetros de barrido que permiten obtener información en múltiples bandas. Diferentes sistemas disponen desde decenas a cientos de canales que equivalen a espectroscopía de baja resolución para cada punto de la imagen. Sobre esta técnica y su aplicación a la contaminación lumínica hay ya numerosas publicaciones (Barducci et al. 2003, 2006; Elvidge & Green 2005; Tardà et al. 2011). En general, estos sensores no son suficientemente sensibles para medir la iluminación de la calzada. Sin embargo Metcalf (2012) ya demostró que es posible identificar con éxito las fuentes de contaminación lumínica mediante imagen hiperespectral.

En las siguientes secciones se describe un análisis de los datos hiperespectrales en vuelos dedicados útiles para el estudio de la contaminación lumínica sobre Madrid que se han realizado hasta la fecha: (Moreno Burgos et al. 2010) (Sobrino et al. 2009b). Para el primero, (Moreno Burgos et al. 2010) se realizaron dos vuelos, uno el 04/03/2008 sobre el Madrid capital y otro el 16/07/2008 sobre las zonas Este y Oeste limítrofes con Madrid capital. Para el segundo, se realizaron dos pasadas perpendiculares entre sí sobre la capital.

5.2.1. Vuelos sobre Madrid

Uno de los medios más importantes con los que contamos son los vuelos con la cámara hiperespectral AHS como parte de los aviones instrumentados del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial - Esteban Terradas (INTA)¹.

Las características generales del instrumento pueden consultarse en Rejas et al. (2004). Los datos estudiados constan de 20 canales de aproximadamente $0.03 \mu\text{m}$ de ancho cada uno en el rango de las 0,43 micras a 1,030 micras (ejemplo en fig. 5.11) El FOV del instrumento es de 90° . Esto provoca que el ángulo de aceptación en los extremos sea de casi 45° y por tanto

¹<http://www.inta.es/grandesInstalaciones.aspx?Id=2&SubId=9>

se produce el mismo tipo de apantallamiento ya citado en la sección 2.3 cuando vuela en su configuración estándar a 1376 m de altitud. Además del análisis de las imágenes se concluye que la mayoría de calles presentan una radiancia tal que están casi en el límite de detección. Sin embargo, este instrumento es ideal para el estudio de puntos calientes. Estos puntos calientes son lugares con iluminación ornamental muy colimada que saturan las imágenes de la ISS. En estos casos hay señal suficiente y por tanto se puede obtener un espectro de baja resolución de la fuente y así poder clasificar fácilmente dicha fuente.

Reducción e inspección del Mosaico INDRA-INTA-AHS.

En el año 2008 se realizaron dos vuelos (04/03/2008 y 16/07/2008) correspondientes a Moreno Burgos et al. (2010). El vuelo, la toma de datos y la pre-reducción fueron realizados por INTA a petición de la empresa INDRA dentro del proyecto “Calidad Ambiental Urbana” financiado por la Comunidad de Madrid. La Dirección General de Economía, Estadística e Innovación Tecnológica ha accedido a la liberación de dichos datos para su uso científico.

Los datos son proporcionados por INTA con una pre-reducción. Sin embargo, como puede observarse en la imagen 5.1, la suma de las diferentes pasadas provoca una sobre exposición en las zonas de solapamiento. Para corregir este efecto se creó una máscara con la que se normaliza el flujo y se restó a la misma el ruido del canal #1 para minimizar el error sistemático presente en la imagen de la izquierda. En la figura 5.2 se puede observar el resultado final comparado con las calles y autopistas más importantes de la ciudad.

Desgraciadamente, aparte de la información visual que proporcionan las imágenes, la relación señal/ruido de las mismas es tan baja que no se ha realizado análisis fotométrico. Como conclusión, el instrumento AHS es ideal para trazar las fuentes más intensas pero no las calles debido a su baja sensibilidad. Sin embargo, este instrumento sería ideal en combinación con una cámara DSLR como se describe en la sección 5.3.

5.2.2. Calibración de ISS/D3S mediante radiancias INTA-AHS DESIREX 2008

Datos INTA-AHS del proyecto DESIREX 2008

El proyecto Desirex-2008 fue un proyecto para la caracterización de la isla de calor de Madrid. Para ello se tomaron medidas en la ciudad de Madrid por el día y por la noche, tanto en tierra como desde el aire². En esta sección usaremos los datos obtenidos por INTA-AHS que corresponden a los vuelos nocturnos de julio de 2008. Estos vuelos se realizaron de manera

²<http://www.uv.es/desirex/Fieldc.htm>

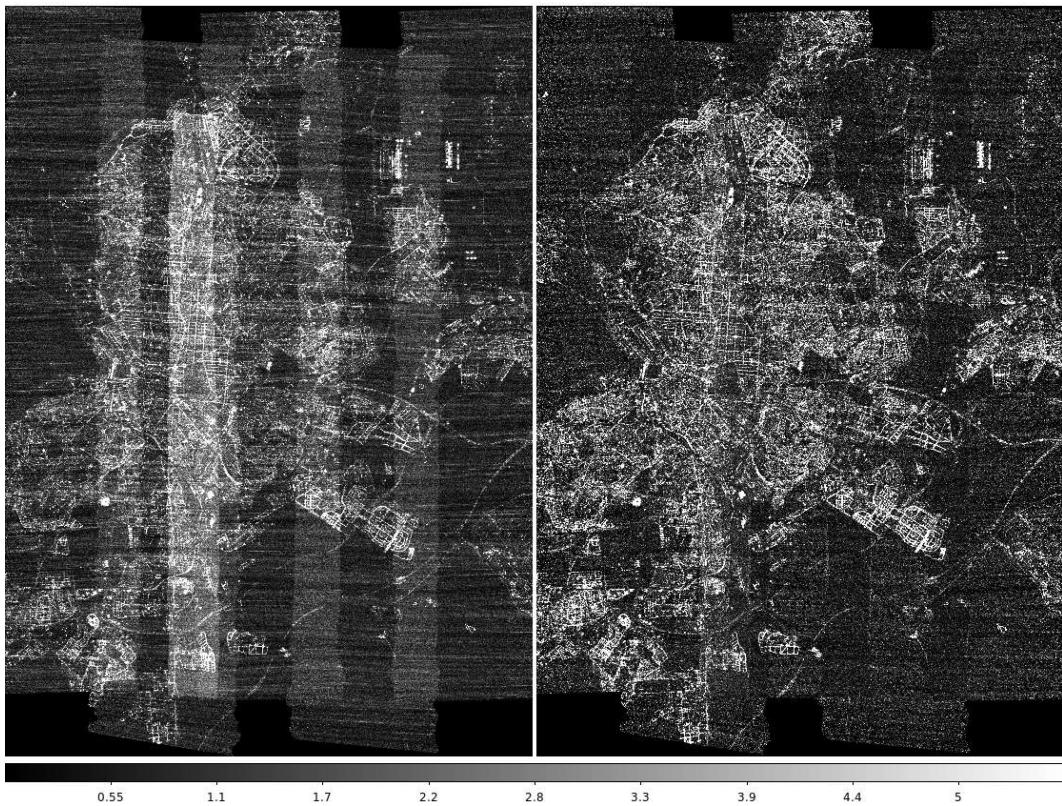


Figura 5.1: Izquierda. Imagen pre-reducida. Derecha. Imagen reducida. Resultado comparado de la reducción de los datos del día 04/03/2008.).

perpendicular sobre volando el centro de la ciudad. Se puede observar uno de los vuelos en la imagen 5.3.

Dentro del proyecto ESA-Desirex2008 los vuelos de INTA sobre Madrid registraron imágenes nocturnas en bandas del visible en la región espectral correspondiente a los canales rojo, verde y azul (RGB) de las cámaras digitales embarcadas en la ISS y, por lo tanto, son comparables. Ya que las imágenes AHS están calibradas (*AHS imagery at-sensor radiance, in $nW/cm^2/sr/nm$*) puede obtenerse una calibración de las imágenes desde ISS a través de esta información. De esta manera aunamos imágenes con calibración absoluta y mejor resolución (INTA-AHS) con imágenes que cubren todo Madrid a menor resolución pudiendo obtener una estimación del flujo radiado al espacio por el área metropolitana de Madrid. Tras conversaciones con los expertos de INTA, se solicitaron los datos a ESA. Las imágenes se encuentran en formato ENVI y han sido leídas con Python usando el paquete Spectral Python (SPy).



Figura 5.2: Arriba. Mosaico de imágenes AHS-INDRA. Abajo. Misma imagen con referencias espaciales.

Selección de la zona para calibración

Las imágenes nocturnas AHS en bandas del visible tienen poca señal. Pero ayudándose de las obtenidas en bandas infrarrojas y en las imágenes durante el día, es fácil identificar las zonas. No ha sido necesario georreferenciar las imágenes para los propósitos de esta calibración. En la imagen AHS_080625_2215Z_P01I2_L10020_PT12 se detectan seis focos aislados correspondientes a grandes luminarias en una zona de servicio del Metropolitano de Madrid

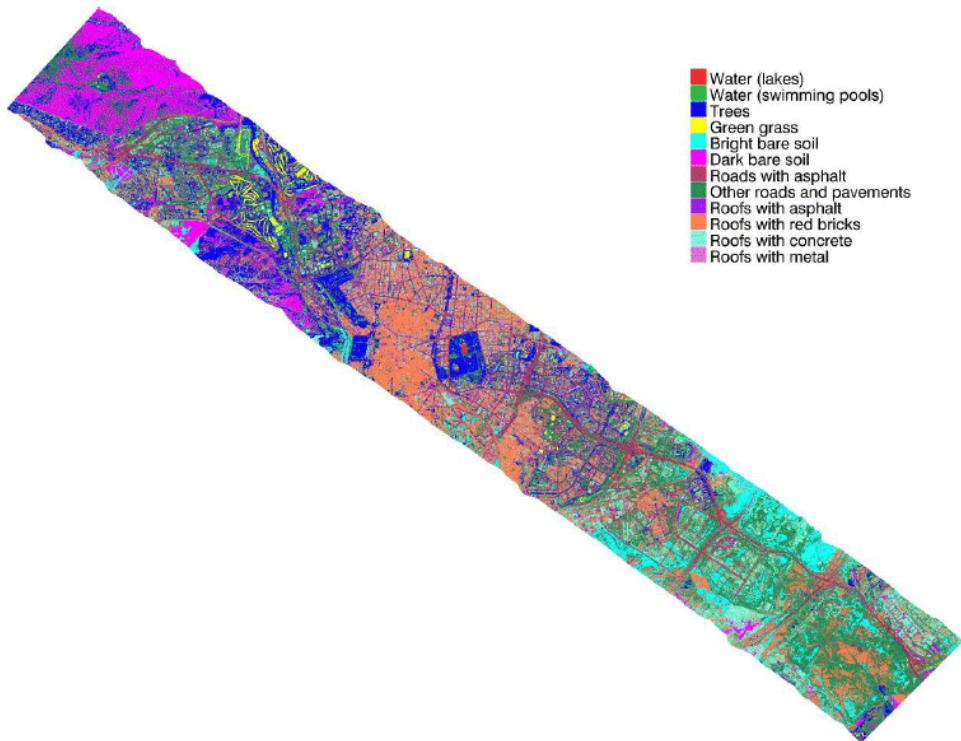


Figura 5.3: Clasificación de albedos y superficies en el vuelo este-oeste (AHS flight P01I1, 4th July at 11:16 UTC)

cerca de La Gavia (Depósito número 12, Valdecarros, ver figura 5.7). Esta ubicación es ideal para la calibración al ser un lugar aislado, con una señal ruido alta y sin la presencia de edificios altos.

Comprobación de la calibración

De la imagen multiespectral AHS se han seleccionado y sumado los cinco primeros canales correspondientes a band names = Ch#1, Ch#2, Ch#3, Ch#4, Ch#5 centradas en las longitudes de onda 0.456700, 0.483550, 0.512650, 0.542600, 0.571650 (en micras) que son relevantes para comparar con la banda G de la cámara Nikon D3S de la ISS. La anchura total de la banda sintetizada es de aproximadamente 114 nm. Las medidas realizadas se detallan en la tabla 5.1 para la luminaria #6 y en la tabla 5.2 para todas las luminarias.

De la imagen sintética resultante se miden las cuentas correspondientes (usando el programa de procesado astronómico IRAF) en aperturas (en píxeles de la imagen en la tabla) que engloban la mancha de luz de cada luminaria. Se observa que hay una dispersión en las medidas salvo para las luminarias marcadas como #3 y #4. Suponiendo que las luminarias son semejan-



Figura 5.4: Imagen diurna de detalle de la zona del Depósito 12 (Valdecarros) y en círculos rojos marcados los postes que soportan los focos que se están estudiando.

tes la diferencia debe ser consecuencia de diferentes reflectividades del suelo sobre el que se apoyan. Es fácil observar en el recuadro de la figura 5.4 que la luminaria #6 apoya en un suelo de cemento gris con albedo mayor que la luminaria #2, mientras que las otras apoyan en suelo más oscuro. Se ha usado la luminaria #6 en adelante con una media de 35.97 cuentas/pixel en el suelo iluminado y supongamos que recibe la luz verticalmente y que la observación es cenital (θ ángulo de incidencia en el detector es nulo).

La radiancia de una superficie es igual a la irradiancia recibida multiplicada por la reflectividad del material (albedo) y un factor geométrico, ya que suponemos que la superficie actúa como un difusor que emite en todas direcciones por igual. En este caso la superficie es un material tipo hormigón en las zonas claras y asfalto u hollín en las zonas oscuras.

$$L = \eta \cdot I / \pi \quad (5.1)$$

$$\text{Radiancia espectral: } L = 35.97 nW / (cm^2 \cdot sr \cdot nm) \quad (5.2)$$

Por otro lado la irradiancia es igual al flujo recibido por unidad de área:

$$I = F / A \quad (5.3)$$



Figura 5.5: Imagen nocturna de detalle de la zona del Depósito 12 (Valdecarros) desde la ISS.

F : (W) flujo radiante o potencia emitida, A : (m^2) área emisora. Determinamos la escala de las imágenes usando Google Earth. En la imagen las farolas (5) y (6) se encuentran a 28 píxeles de distancia. La distancia es de 118 metros, usando IBERPIX versión 2, la última del IGN.

$$Escala = 118/28 = 4,214 \text{ m/pixel} \quad (5.4)$$

Apertura de 12x12 píxeles $\rightarrow 12 \text{ pix } 4.214 \text{ m/pixel} = 51 \text{ m}$ aproximadamente.

$$A = 51 \cdot 51 = 2601 \text{ m}^2 \quad (5.5)$$

Las imágenes están calibradas de forma que una unidad de cuenta es $nW/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$
 $nW/(cm^2 \cdot sr \cdot nm) = 10^{-9}W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm) = 10^{-5}W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$ (unidades SI).

Canal	Longitud de onda	Lum. #6	[16:31,67:80]	Todas	[10:71,18:79]	[68:98,68:98]
1	0.456700	2.646	2.304	1.703	1.848	1.485
2	0.483550	2.882	2.277	1.216	1.319	1.399
3	0.512650	2.778	2.107	1.309	1.486	0.847
4	0.542600	2.39	1.920	0.977	1.061	0.767
5	0.571650	25.54	18.05	3.018	6.014	1.019
6	0.600300	43.35	30.57	4.287	9.164	1.070
7	0.629150	16.28	11.59	2.034	3.822	0.702
8	0.658550	6.465	5.054	1.675	2.147	1.403
9	0.687550	4.139	3.504	1.467	1.862	1.224
10	0.716450	2.694	1.661	1.232	1.221	0.938
11	0.745500	2.569	1.746	1.157	1.276	0.983
12	0.774200	2.882	2.634	1.559	1.676	1.446
13	0.803450	7.611	5.781	1.912	2.418	1.525
14	0.833400	13.42	9.866	2.367	3.495	1.720
15	0.863550	2.028	1.906	1.564	1.666	1.494

Tabla 5.1: Medidas en los diferentes canales para la luminaria #6. Las unidades de son $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$. Las columnas cuarta, sexta y septima son medidas del fondo y la quinta el promedio de las anteriores.

$$\text{Radiancia media espectral: } L = 36 \cdot 10^{-5} W/(m^2 \cdot nm) = 3.6 \cdot 10^{-4} W/(m^2 \cdot nm) \quad (5.6)$$

$$\text{Irradiancia espectral: } I = \Pi \cdot L / \eta = 3.1416 \cdot 3.6 \cdot 10^{-4} / 1 = 0.00113 W/(m^2 \cdot nm) \quad (5.7)$$

$$\text{Flujo radiante espectral: } F = I \cdot A = 0.00113 W/(m^2 \cdot nm) \cdot 2601 m^2 = 2.94 W/nm \quad (5.8)$$

$$\text{Flujo radiante total: } F = 2.94 W/nm \cdot 100 nm = 294 W \quad (5.9)$$

Si en lugar de albedo $\eta = 1$, usamos $\eta = 0.20$ válido para asfalto (véase la tabla de informe Sobrino et al. (2009a))³:

$$\text{Irradiancia espectral: } I = \pi \cdot L / \eta = 3.1416 \cdot 3.6 \cdot 10^{-4} / 0.2 = 0.00377 W/(m^2 \cdot nm) \quad (5.10)$$

$$\text{Flujo radiante espectral: } F = I \cdot A = 0.00377 \cdot 2601 = 9.81 W/nm \quad (5.11)$$

$$\text{Flujo radiante total: } F = 9.81 W/nm \cdot 100 nm = 981 W \quad (5.12)$$

³En la imagen de Google Earth se puede ver como el pavimento tiene una reflectividad similar a la de la calle colindante. Por ello escogemos esa reflectividad. Si bien, el suelo está compuesto de piedras y gravas oscuras y no hormigón o asfalto

AHS_080625_2215Z_P01I2_L10020_PT12 (canales #1 - #5) valor medio por pixel		
apertura	10x10	12x 12
1	24.16	19.60
2	28.51	23.74
3	27.15	22.76
4	27.16	22.28
5	37.99	30.33
6	45.94	35.97

Tabla 5.2: Medidas de las imágenes de las luminarias seleccionadas

Las mismas cuentas para la luminaria #1 proporcionan el mismo resultado con albedo 0.19, lo que es muy razonable. Resumiendo estos cálculos: para la luminaria #6 (que aparece como la más brillante) medimos con AHS $L = 35.97nW/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$ en una banda de 100 nm centrada en banda G y determinamos un flujo radiante total de 294 W, que equivale a que tenga 981 W de potencia eléctrica.

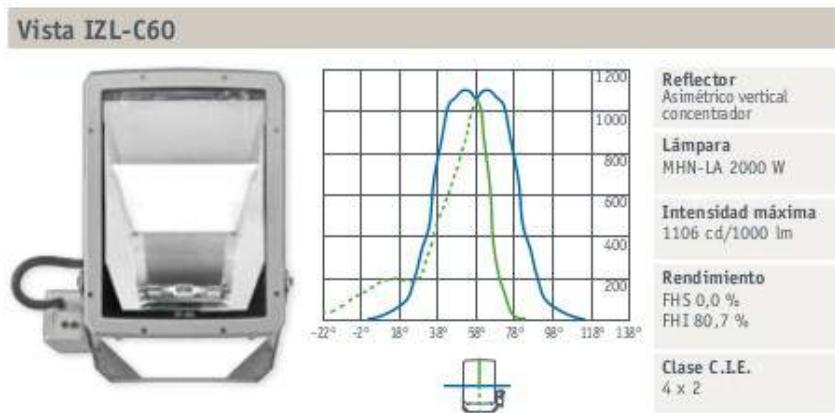


Figura 5.6: Modelo de luminaria Vista IZL-C60. Similar al usado en el Depósito 12.

Se verá más adelante que en realidad hay que sumar más canales de AHS para abarcar la respuesta del canal G de la cámara Nikon D3S. Observaciones in situ (desde fuera de la instalación) sugieren que cada poste o luminaria tiene seis focos de 1000 W (ver figura 5.8). En

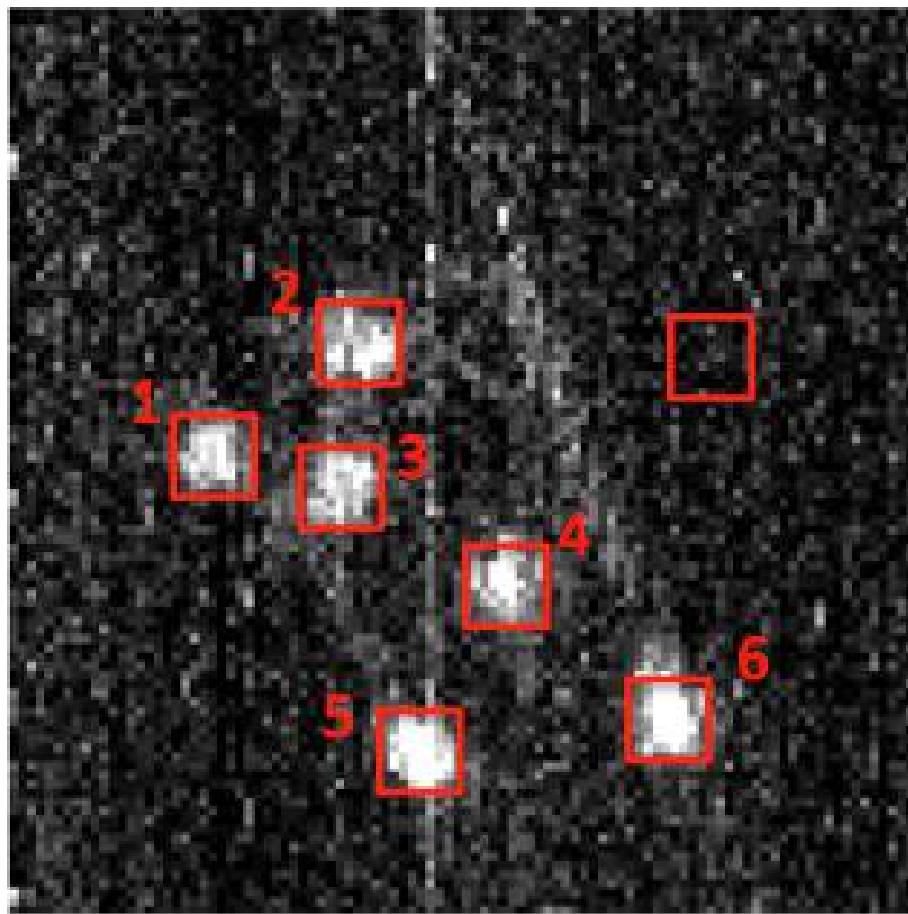


Figura 5.7: Detalle de las zonas de medida en los focos del Depósito 12. Suma de los canales #1-5 AHS.

ese caso:

$$\text{Potencia energética total} : 6000W \quad (5.13)$$

$$\text{Potencia lumínica} : 6000 \times [0.22 - 012] = [1320 - 720]W^4 \quad (5.14)$$

$$\text{Potencia en el suelo} : 1056 - 676W(\text{FHI } 80\%)^5 \quad (5.15)$$

$$\text{Potencia registrada} : 981 - 535W(\text{Cono de luz registrado } 92\%) \quad (5.16)$$

Estos cálculos son muy difíciles de acotar debido al número de parámetros desconocidos y sólo deben tomarse como comprobación de los órdenes de magnitud. En particular habría que revisar estos cálculos teniendo en cuenta que se han conservado los cálculos pesimistas de nuestro grupo con los factores 80 % y 75 %. También se ha usado un albedo $\eta = 0.35$ válido para hormigón seco (ver fig. 5.3), pero este número y medidas de flujo se deberían hacer *in situ*. Metro no ha autorizado aún la entrada en el recinto. (Tablas en página 100 de Desirex2008 final report (Sobrino et al. 2009a)). Para 500 nm el cemento tiene reflectividad 0.2 y el asfalto

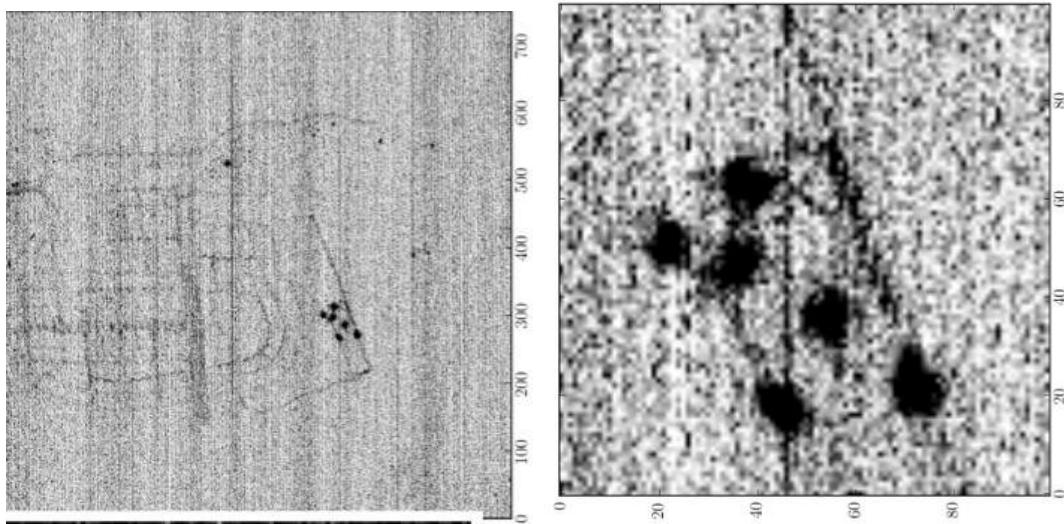


Figura 5.8: Detalle de los focos del Depósito 12 (Valdecarros) en la imagen AHS-Desirex.

0.1, aunque depende del tipo.

En las figuras 5.11 y 5.12, puede apreciarse cómo mediante la fotometría sintética es posible reproducir los colores observados por AHS en la fuente y los observados con la cámara Nikon D3S. De las medidas estimamos que la potencia que esperábamos de los focos fuese de 930 W.

Conclusiones Las imágenes AHS tienen una calibración coherente con los datos de que disponemos con la potencia de las lámparas. Estos datos podrían ser usados para la calibración de las imágenes ISS. Sin embargo, tal operación no ha sido realizada por la baja señal ruido del resto de la imagen tal y como se describe en la sección anterior. En un futuro esta vía debe ser explorada para la caracterización de los puntos calientes o saturados en la ISS.

5.3. Imágenes aéreas con cámara multiespectral

En la sección anterior hemos podido comprobar que las cámaras hiperespectrales permiten mucho detalle en resolución espectral, proporcionan una resolución espacial media, y aunque no son suficientemente sensibles como para tener señal en las calles. Para incrementar la resolución espacial y mejorar la relación señal/ruido se recurre a radiómetros bidimensionales o a cámaras digitales comerciales previamente caracterizadas montadas sobre aviones. Este método observacional proporciona imágenes más profundas y con más detalle. Hale et al. (2013) ya aplicó con éxito esta técnica, que permite distinguir las fuentes de manera más pre-

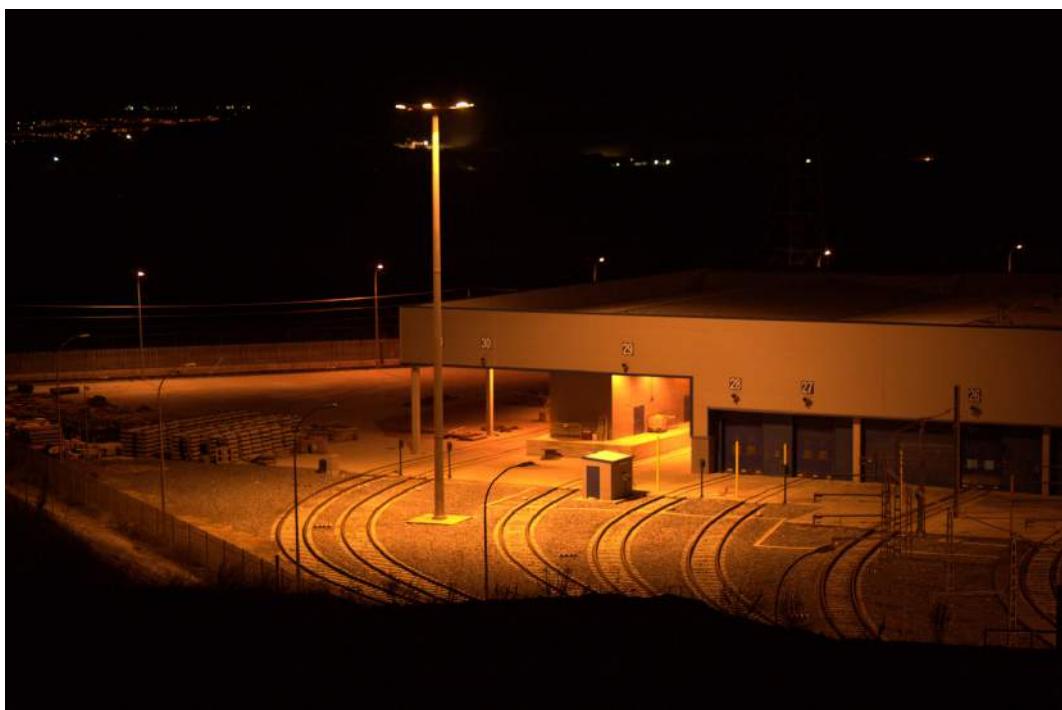


Figura 5.9: Imagen nocturna de los focos de las cocheras del Metro de Madrid. Se puede apreciar como los focos apuntan directamente hacia abajo, por lo que constituyen una fuente ideal para la realización de una calibración.

cisa que en el caso de la ISS/D3S, ya que la mayor resolución espacial reduce la confusión de fuentes. La resolución espacial máxima está limitada principalmente por la cantidad de pasadas necesarias para cubrir el área de medida.

Hale et al. (2013) realizó una calibración a posteriori mediante medidas en tierra y se mezcló información de las 3 bandas. El trabajo que se presenta en esta sección en un futuro generará mapas calibrados en las 3 bandas RGB.

5.3.1. Vuelo sobre la Ciudad de Berlín

Durante los meses de septiembre a diciembre de 2013, realizamos una campaña de medidas de diversa índole en la ciudad de Berlín. El vuelo sobre Berlín en el LARISA (Laboratory for Airborne Remote Sensing Instruments and Applications) fue una ampliación del ya realizado por Kuechly et al. (2012), pero utilizando en esta ocasión una cámara digital Nikon D3. La respuesta espectral normalizada de la cámara es virtualmente idéntica a la de la Nikon D3S utilizada por los astronautas en la ISS. Por este motivo una imagen calibrada de Berlín podrá ser utilizada para calibrar fácilmente las imágenes tomadas desde la ISS.



Figura 5.10: Lámpara de los focos, cocheras de Valdecarros. Información proporcionada por el área de Relaciones Institucionales. Fuente: Gabinete de Relaciones Externas, Metro de Madrid.

El vuelo se realizó el día 18 de octubre de 2013 entorno a las 10:45 UTC+2 a una altura nominal de 3000 m. Se utilizó un objetivo Nikon 50 mm f/1.8 G en su máxima apertura y con tiempo de exposición y ganancia/ISO prefijados ($T.\exp = 1/50$ s e ISO = 1600). Las imágenes fueron grabadas en formato nativo NEF y geolocalizadas mediante posición GPS con el suplemento Phottix Geo One GPS. La cámara fue montada sobre una plataforma estabilizada y se realizó la toma de imágenes de manera programada controlada por ordenador. El software utilizado fue Nikon Capture NX2, ya que otros programas utilizados como DigiCamControl daban tasas de grabación de datos de una imagen cada 6 seg o Gphoto2 una cada 10 seg, frente a la imagen cada 5 seg que permitía grabar el Nikon Capture NX2. Los pasos fueron calculados para crear un sobre recubrimiento de un 30 % con el programa Global Mapper 14 (véase la figura 5.13). Con todas las imágenes se ha realizado un mosaico preliminar de calidad no científica. La composición se ha realizado con el software AutopanoGiga. La resolución final del mosaico es de 1.65 m/px, si bien las imágenes originales tenían el doble de resolución (ver figuras 5.16 y 5.17).

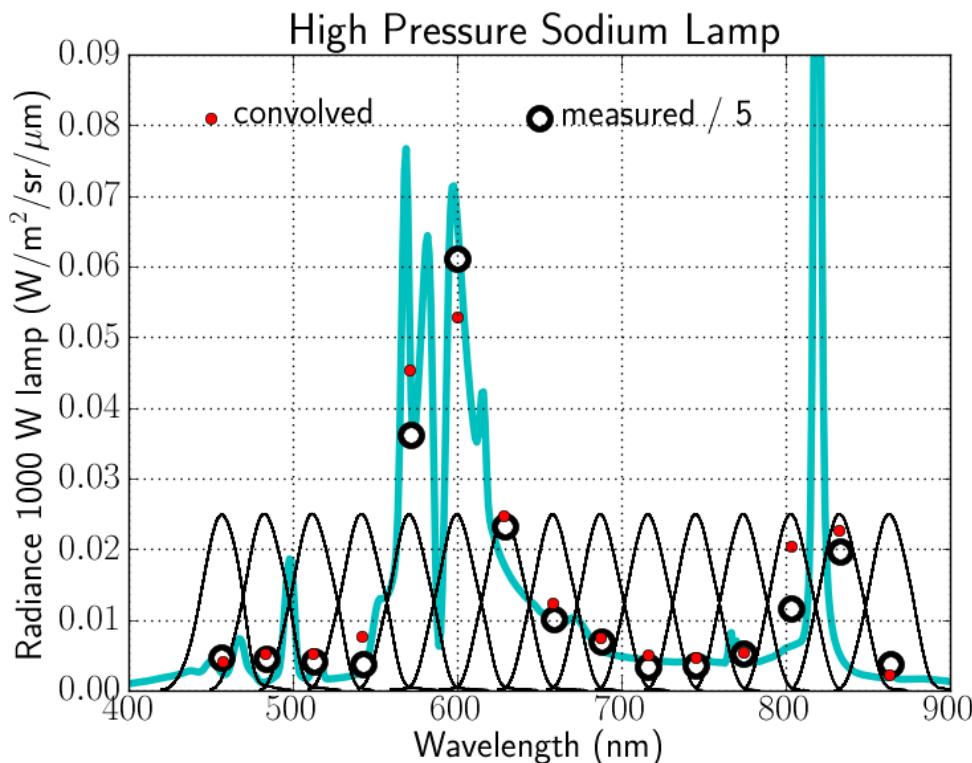


Figura 5.11: Resultados del vuelo nocturno de INTA (ESA-Desirex2008) en las bandas AHS mostradas en la figura (negro). Las medidas (círculos negros) corresponden a las luminarias de Sodio de Alta presión (HPS) de la estación de Valdecarros (Madrid). Se muestra un espectro de una lámpara similar de 1000W y los valores esperados (en rojo).

Además de la cámara Nikon D3, durante el vuelo se instalaron un espectrógrafo y una cámara infrarroja por parte de la FU (Freie Universität Berlin). También se colocó una cámara Watec 902H2 para grabar el vuelo, ver figura 5.14. Adicionalmente se utilizaron una Nikon D300, Lumix LX7, una cámara Gopro 3 Black y una cámara Gopro 2 para documentar el vuelo (Sánchez de Miguel 2013a).

Conclusiones Las imágenes con cámara DSLR(Digital-SLR, con SLR del inglés Single lens reflex) en avión permiten una sensibilidad y resolución muy alta comparada con otros sistemas de teledetección. Eso posibilita que sea posible trazar el nivel de iluminación en las calles. El mapa ya calibrado servirá para ver el nivel de iluminación de las calles de Berlín y compararlo con otros mapas en color como el de Birmingham (Hale et al. 2013).

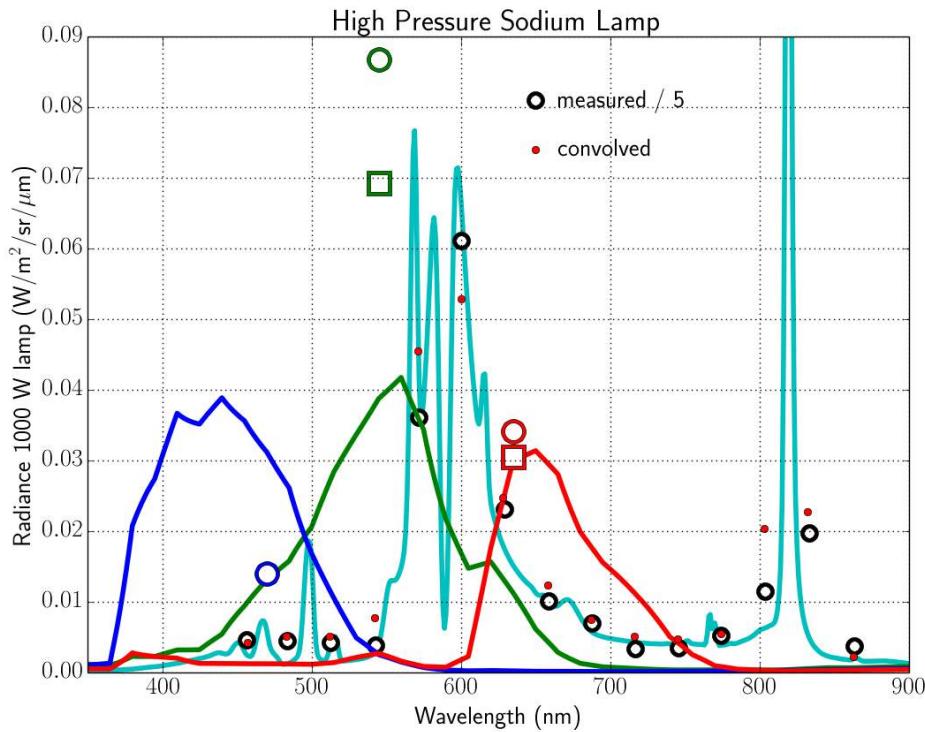


Figura 5.12: Medidas (círculos de color) de las luminarias de Sodio de Alta presión (HPS) de la estación de Valdecarros (Madrid) en las imágenes de la ISS (canales RGB). Se muestra un espectro de una lámpara similar de 1000W y los valores esperados (cuadrados) para una cámara Nikon D3.

5.3.2. Vuelos sobre la Ciudad de Madrid

A modo de demostración se han explorado otros métodos más económicos que el flete de un avión para la medida de imágenes de contaminación lumínica.

Globo sonda

Para el caso de Madrid, no recurrimos a un vuelo en avión por estar restringido el vuelo sobre la capital y a la falta de medios. Para poder realizar el vuelo recurrimos a instalar una cámara LUMIX LX7 (White 2013). Esta cámara era, en el momento del experimento, la cámara con mejor relación peso/luminosidad del mercado, siendo la única con un objetivo f/1.4 y que además hiciera imágenes en formato RAW.

La toma de las imágenes se realizó mediante un globo sonda volando a gran altura. Dado que la cámara podía tomar de manera automática hasta 60 imágenes, se programó la misma

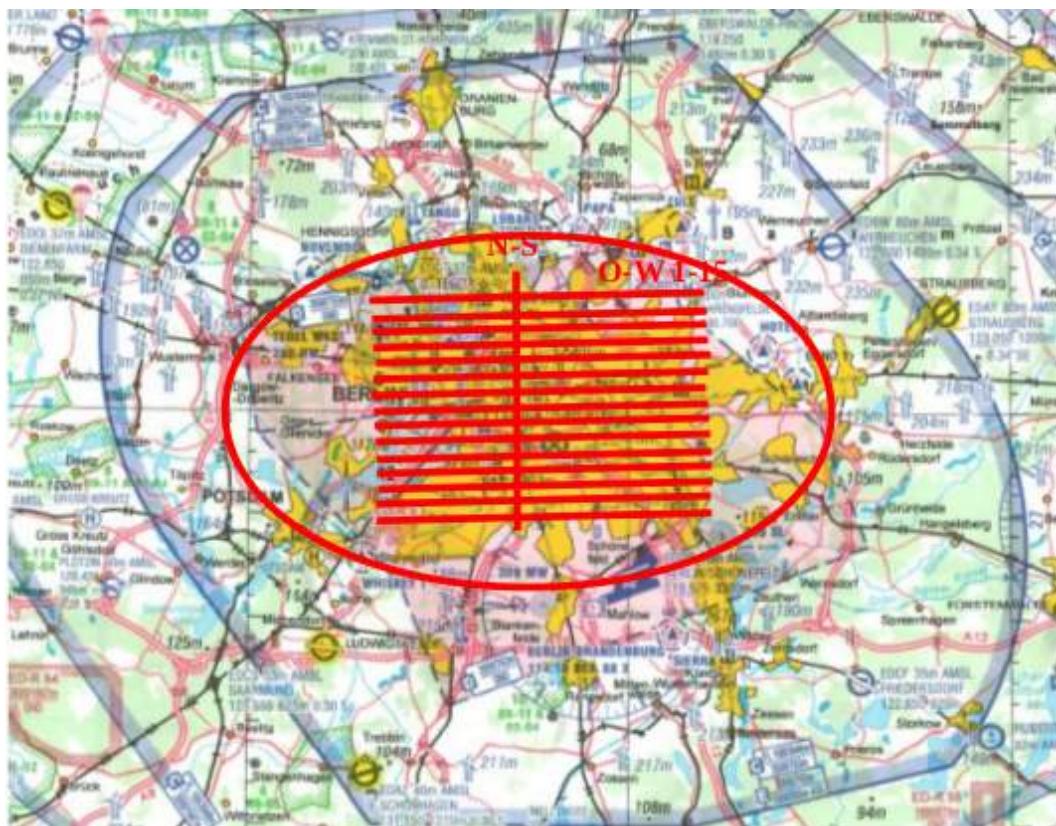


Figura 5.13: Plan de vuelo fotográfico sobre Berlín.

para que comenzara a tomar fotos cuando llevase una hora de vuelo. Por desgracia, estuvo principalmente nublado, por lo que solo se pudieron hacer algunas tomas entre las nubes. Por el momento no se ha realizado una calibración fotométrica, si bien dicha calibración es posible. No fué posible conocer la altura de vuelo por el mal funcionamiento de la sonda. Si bien, el dispositivo de recuperación funcionó correctamente y se pudo seguir en tiempo real la sonda y ser recuperada a pesar de que el GPS tracker no funcionó debido a estar en una zona sin cobertura GSM en Soria. La resolución aproximada de las imágenes es de 2 m /px. Veanse las figuras 5.18 y 5.19.

Medidas con dron

También se realizaron pruebas con una cámara GOPRO Hero 3+ (Herrick 2013) abordo en un Dron DJI Phantom 2 estabilizado. Las pruebas se realizaron en la Ciudad Universitaria de Madrid. Se corrigió parcialmente la deformación de la lente mediante el software ImageMagik (ImageMagick Studio 2008) utilizando como patrón la mesa óptica del LICA. El mosaico final se ha compuesto usando el software AutopanoGiga. La resolución del mapa actual es de 10

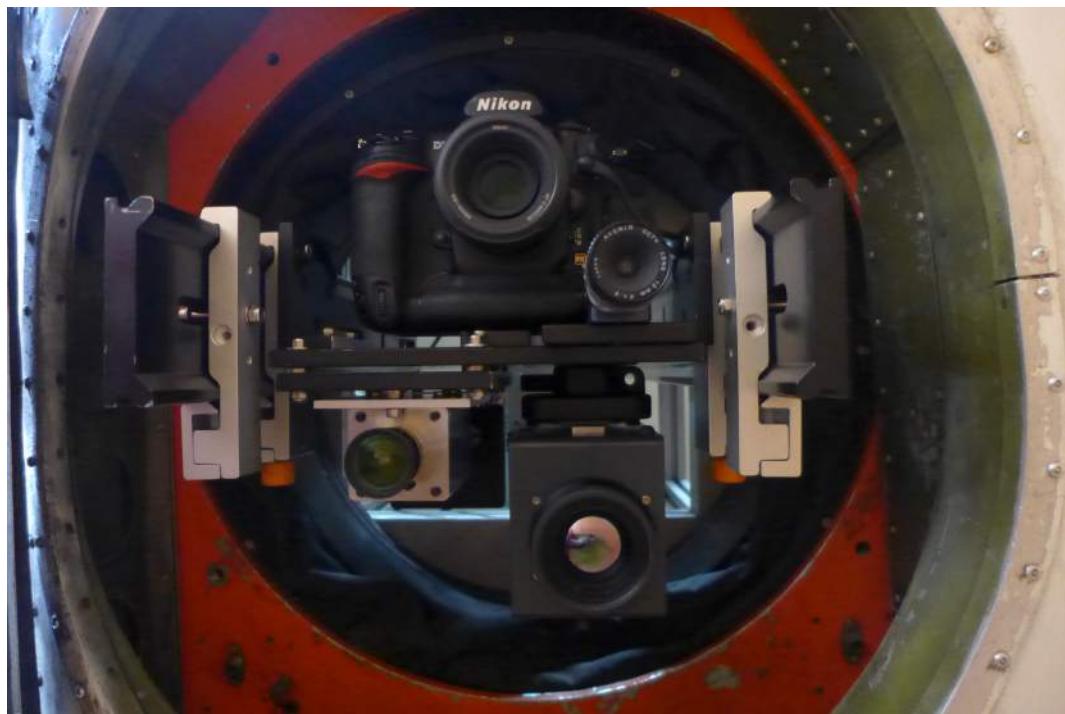


Figura 5.14: Cámaras utilizadas durante el vuelo. Arriba izq. Nikon D3 + 50mm 1.8G. Arr. dcha. Watec 902h2. Abj. izqa. Espectrógrafo. Abj. drcha. Cámara infrarroja.



Figura 5.15: Izqa. Imagen del estudiante en la posición de operación durante el vuelo de prueba. Decha. El avión, el piloto, el ingeniero jefe del laboratorio y el operador

cm/px. Ver figura 5.20 y comparativa en la figura 5.23.

5.4. COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN LUMÍNICA



Figura 5.16: Imagen compuesta de Berlín central realizada mediante la composición de 3000 imágenes individuales con la cámara Nikon D3.

5.4. Comparativa de técnicas de teledetección de fuentes de contaminación lumínica

Tanto en este capítulo como en los capítulos anteriores hemos estudiado y probado casi todos los sistemas de tele-detección disponibles en el momento actual y hemos innovado introduciendo el uso de globos sonda como plataforma de tele-detección. El único relevante no estudiado han sido los datos del satélite EROS-B, dado que no hay datos públicos del mismo, pero atendiendo a la literatura se ha incluido en esta sección algunos apuntes sobre sus datos. En esta sección vamos a discutir los pro y contras de cada uno de ellos realizando una comparativa. Para comparación de detalles técnicos y resumen ver tabla 5.3.

Imágenes DMSP/OLS La principal ventaja de las imágenes del DMSP es su cobertura global y existen datos desde el año 1992 hasta 2012. Sin embargo, no hay datos calibrados de manera nativa y son calibrados a posteriori. Su resolución es de 5 km/px y tiene banda pancromática. Las imágenes de DMSPS corresponden únicamente a la primera parte de la noche.

Permite la realización de estudios a escala Global, nacional y regional. No es útil para



Figura 5.17: Imagen individual correspondiente a la zona de Postdamer platz y la Puerta de Brandeburgo. El Norte esta a la izquierda. La resolución de la imagen es de 0.5m /px.

datos locales. No se puede hacer detección de fuentes de luz.

Imágenes SNPP/VIIRS/DNB En este momento los datos de VIIRS están siendo procesados y continúan en desarrollo. En principio el instrumento está calibrado en el laboratorio y dispone de una unidad de calibración en el propio satélite. La cobertura es global y los datos corresponden a las 1:30 hora solar local. Se dispone de datos desde 2012 y tiene una banda pancromática. Una resolución de 750 m/pixel, que después de la reproyección produce una PSF de 2 píxeles en la dirección longitudinal y poco más de un pixel en la transversal.

Permite la realización de estudios a escala global, nacional, regional y local. No se puede hacer detección de fuentes de luz. Capacidad limitada para detección de puntos calientes.

Imágenes EROS-B Aunque no se ha tenido acceso a datos de este satélite, ha sido incluido por completitud y haciendo referencia a las indicaciones de la literatura. Levin et al. (2014) demostró que el satélite comercial EROS-B puede ser utilizado para el estudio de fuentes de contaminación lumínica. Sin embargo la calibración es complicada y solo dispone de una sola banda de observación además de que es relativamente caro. Parece que no es posible la calibra-

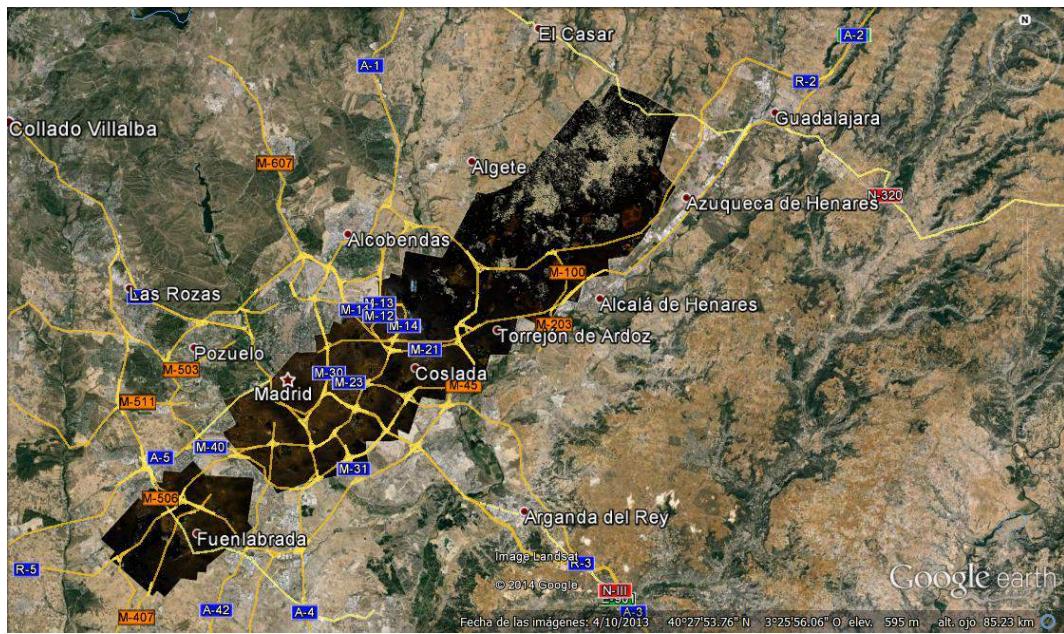


Figura 5.18: Mosaico de imágenes nocturnas tomadas desde globo sonda con una cámara LUMIX LX7.

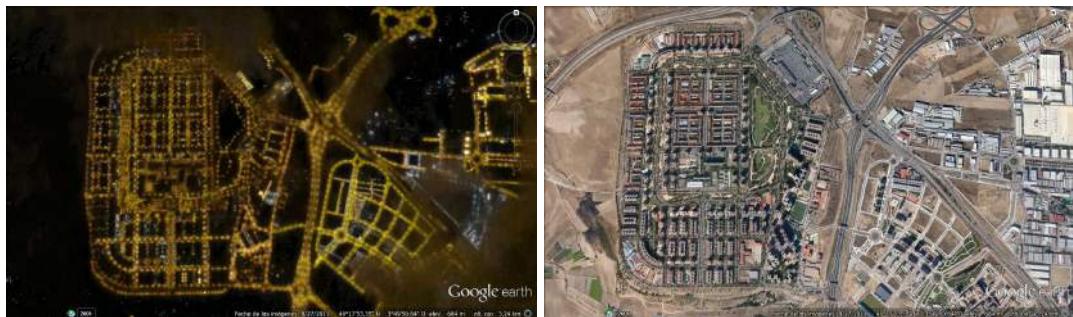


Figura 5.19: Detalle de una de las imágenes tomadas desde la sonda comparada con una imagen diurna con el satélite DigitalGlobe(Google earth). La urbanización que se puede ver es Loranca, situada en el municipio de Fuenlabrada.

ción a priori y solo se porían calibrar a posteriori.

Permite la realización de estudios a escala local. No se puede hacer detección de fuentes de luz. Buena capacidad para determinar puntos calientes. Limitada capacidad para determinar niveles de iluminación.

Imágenes ISS/Nikon D3S Permite tener gran variedad de resoluciones (ver tabla 5.3), bandas e imágenes a cualquier hora del día. La pega principal es la dificultad en la calibración (que es

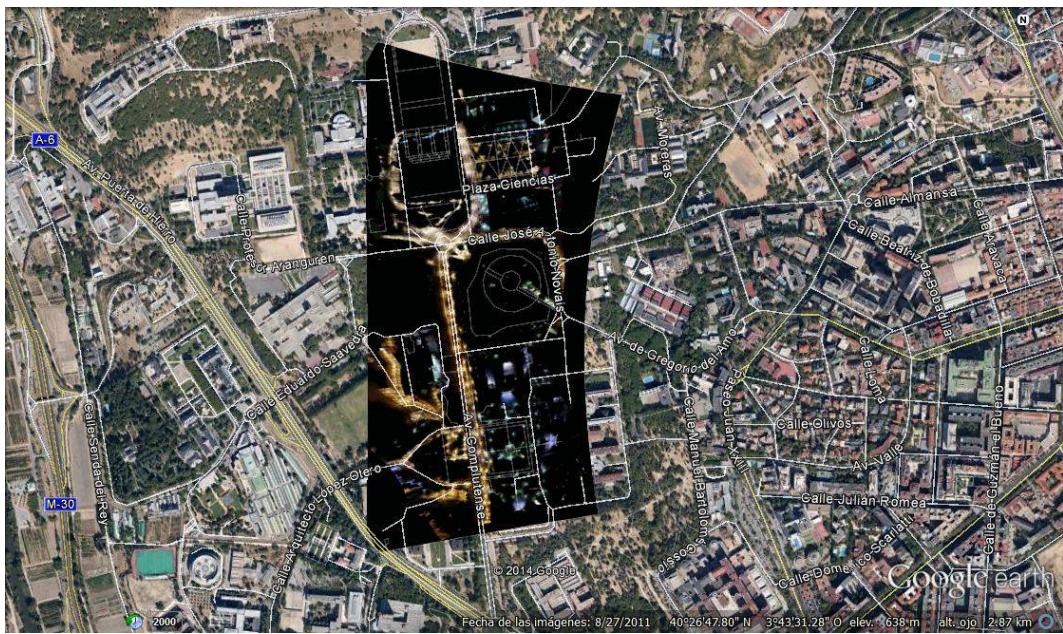


Figura 5.20: Mosaico de imágenes tomadas con el Dron DJI Phantom 2 y GoPro Hero 3+.

uno de los capítulos de esta tesis). Constituye la mayor fuente de imágenes multiespectrales.

Permite realizar estudios a escala nacional, regional y local. Buena capacidad para determinar puntos calientes. Puede dar información sobre tipos de fuente de luz. Sólo a la máxima resolución puede ayudar a determinar niveles de iluminación.

Imagen área Hiperespectral INTA-AHS En esta tesis hemos analizado las posibilidades de las imágenes nocturnas tomadas durante el proyecto DESIREX (Sobrino et al. 2009b) y durante la exploración realizada para INDRA con financiación de la Comunidad de Madrid en 2008. EL AHS nos proporciona espectros de baja resolución de cada punto, y por tanto identificación inmediata de cada fuente de luz, pero tiene muy baja señal en las zonas iluminadas. Su homólogo CASI ha sido utilizado por Tardà et al. (2011), aunque dichos datos no son públicos.

Permite el estudio local de las zonas más intensas. Permite clasificación unívoca de las fuentes de luz. Ideal para la caracterización de puntos calientes. Muy limitado para la determinación de niveles de iluminación.

Imagen aérea Multiespectral NIKON/D2x/D3/D3S Esta técnica ha sido explotada actualmente por Kuechly et al. (2012) y Hale et al. (2013). En esta tesis hemos dedicado una sección en presentar la ampliación del trabajo realizado por Kuechly et al. (2012). La alta resolución y el disponer de varios canales hacen ideal esta técnica para cubrir áreas grandes con gran reso-

lución pero no se puede hacer más de una ciudad cada vez ya que es muy costoso. Es necesario usar una plataforma estabilizada, control de la posición del aparato, etc.

Permite hacer estudios locales amplios y permite clasificación unívoca de las fuentes de luz. Ideal para la caracterización de puntos calientes. Bueno en la determinación de niveles de iluminación.

Globo sonda De manera pionera se ha realizado un vuelo en globo sonda utilizando cámara compacta. Presenta las mismas dificultades que el anterior, pero la resolución es menor al volar más alto.

Permite hacer estudios locales amplios y permite clasificación univoca de las fuentes de luz. Ideal para la caracterización de puntos calientes. Bueno en la determinación de niveles de iluminación.

Dron También por primera vez se han tomado imágenes con un pequeño dron y una cámara GoPro. Esta técnica permite tomar datos de altísima resolución pero aún no hemos podido calibrar las imágenes. Una vez calibradas sería el método ideal para determinar niveles de iluminación. Solo se pueden hacer estudios locales y parece que quizás se puedan hacer estudios de tipos de fuentes.

	Resolución ¹	Paso	Calibración	Bandas	Cobertura	Coste/50km ²	Sens ²
DMSP/OLS	5 km	20:30	A posteriori	1	Global	0 €	5
VIIRS/DNB	750 m	1:30	Nativa	1	Global	0 €	0.2
Eros-B	1 m	???	No*	1	???	15 k€	?
ISS/D3S	1.5-750 m	∀	Estrellas	3	Lat ± 51	0 €	0.8 ³
INTA-AHS	6 m	∀	Nativa	15	Local	15 k€	~ 10
Avión-D3	0.5 m	∀	Estrellas	3	Local	45 k€	~ 1
Globo Sonda	2 m	∀	Estrellas	3	Local	4 k€ ⁴	~ 1
Dron+GoPro	0.1 m	∀	No*	3	Local	2.4 k€ ⁵	~ 1

Tabla 5.3: Comparativa de diversos sistemas de medida de las fuentes de contaminación lumínica.¹ Todos los valores son el diámetro del disco de Airy. ² Límite de sensibilidad en $10^{-10} \text{Watt/cm}^2/\text{sr}$. ³ Límite de detección en la imagen de La Palma. Con otras configuraciones se puede obtener sensibilidades mayores.⁴ Incluye aproximadamente 1.000 € de material y 600 € de material por lanzamiento. ⁵ Incluye 1.800 € en material y 800 € en capacitación. Dado que la legislación aun no esta clara, esto puede variar. *No disponible por el momento.

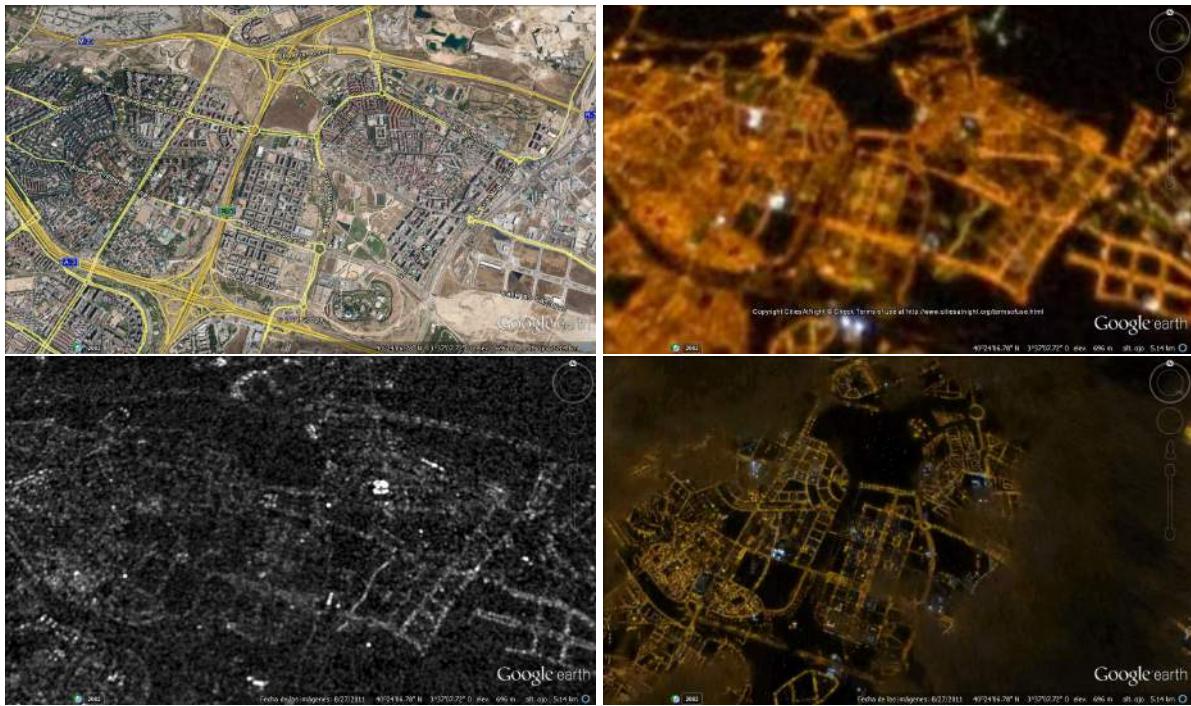


Figura 5.21: Imágenes de la región de la calle José Prat. Arriba a la Izquierda imagen diurna. Abajo a la izquierda imagen de los canales 04, 05 y 06 del AHS. Arriba a la derecha imagen de la ISS/D3S, Derecha abajo, imagen tomada desde Globo Sonda/LUMIX LX7.

5.5. Resultados

- Se ha demostrado que ninguna técnica es capaz de realizar un estudio completo del problema, siendo complementarias entre sí.
- Las imágenes de satélite actuales monitorizan regularmente todo el planeta pero proporcionan datos pancromáticos. Son ideales para estudios de evolución temporal y se dispone de series largas de datos.
- Las imágenes ISS/D3S mejoran la resolución espacial de los satélites y proporcionan datos en tres bandas espectrales. Por contra las imágenes no se obtienen de manera organizada y no presentan cobertura global.
- Las cámaras multiespectrales embarcadas en aviones tienen la ventaja de la mayor resolución espacial ypectral pero presentan baja sensibilidad y su estudio está limitado a zonas poco extensas.
- Se ha demostrado que otras técnicas de bajo coste como las cámaras embarcadas en dro-

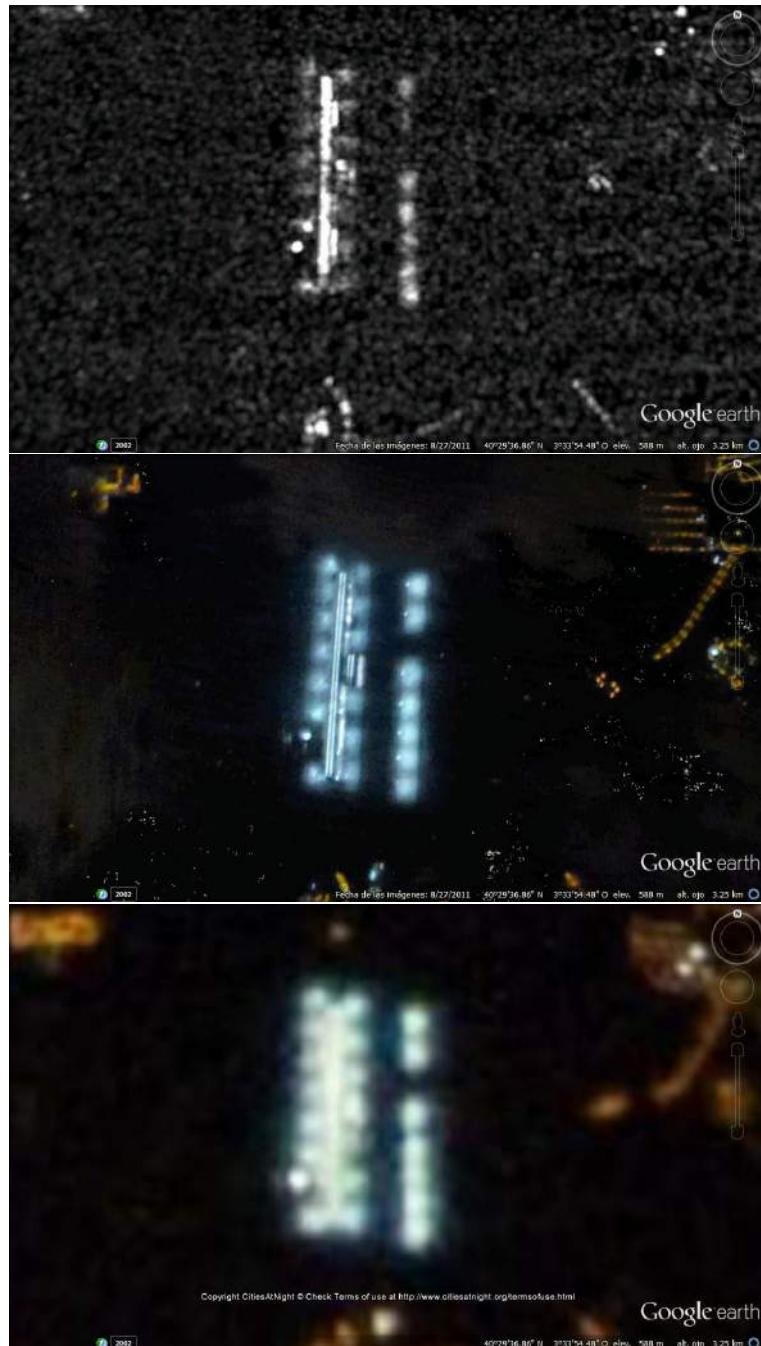


Figura 5.22: De arriba a abajo, imágenes de la terminal T4S del aeropuerto de Barajas desde INTA-AHS, Globo Sonda/Lumix LX7 y ISS/D3S.

nes y en globos pueden ser una alternativa de bajo coste para estudios detallados de zonas concretas.



Figura 5.23: De arriba a abajo, imágenes de la Ciudad Universitaria de Madrid desde INTA-AHS, DJI Phantom 2/Gopro 3+ Hero y ISS/D3S.

Capítulo 6

Brillo de cielo en la Comunidad de Madrid

6.1. Introducción

6.1.1. Desarrollo histórico del estudio del brillo de cielo

El brillo de cielo es un fenómeno complejo en el que influyen numerosos factores entre los que se encuentran los naturales y artificiales, los terrestres y celestes. Para realizar un estudio científico del fenómeno hay que tener en cuenta la importancia de cada uno. El problema se complica, además de por la confluencia de factores diversos, por la variabilidad de su influencia. Por ello, en este capítulo se describe su estudio desde una perspectiva integral desde el punto de vista observacional que abarca el estudio del fenómeno con la mayor resolución temporal, espacial y espectral disponible en el momento actual.

El brillo de cielo nocturno se ve afectado en primer lugar por las fuentes astronómicas, y en particular por la Luna ($V = -12.94$) . Incluso fuera de la atmósfera (Dressel 2012) existe un brillo de cielo debido a la luz zodiacal y al *Earth shine* (equivalente a la luz cenicienta pero para la Tierra, $V = \sim 22.1 \text{mag}/\text{arcsec}^2$). Una fuente importante de brillo de cielo es la Vía Láctea ($V = \sim 21 \text{mag}/\text{arcsec}^2$), y así, por ejemplo con objeto de medir la componente antropogénica de la contaminación lumínica, Duriscoe (2013) utilizan un modelo de Vía Láctea calculado por ellos mismos y usando Hoffmann et al. (1998). En la actualidad existen otras exploraciones de medida del brillo superficial de la Vía Láctea como el de Mellinger (2009). Otras contribuciones menos importantes son las correspondientes a las líneas aurorales que conforman el *airglow* o luminiscencia nocturna (Benn & Ellison 1999) que se observa como una fuente extensa y altamente variable con la actividad solar y geomagnética terrestre (Garstang 1989; Leinert et al. 1998). Estas componentes son muy importantes en los observatorios astronómicos de categoría internacional libres en gran medida de las fuentes de contaminación lumínica. Cinzano et al. (2001b) mostró cómo el brillo de cielo en observatorios tan importantes como Cerro Tololo

y El Roque de los Muchachos tendrían un brillo de cielo muy superior si estuviesen a nivel del mar. La construcción de nuevos observatorios en lugares no tan aislados y altos, y por lo tanto con mayor volumen de atmósfera, recupera el interés en el estudio de los efectos de la contaminación lumínica en el brillo de cielo nocturno.

La luz artificial de origen humano emitida hacia la atmósfera sufre en ella los efectos de la difusión Rayleigh y difusión de Mie (Garstang 1984; Cinzano & Falchi 2012). La difusión de Rayleigh es producida por las moléculas del aire y por los aerosoles de pequeño tamaño. Cuando los aerosoles y/o partículas en suspensión superan el décimo de la longitud de onda la dispersión sigue la ley de difusión de Mie. Por tanto, ese límite para la luz visible se encuentra en torno a las 30-80 nm¹. En principio de manera natural no existen fuentes de luz en la tierra por lo que salvo por la presencia de luz solar o lunar, dominan los otros factores. Cuando hay otras fuentes de luz, como la luna, ambas difusiones entran en juego y aumenta el brillo de cielo (Krisciunas & Schaefer 1991; Jones et al. 2013b,a).

Y hasta hace menos de 200 años no habría sido necesario estudiar más efectos en la caracterización del brillo de cielo. Sin embargo, desde el desarrollo del alumbrado público y su expansión, ligados al desarrollo tecnológico, el crecimiento de la población y a la mala gestión de los recursos, posiblemente, la fuente más importante de brillo de cielo no procede del firmamento, sino que se genera en la tierra.

Varios modelos han intentado explicar la distribución de la contaminación lumínica espacial y espectralmente. El primer modelo empírico fue Walker (1970). Posteriormente aquellas medidas fueron refinándose hasta la publicación de Walker (1977), que era un modelo de brillo de cielo basado en la cantidad de población de la ciudad/foco emisor y la distancia del observador a la misma. Los siguientes modelos se fueron complicando con la inclusión de efectos de dispersión (Treanor 1973). Sin embargo, estos modelos eran fundamentalmente empíricos. No fue hasta Garstang (1984) que empezó a utilizarse los modelos basados en los principales componentes de la atmósfera, tales como aerosoles y moléculas, así como el hecho de que una ciudad no es un punto sino un cuerpo extenso. Sin embargo los modelos de Garstang siguen teniendo como entrada una cierta luminosidad por habitante. Como la razón entre luz emitida y población varía dependiendo del entorno e incluso de la cultura, se encuentran dificultades para utilizar el modelo en diferentes lugares. Cinzano & Elvidge (2004) adaptaron el modelo de Garstang a uno basado en radiancia usando los datos del DMSP/OLS. El modelo ILUMINA² de Aubé et al. (2005) es ya una tercera generación de modelos de contaminación lumínica que tiene en cuenta no sólo la difusión directa sino órdenes superiores de la misma, así como el efecto del perfil de emisión de la ciudad dependiendo de numerosos factores tales como el

¹Por eso la contaminación del aire mediante aerosoles influye notablemente en la contaminación lumínica.

²<http://cegepsherbrooke.qc.ca/~aubema/index.php/Prof/IllumPhys>

apantallamiento por edificios o el flujo hemisférico superior de las farolas. Además este modelo se apoya en datos espectroscópicos mediante el instrumento SAND (Aubé et al. 2009). Por otro lado Kocifaj (2007) desarrolló otro modelo más centrado en las condiciones climáticas. En Luginbuhl et al. (2009) se realizó una mejora del modelo de Garstang (1984) usando los datos del US Naval Observatory Flagstaff, mejorando la función de emisión mediante un inventario exhaustivo de las poblaciones circundantes. Por último, Cinzano & Falchi (2012) ha realizado una actualización de su modelo basado también en el de Garstang (1984), pero incluyendo numerosas mejoras como la absorción por ozono, curvatura terrestre, dependencia espectral y orográfica, etc, etc.

En la actualidad existen diversas iniciativas para verificar el grado de fiabilidad de estos modelos. En Aubé & Kocifaj (2012) usaron la isla de La Palma para probar sus modelos. Sin embargo, la isla de La Palma es un entorno demasiado especial para ser generalizado a lugares de alta contaminación lumínica. Kyba et al. (2013) utilizó medidas de SQM y del programa de ciencia ciudadana *Globe at Night* para verificar la validez del primer mapa de brillo de cielo Cinzano et al. (2001a). Una de las conclusiones de Kyba et al. (2013) es que existe una gran divergencia entre los brillos de cielo en lugares altamente contaminados. Otro modelo es el desarrollado por García Gil et al. (2012) que aún está en fase de verificación.

En la actualidad, todos los modelos de brillo de cielo están basados en datos de satélite con información pancromática del DMSP/OLS y/o VIIRS/DNB. Por otro lado, si bien algunos de los modelos tienen en cuenta la cantidad de aerosoles, dado que las imágenes de DMSP/OLS son promedios de un año completo y tienen problemas de calibración, en general no se pueden estudiar casos reales sino medios.

Por ello esta tesis se centra en enriquecer la medida de brillo de cielo y las entradas que corresponden a las fuentes de contaminación lumínica. En la actualidad se colabora con Martin Aubé, Christofer Kyba y Fabio Falchi con datos de esta tesis para la calibración y test de los modelos aquí discutidos. En las secciones siguientes se presentan de manera concisa los trabajos que abarcan las medidas en tierra necesarias para el calibrado y test de los modelos de Aubé/Kocifaj y Cinzano/Falchi.

6.1.2. Importancia astronómica de la contaminación lumínica en Madrid

El estudio del brillo de cielo en la Comunidad de Madrid es estratégico, dado que la ciudad de Madrid es la capital europea más brillante y una de las de mayor población en su corona metropolitana. Esto hace que el rango dinámico de brillos de cielo que hay en el entorno cubra todo el posible, desde el brillo altamente contaminado de Madrid capital, hasta los cielos casi naturales del Parque Nacional de Cabañeros. Además, entran en juego también razones históricas que sirven de motivación a este estudio, que no solo pretende ser un estudio académico, sino

una evaluación de la situación del patrimonio histórico / científico / cultural de la región.

La ciudad de Madrid y por ende la Comunidad, tienen como símbolo más destacado la Osa Mayor o Menor. Esto queda acreditado por las crónicas del “Compendio histórico de las grandezas de España”(Álvarez et al. 1786) donde se afirma:

En el año 1212 no usaba Madrid otras Armas que un Oso [...] Este tenía dentro de su cuerpo las siete Estrellas, como se comprueba del escudo que todavía el Ilustre Cavildo Eclesiástico.

Y de esta clara alusión al origen astronómico llegamos a la declaración de Amón & Novillo (1984) sobre el diseño de la Bandera de la Comunidad:

Estas siete estrellas blancas, procedentes del escudo de la capital, se hacen también susceptibles de verse extendidas al resto de la Comunidad Autónoma, de atender sobre todo a las dos leyendas que les dan origen, disposición y forma.

Sin embargo, la capitalidad y el crecimiento urbanístico han hecho que desde antiguo Madrid sea por un lado punta de lanza de la investigación astronómica, y por otro principal fuente de contaminación lumínica del país. Madrid de hecho cuenta con regulación sobre alumbrado desde 1678³. A pesar de este hecho, en Madrid se desarrolló la astronomía de manera muy notable, al igual que en otras capitales europeas. Dentro de las instituciones madrileñas las más antiguas y destacadas son sin lugar a dudas, por un lado, la Universidad Complutense de Madrid, heredera de la Antigua Universidad Central y esta de El Colegio Imperial de Madrid (1608) y la Universidad de Alcalá (1508), y por otro el Real Observatorio Astronómico de Madrid (1790).

El Real Observatorio Astronómico de Madrid realizó sus trabajos de observación astronómica en el interior de la capital hasta los años 1970. Sin embargo, debido a la contaminación lumínica tuvo que dejar de realizar observaciones en su sede de Atocha y fundar una estación de Observación en Calar Alto (Almería) y otra en Yebes (Guadalajara).

Por otro lado, en la Ciudad Universitaria el proyecto original incluía la construcción de un observatorio astronómico en el Cerro de las Balas desde tiempos de la República (Navarro 1986). Sin embargo, este observatorio nunca llegó a construirse y en cambio se instalaron unas cúpulas prefabricadas en lo alto del edificio de la Facultad de Ciencias que alberga actualmente a la Facultad de Ciencias Físicas. Años después este observatorio se consolidó y actualmente está catalogado como el Observatorio UCM con el código IAU-MPC I86. Una de las principales razones por las que el gran observatorio proyectado en Ciudad Universitaria no llegase nunca a construirse, fue el que la contaminación lumínica de la ciudad lo inhabilitaría para realizar la

³<http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/madrid/abc/1971/01/16/010.html>

mayoría de las investigaciones punteras, si bien el momento en que se descarta su construcción es ya a principios de los años 70. En aquel momento se están gestando los nuevos telescopios de Calar Alto y del Observatorio del Teide, impulsado este último principalmente por el prof. José María Torroja, Catedrático de Astronomía de la Universidad Complutense (Martín 2009). Un factor que pudo influir en acelerar estos acontecimientos pudo ser la llamada “Operación Alumbrado”, que actualizó a principios de los años 70 una remodelación de todo el alumbrado público de la capital.

En la actualidad, la existencia del Observatorio UCM, un observatorio centrado en la docencia en Astrofísica, supone una plataforma única en el mundo para el estudio de la contaminación lumínica, ya que es un observatorio urbano fuertemente contaminado por la luz emitida en su propio entorno. Ya se ha comentado que en los observatorios de categoría internacional otros efectos dominan en el brillo de cielo nocturno.

Además de los observatorios, Madrid siempre fue cuna de la afición a la astronomía, siendo sede del primer “club” astronómico no profesional en el Ateneo de Madrid (1834).

Todo esto hace que el estudio del brillo de cielo en Madrid y sus alrededores no suponga tan solo un ejercicio de investigación, sino también la reivindicación de la cultura astronómica símbolo de la región.

6.1.3. Madrid y el Observatorio UCM como punto de referencia

Como complemento a las razones históricas, la región de Madrid, y en particular el Observatorio UCM, tiene una situación estratégica para la medida de la contaminación lumínica. En el Observatorio UCM se dispone de instrumental astronómico dedicado a la medida y monitorización del brillo de cielo. Dos fotómetros *Sky Quality Meter SQM* (Cinzano 2005), Lightmeter (Müller et al. 2011), Telescopios ópticos, fotómetro fotoeléctrico OPTEC SSP-3, Cámaras CCD SBIG ST-9E y ST-10XME C2 y algunos instrumentos desarrollados por estudiantes y personal de la Universidad como MECO⁴. Destaca entre ellos una cámara de todo el cielo (*all-sky*) que sirve para medir la calidad astronómica del cielo cada noche usando técnicas astronómicas de fotometría absoluta AstMon (Aceituno et al. 2011). Con este monitor de cielo se determinan tanto el brillo de cielo en tres bandas (Johnson B, V y R) como los coeficientes de extinción atmósferica. Se han realizado hasta ahora varios trabajos relacionados con la contaminación lumínica desde 1994, tales como:

- Medida de Brillo de cielo con cámara química, C. García Miró (1994)*
- Prácticas de alumnos en asignaturas de Instrumentación astronómica (varias asignaturas) (desde 1994)*

⁴http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/Ramirez_MeCO_2001.pdf

- Brillo del fondo de cielo en la UCM, Luis Alejandro Ramírez (2001)⁵
 - Constantes fotométricas del observatorio de la UCM, F.J. Sánchez Muñoz(2001)⁶
 - Estudio de la Contaminación Lumínica en la UCM, A. Sánchez de Miguel et al.(2003)⁷
 - Constantes fotométricas del observatorio de la UCM, Ángel Ruiz Camuñas(2004)⁸
 - Monitor de fondo de cielo en la UCM, Bogdana Kozlovska(2006)⁹
 - Monitor de fondo de cielo en la UCM, García (2008)
 - Mapa de contaminación lumínica en la UCM, Pablo Cepero(2008)¹⁰
 - Contaminación Lumínica observada con imágenes por satélite, García Valverde & Ayesa Blanco (2009)
 - Contaminación lumínica en la UCM I. Evolución de la iluminación en la UCM, Rodríguez Herranz (2010)
 - Contaminación lumínica en la UCM II. Mapa de la Iluminación en la UCM, Ruiz Carmona (2010)
 - Calibration of SQM-L photometers for the NixNox project, Zamorano & Muñoz Marín (2010)
 - Mapa de brillo de fondo de cielo de la Comunidad de Madrid, Pila Díez (2010)
 - Mapa de brillo de fondo de cielo en la Comunidad de Madrid, Alberto Fernández (2011)*
 - Sky brightness with AstMon-UCM, Ramírez Moreta (2011)
 - Hots spots of light pollution on Madrid, Carlos Larrodera (2012)*
 - Estudio de la contaminación lumínica a través de imágenes de satélite, María Ángeles López Cayuela (2012)*
 - Absolute photometry and Night Sky Brightness with all-sky cameras, Nievas Rosillo (2013)
 - Sky Quality Meter cross-calibration for the NixNox project, Zamorano & Ruiz Carmona (2013)
 - Variación del brillo del fondo de cielo en el céntit con la fase y altura de la Luna, Sánchez de Miguel (2013) ...
- * Trabajos sin publicar.

En las cercanías del Observatorio existen dos estaciones meteorológicas de interés para la contaminación lumínica. La primera es la estación de medida de aerosoles diurnos de AEMET¹¹

⁵http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/Ramirez_MeCO_2001.pdf

⁶http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/Sanchez_FotometriaUCM_2001.pdf

⁷<https://picasaweb.google.com/108630352597748862036/ContaminacionLuminica#5021555658112454738>

⁸http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/ARuiz_ConstantesFotomUCM_2004.pdf

⁹http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/bogdana_informe_v1.19.doc

¹⁰http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/TAD2009_ContaminacionLuminicaUCM.pdf

¹¹http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db/Madrid.html

a una distancia de apenas 500 m. Esta estación pertenece a la red AERONET (Holben et al. 1998) (Aerosol Robotic NETwork) y una estación meteorológica¹². Además existe una estación de medida de aerosoles nocturnos en CIEMAT, a una distancia similar al observatorio (Molerò et al. 2001). Esto se refiere a los datos disponibles en el entorno de Ciudad Universitaria de Madrid, no perteneciente al observatorio.

El porcentaje de noches despejadas en el observatorio UCM es relativamente alta comparado con otros observatorios urbanos del continente europeo¹³.

Al margen de la meteorología favorable y la instrumentación disponible, Madrid tiene algunas características deseables para este tipo de estudios. El ser una fuente intensa de contaminación, prácticamente aislada de otras grandes ciudades, hace más sencillo el análisis. El efecto de la contaminación lumínica en el brillo del cielo se puede medir en direcciones radiales que progresivamente se alejan del núcleo urbano sin encontrar otras fuentes intensas. Otras características que ayudan son la existencia de autopistas radiales sin iluminación, no tener grandes montañas extremadamente cerca y una gran uniformidad en el tipo de iluminación (el 80 % es sodio de alta presión). También es interesante la presencia de zonas extensas no iluminadas muy cercanas a la ciudad tales como la Casa de Campo o el Monte del Pardo. Desgraciadamente existen numerosos pequeños municipios en su corona metropolitana y ciudades de tamaño medio que dificultan el análisis, produciendo en muchos casos confusión de fuentes.

6.2. Instrumentos de medida de brillo de cielo

6.2.1. Fotómetros SQM

El Sky Quality Meter (SQM) es un dispositivo portátil diseñado para proporcionar medidas de luminancia o brillo de cielo por unidad de área (aunque se suele sobre entender que todas las medidas de brillo de cielo se dan siempre por unidad de área por ser un objeto extenso) y en astronomía se suele utilizar como unidad las magnitudes por arco segundo cuadrado ($mag/arcsec^2$). Esta unidad tiene una relación logarítmica con el flujo y 5 magnitudes es el equivalente a un cambio en 100 veces en luminancia. El brillo superficial en $mag/arcsec^2$ equivale a $-10^{-2.5 \log_{10}B+C}$, donde B es el brillo superficial en fotones $s^{-1}m^{-2}Hz^{-1}arcsec^{-2}$ y C el factor de escala. La conversión a cd/m^2 y otras unidades de iluminación utilizadas en ingeniería fue tabulada por Crawford (1997). Por ejemplo un cielo muy oscuro presenta una magnitud Johnshon V = 21.9 $mag\ arcsec^{-2}$ corresponde a 0.00019 cd/m^2 . Sin embargo, hemos de notar que si bien la definición de magnitud está definida para cualquier banda de paso (Fukugita et al.

¹²<http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?l=3194U>

¹³<http://home.cc.umanitoba.ca/~jander/clouds/globalclouds.html>

(1995)), la candela solo está definida para la curva fotópica del ojo humano.

El fotómetro SQM mide por tanto el brillo del cielo en magnitudes SQM, definidas por la curva respuesta del dispositivo. En principio está calibrado de tal manera que para la distribución espectral de la Luna $SQM - V = 0$. Pero esta relación cambia con la distribución espectral de la fuente (Cinzano 2005).

El elemento fotosensible es un fotodiodo (TAOS TSL237S) conversor luz en frecuencia cubierto de un filtro HOYA CM-500 con una respuesta que abarca los filtros Johnson B y V usados en astronomía (longitudes de onda en el rango de 320 a 720 nm). Sin embargo, su montaje es de apariencia simple y muy sencillo de usar para el usuario. Simplemente, debes sostener el fotómetro con la mano de manera vertical, presionar un botón y leer la medida en el display. Este dispositivo ha demostrado ser lo suficientemente preciso como para que pueda ser utilizado en investigaciones científicas (Cinzano 2005; Birriel & Adkins 2010; Kyba et al. 2012; Posudin 2014). Aun con ello, su uso no está exento de dificultades cuando se intenta explotar toda la precisión de la que es posible el dispositivo, ya que presenta un error sistemático de un 10% ($0.10 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$) y comportamientos anómalos dentro de dicho 10% debidos a cambios de temperatura (Schnitt et al. 2013). Su uso se ha generalizado dentro de los investigadores, astrónomos amateur y activistas en contra de la contaminación lumínica (Zamorano et al. 2011b; Kyba et al. 2013).

Para este estudio hemos usado tres modelos de este fotómetro. La versión SQM-L, la versión más simple, que está preparado para la toma de datos de campo, y puede ser utilizado o bien con la mano o usando un trípode (Zamorano et al. 2013b) o de manera automatizada (Fernández Sánchez et al. 2014). Para realizar un mapa uno debería de moverse dentro de una malla de puntos y medir uno a uno.

Los modelos SQM-LU y SQM-LE son controlados y leídos mediante el enlace a un ordenador, sea por cable USB o LAN respectivamente. Estos modelos han sido preparados para su uso en estaciones de monitorización continua con el fotómetro fijo. Todos ellos tienen las mismas características. La sensibilidad angular tienen como anchura a media altura (FWHM) unos 20° . La sensibilidad de una fuente puntual a $\sim 19^\circ$ fuera del eje es un factor 10 menor que en el eje. Una fuente puntual entre $\sim 20^\circ$ y $\sim 40^\circ$ fuera del eje sería registrada 3.0 y 5.0 magnitudes astronómicas más débil, respectivamente.

Hay que tener en cuenta que los fotómetros SQM-LE tienen problemas a la hora de cuantificar el brillo de cielo por encima de $17 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ para aquellos dispositivos que tienen un firmware anterior a la versión 19. Algunos datos presentados en este trabajo sufren este problema.

Los fotómetros SQM vienen calibrados de fábrica y la diferencia de punto cero entre



Figura 6.1: Imagen de un SQM-L sobre un trípode para su uso en el proyecto NIX-NOX (Zamorano et al. 2014).

ellos no debería de superar $0.1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ ¹⁴. Los fotómetros se pueden intercalibrar como se describe en Zamorano Calvo, Jaime and Ruiz Carmona, Roque (2013) (Sky Quality Meter cross-calibration for the NixNox project. <http://eprints.ucm.es/18015/>) Zamorano Calvo, Jaime and Muñoz Marín, Víctor Manuel (2010) (Calibration of SQM-L photometers for the NixNox project <http://eprints.ucm.es/12262/>) para el proyecto NixNox. Para monitorización continua en la que se analizan series de medidas del mismo fotómetro la precisión es mejor ya que su respuesta es estable. Sin embargo hay que tener en cuenta que la electrónica del SQM efectúa una corrección de las medidas de acuerdo a la temperatura del sistema ya que la respuesta del detector varía con la temperatura de trabajo (Schnitt et al. 2013).

6.2.2. Monitor astronómico AstMon

La determinación astronómica tradicional del brillo de fondo de cielo se realiza mediante el método de la fotometría absoluta que requiere invertir una gran cantidad de tiempo de obser-

¹⁴La experiencia de varios colaboradores es que no es raro que se supere este valor. S. Bará comunicación privada.

vación. Las observaciones incluyen la observación de campos de estrellas estándar de magnitud conocida en diferentes posiciones en el cielo usando fotómetros o cámaras con sensores de estado sólido acoplados a telescopios. El monitor astronómico AstMon (*All Sky Transmission Monitor*) (Aceituno et al. 2011) utiliza el mismo método de fotometría absoluta usando estrellas de referencia en todo el cielo pero mediante una sola exposición que abarca toda la bóveda celeste. La ventaja más inmediata consiste en la capacidad de realizar un mapa completo del brillo de cielo visible.

AstMon-UCM se utiliza en el Observatorio UCM (ver figura ??, en la terraza superior junto a las cúpulas astronómicas) para la medida de la calidad del cielo nocturno (coeficientes de extinción y brillo de cielo) en las bandas B, V y R del sistema fotométrico de Johnson. La puesta en marcha y primeras observaciones de la cámara fue realizado por Ramírez Moreta (2011) donde se detallan exhaustivamente los ajustes, las funcionalidades y sus particularidades. AstMon-UCM está compuesto esencialmente por una cámara QSI 583ws con chip CCD KODAK KAF- de 8.3 megapixeles. El objetivo utilizado es un objetivo Sigma 4.5 mm F2.8 EX DC HSM (ojo de pez). La cámara además incorpora una rueda de filtros para la toma de imágenes en las bandas fotométricas citadas. Los sistemas de control y electrónica se albergan en una caja metálica rematada por una cúpula de metacrilato que protege el objetivo de las inclemencias meteorológicas. Las distorsiones ópticas provocadas por la cúpula son poco importantes aunque aparecen algunos reflejos indeseados. Aunque la lluvia limpia la cúpula de la acumulación de polvo (que reduce su transmisión), periódicamente se realiza una limpieza manual.

Una descripción detallada sobre la calibración de la cámara mediante técnicas de fotometría absoluta puede leerse en Nievas Rosillo (2012, 2013). Las imágenes pueden ser calibradas o bien por el software propietario de AstMon o bien por PyASB, desarrollado en la UCM Nievas Rosillo (2012, 2013).

AstMon-UCM se instaló el 14 de julio de 2010 y desde entonces ha estado proporcionando mapas de brillo de cielo sobre el observatorio UCM en las bandas B, V y R de Johnson a lo largo de esas noches. Sus medidas se han empleado por ejemplo para la calibración de los fotómetros SQM y sirven de referencia a las medidas realizadas en la región de Madrid y alrededores (véase la sección 6.5). El análisis completo de la serie de observaciones está fuera del alcance de este trabajo pero resultados parciales se han analizado para comprender la variación temporal y de color del brillo de cielo en Madrid (véase la sección 6.3.1).

6.2.3. Espectrógrafo SAND

En el Observatorio UCM se instaló en julio de 2012 un espectrógrafo para la caracterización del brillo de cielo y sus componentes. Esta estación forma parte de la red de espectrógrafos

SAND repartidos por el mundo por el investigador Martin Aubé¹⁵. El instrumento está compuesto por un espectrógrafo DSS-7 SBIG que tiene acoplado un objetivo Nikkor de 28 mm. Además, cuenta con una webcam de alta sensibilidad para la toma de imágenes de manera simultánea. La lista detallada de los componentes puede ser consultada en la web del prof. Aubé¹⁶.



Figura 6.2: En la imagen se pueden ver el AstMon-UCM, SAND-4 UCM, dos sensores SQM y el AEMET(estación de Medida de aerosoles diurnos) y Ciemat(estación de aerosoles nocturnos).

El espectrógrafo proporciona espectros calibrados en flujo, con una resolución de 5.4 angstroms por pixel en el rango 4.000 de 8.000 angstroms. La selección del Observatorio UCM como nodo de la red de espectrógrafos SAND estuvo motivada por las características especiales de este observatorio astronómico urbano y la existencia del resto de instrumentos dedicados a medidas de calidad del cielo.

El espectro del cielo de Madrid muestra, como en otros lugares contaminados, un espectro plagado de líneas de emisión correspondientes a las lámparas usadas en alumbrado público y ornamental que son fácilmente identificables (ver figura 6.3.).

¹⁵<http://cegepsherbrooke.qc.ca/~aubema/index.php/Prof/Descreseau>

¹⁶<http://cegepsherbrooke.qc.ca/~aubema/index.php/Prof/Sand-4-components>

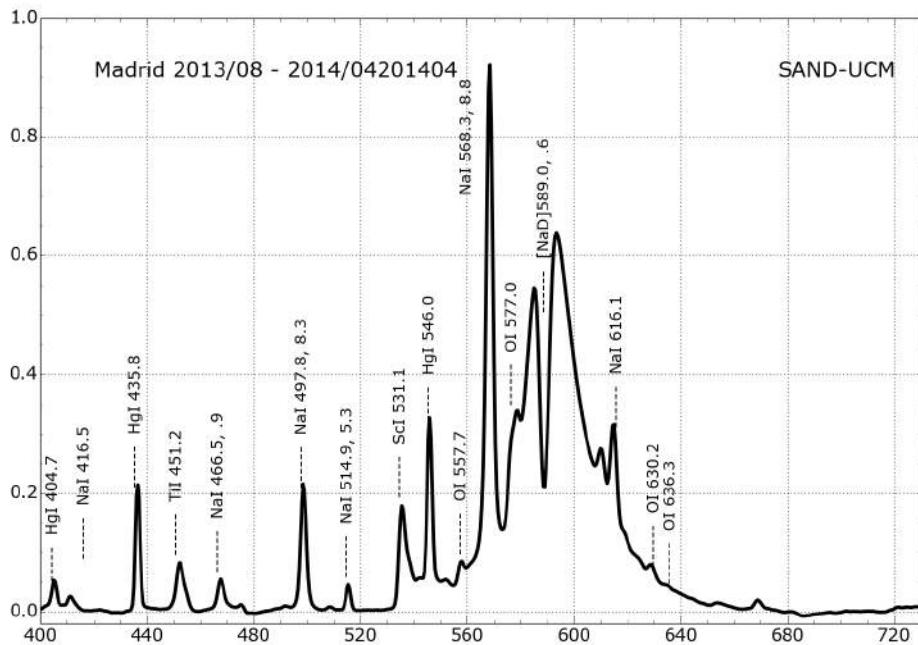


Figura 6.3: Espectro de SAND. Se aprecian las líneas de algunos elementos identificadas.

6.3. Brillo de cielo en la ciudad de Madrid

El Observatorio UCM (IAU-MPC I86) se encuentra dentro del núcleo urbano de Madrid a una altitud de 640m y coordenadas Latitud: $40^{\circ}27'04''$ Norte, Longitud: $03^{\circ}43'34''$ Oeste. Su situación a 5 km de la Puerta del Sol, que puede considerarse el centro de Madrid, lo convierte en uno de los Observatorios en activo más polucionados lumínicamente del mundo.

6.3.1. Variación temporal

El estudio de la variación del brillo de cielo de Madrid capital se ha realizado mediante las series de medidas realizadas con dos fotómetros SQM situados en el Observatorio UCM que operan con el software pySQM desarrollado en la UCM . Más información sobre este programa que registra el brillo de cielo, lo almacena en el formato estándar (International Dark Sky Association (IDA) NSBM Community Standards for Reporting Skyglow Observations) y los gráficos han sido realizados con el software desarrollado en Nievas Rosillo & Zamorano (2014)¹⁷.

¹⁷<http://eprints.ucm.es/25900/>

Se dispone de datos desde octubre de 2012 (SQM-LE) y desde octubre de 2013 (SQM-LU). Este segundo fotómetro fue instalado para estudiar las diferencias entre las medidas de dos fotómetros similares pero con distinta electrónica. Las medidas se expresan en el sistema fotométrico del fotómetro o magnitudes SQM.

La variación nocturna de una noche despejada que puede considerarse típica del brillo de cielo en Madrid se presenta en la gráfica 6.4. En ella se aprecia cómo después de crepúsculo el brillo del cielo disminuye rápidamente (magnitudes SQM más elevadas), después de un codo el brillo disminuye paulatinamente hasta las 00h, en la que hay un salto. Continua el descenso hasta las 6h que vuelve a crecer. Se aprecia esta tendencia clara en la evolución del brillo de cielo en cada noche: la primera mitad de la noche es claramente más brillante que la segunda. Esto es lo que cabría esperar de la evolución dada la emisión que se observa en la figura 3.39. Sin embargo, se puede ver que la evolución del brillo de cielo decrece durante toda la noche. Esto se podría explicar por la limpieza de la atmósfera que se produce por la noche y por la menor actividad humana que va decreciendo lentamente.

En la figura 6.5 se han representado todas las medidas registradas hasta la fecha en un formato de densidad de valores que permite apreciar a simple vista los valores registrados en el Observatorio UCM. El brillo de cielo típico de la primera parte de la noche es de 17.6 ± 0.1 lo que significa unas 43 veces más brillante que el valor en un lugar de cielo natural ($21.7 \text{ mag/arcsec}^2$ Cinzano & Falchi (2000)). Para la segunda parte de la noche los valores típicos son de 18.4 ± 0.1 . El rango de variación del brillo de cielo en Madrid es de aproximadamente 0.8 magnitudes, entre los 17.7 magnitudes típicas de las primeras horas de las noches de invierno y las muy excepcionales madrugadas de las noches de verano.

En la figura 6.4 se ve como en invierno al principio hay una parte plana, esta parte corresponde a la parte de la noche que es de actividad humana intensa. Toda la iluminación ornamental está funcionando, así como oficinas, coches y demás. A partir de las 20 h UT o 21 LT esta actividad empieza a decrecer con el cierre de tiendas y oficinas. Hay un salto a esa hora, posiblemente por el apagado de la torre Picasso. Durante la siguiente hora continúa el descenso de manera suave hasta las 22 h en que hay otro salto. Esto se aprecia claramente en la figura 6.12, en la que se representan las diferentes componentes que influyen en el brillo de cielo tales como, la actividad humana (trazada en este caso por el consumo general de energía eléctrica) y la luz ornamental (trazada por la emisión detectada desde la ISS). Combinando adecuadamente estos dos trazadores se puede explicar la evolución del brillo de cielo. Es interesante tener en cuenta que las imágenes de satélite no dan cuenta de toda la complejidad del problema.

Para un análisis estadístico del brillo de cielo hemos construido los diagramas de densidad, definidos por Puschnig et al. (2014), que muestran de manera gráfica los valores típicos del brillo de cielo en un lugar y su variación.

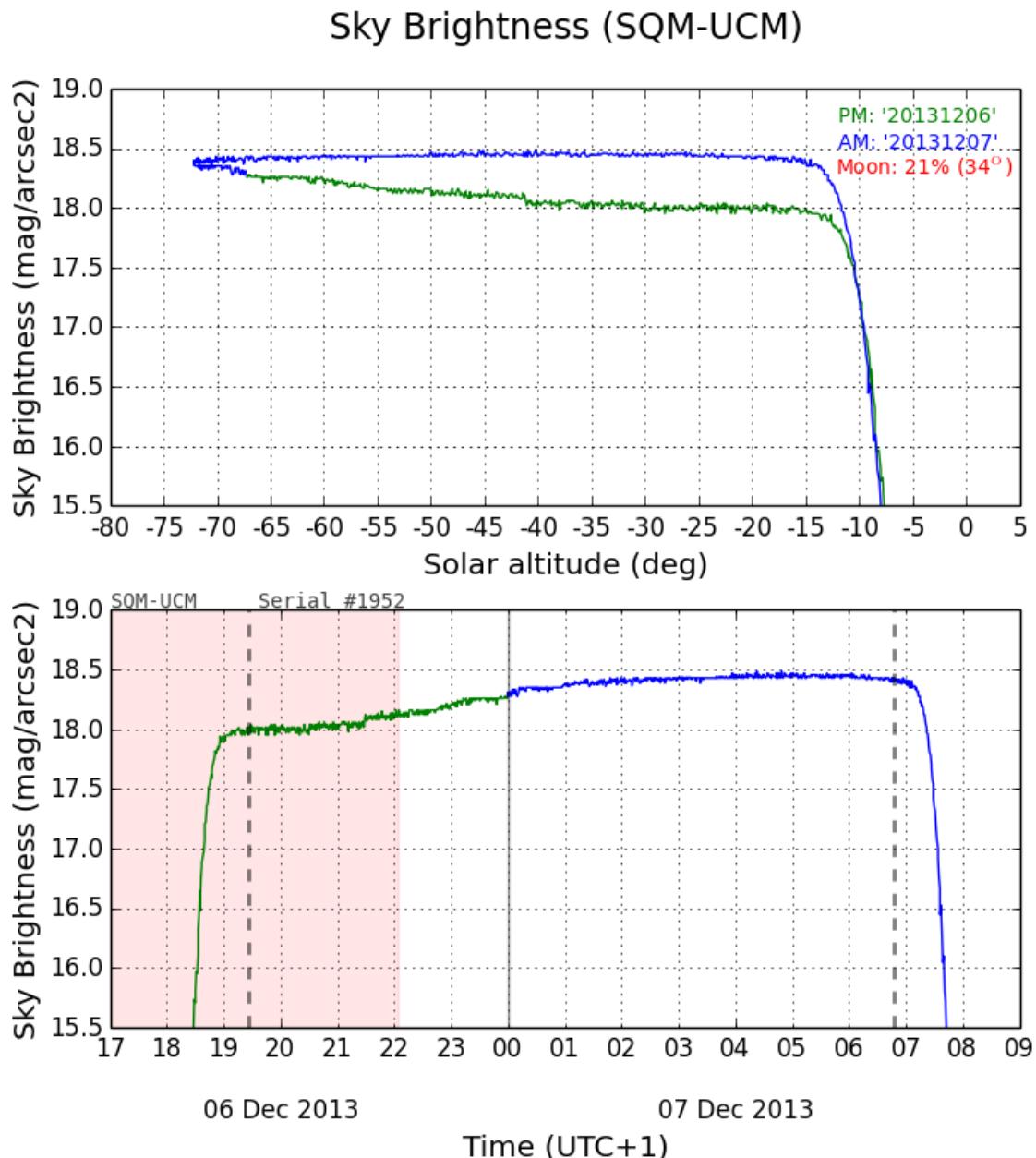


Figura 6.4: Gráfico típico de la evolución del brillo de cielo de Madrid. En el panel superior se ve en color verde la primera parte de la noche en función de la altitud solar, en la parte inferior el brillo de cielo según la hora. Sombreado, el periodo con luna por encima del horizonte y con líneas discontinuas los instantes del ocaso y orto astronómicos.

Además de la evolución típica, se aprecia que en la primera parte de la noche hay un grupo de días con un brillo de cielo significativamente menor que la media. Los días a los que corresponde dicha bajada de brillo fueron los días 6, 7 y 8 de diciembre de 2013. Aquellos días

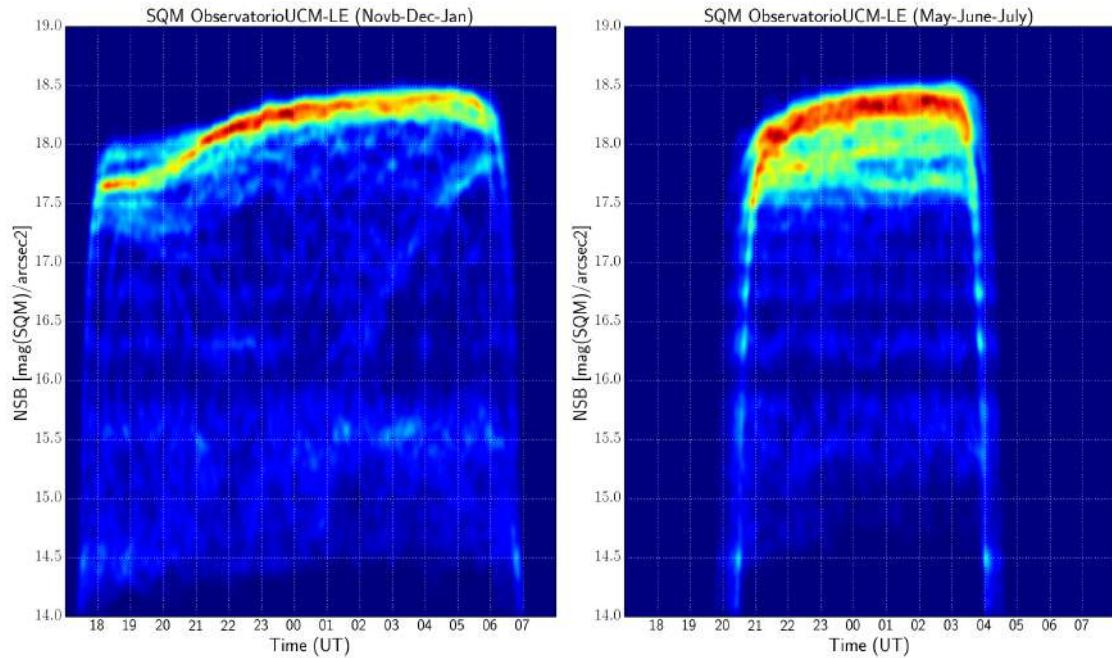


Figura 6.5: Diagramas de densidad del brillo de cielo en el zenit del Observatorio UCM. A la izquierda los meses cercanos al solsticio de invierno. A la derecha los meses cercanos al solsticio de verano.

se dió el caso de una cantidad anormalmente baja de aerosoles según la estación de AERONET del AEMET, con opacidades ópticas del orden de 0.02-0.05, cuando el valor típico es de 0.1-0.3.

En general los valores extremos se dan más en las noches de verano, tanto por exceso como por defecto. En verano hay noches más oscuras y despejadas, posiblemente debido a que Madrid brilla menos por el apantallamiento de las hojas de los árboles, pero también vemos noches mucho más brillantes, debido a la calima, más frecuente en esta estación.

El efecto de la Luna en el brillo de cielo de Madrid es poco acusado. En Sánchez de Miguel (2013) se analizaron en detalle las medidas proporcionadas por las imágenes en la banda V comprendidas entre el 2 de julio de 2012 a las 21:36:56 s TU y el día 1 de agosto de 2012 a las 03:34:38 TU. Las imágenes se clasificaron de manera visual descartando aquellas que contenían cirros o presentaban calima y se trabajó con las imágenes correspondientes a noches limpias y despejadas. Finalmente de las 32 noches, solo 15 estuvieron despejadas (véase la tabla 6.1).

Se asumió la calibración de la cámara proporcionada por Nievas Rosillo (2012, 2013) y la constante instrumental y la extinción deducida por Nievas Rosillo (2012) en la sección 2.5.6. Con esos parámetros se empleó 6.1 para calcular el brillo de cielo en la imagen.



Figura 6.6: Imagen de AstMon-UCM en la terraza del Observatorio UCM.

Tabla 6.1: Clasificación de las noches estudiadas en Sánchez de Miguel (2013)

Tipos	Limpias	Cirros	Polvo	Nubes	Errores
Noches/Imágenes	05,06,07,08,09,11,12,13 14,15,17,18,19,20,24	02,21,22 23,35,27,28	27,28,29 30,31,01	03,04 16,26	10,08/0803071 14/031338,17/031616

$$SB = C_\lambda + 2.5 \log_{10}(F_{cielo}(c/s)/A) \quad (6.1)$$

Donde F_{cielo} son las cuentas por segundo (c/s) medidas en el pixel indicado, C_λ es la constante instrumental, y A es el área, tipicamente medida en segundos de arco por arco segundo

al cuadrado, que corresponde a un pixel de la cámara. De esta manera obtenemos SB (Brillo de cielo/Sky Brightness) en magnitudes por arco segundo cuadrado. La constante instrumental usada es 10.366 ± 0.048 mag. En algunas ocasiones se han trasformado dichas magnitudes a un múltiplo del sistema internacional de unidades (Jy) mediante las ecuaciones:

$$AB = -2.5 \log_{10} f_\lambda - 5 \log_{10}(\langle \lambda \rangle) - 2.406 \quad (6.2)$$

$$f_\lambda = 10^{AB+2.406+5 \log_{10}(\langle \lambda \rangle)} \quad (6.3)$$

Donde f_λ es la densidad de flujo y $\langle \lambda \rangle$ es la longitud de onda media de la banda de observación.

La razón de utilizar dichas unidades es motivada por la necesidad de comparar con otros autores que utilizan escalas lineales de brillo de cielo como Puschnig et al. (2014) y Pun et al. (2014), y el hacer más sencillas las correlaciones lineales entre la fase lunar y el flujo reflejado.

Para el cálculo de brillo de cielo se escogió el cuadrado X[1200-1300] Y[1200-1300] que incluye el zenit (en el pixel 1227,1271). El área medida es de aproximadamente 8 grados cuadrados. En nuestro caso como medida tomamos la mediana de los valores en dicho cuadrado, para evitar el efecto de reflejos puntuales, estrellas y otras razones expuestas por Nievas Rosillo (2012) en las pag. 29-30. Además de estos reflejos, se detectaron anillos de abrillantamiento debido a reflexiones en el metacrilato. En Sánchez de Miguel (2013) se sugería como método alternativo de medida, el ajuste polinomial para evitar este tipo de efectos. Esta metodología ha sido generalizada a un ajuste a todo el plano mediante polinomios de zernike por Bará et al. (2014). Las efemérides utilizadas están basadas en la librería PyEphem (Rhodes 2011) y se calculan automáticamente a partir de las cabeceras fits.

Los resultados se muestran en la gráfica 6.7 donde se aprecian los cambios a lo largo de un mes o de una lunación completa. Como se puede ver la gráfica 6.7 el rango de variación de brillo de cielo durante una lunación en Madrid es esta relacionado con de la fase y la altura de la misma pero son mucho más importantes el contenido en aerosoles y otros factores como la cobertura nubosa, como se explica en Sánchez de Miguel (2013). Se puede apreciar cómo el brillo de cielo del día 18 puede llegar a ser similar al del día 5 o 6, solo por la mayor presencia de aerosoles.

6.3.2. Variación en color

Además de la variación en intensidad, las medidas de AstMon-UCM del brillo de cielo en tres bandas fotométricas nos ofrece la posibilidad de estudiar la variación en el color del brillo

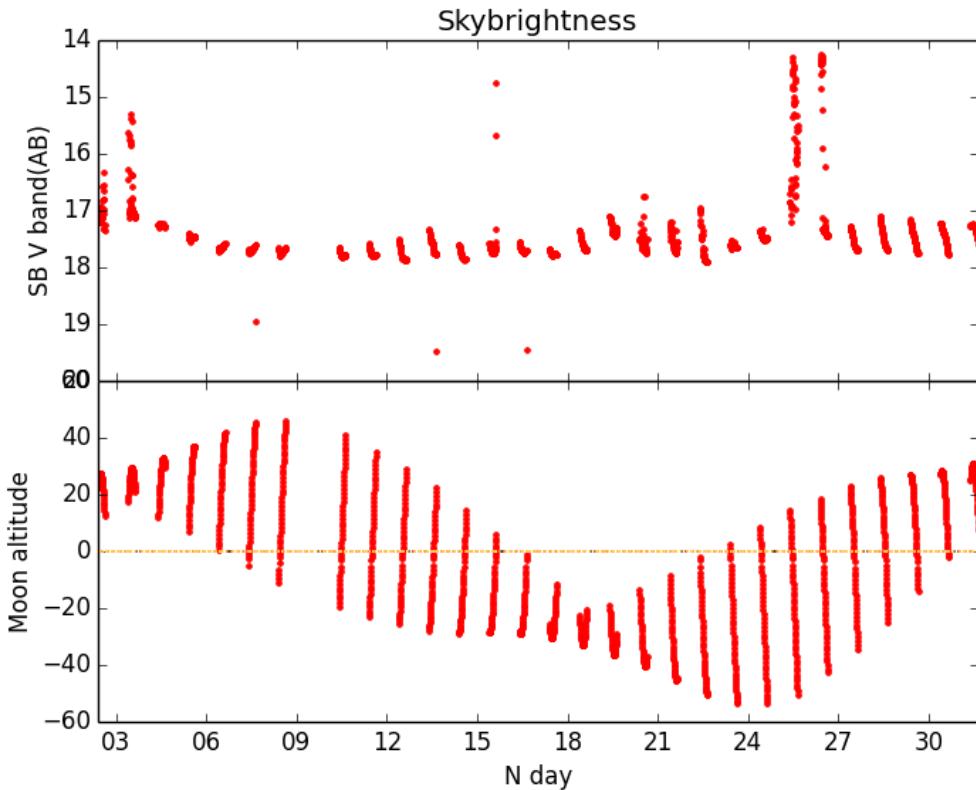


Figura 6.7: Brillo de cielo en el Observatorio UCM medido con la cámara AstMon-UCM en la banda V.

de cielo de Madrid que está relacionado con las variaciones en el tipo de iluminación a lo largo de la noche.

Esta variación se debe, como se comprobará en la siguiente sección, a la diferente contribución de distintos tipos de lámparas. Se aprecia en la figura 6.8 cómo mientras avanza la noche el color de la ciudad va pasando a ser más rojizo. Existe un desplazamiento entre las medidas del SQM y la banda V y B debido a que la sensibilidad espectral del SQM está entre estas bandas, como se puede ver en la figura 3.21.

6.3.3. Variación horaria del espectro del cielo

El brillante cielo de Madrid permite medir la evolución del espectro del cielo durante la noche, como podemos ver en la figura 6.10, donde apreciamos el cambio de brillo en diversas líneas de emisión. Hay que destacar cómo es posible detectar una gran diferencia en el espectro luminoso de la primera parte de la noche a la segunda. Tal y como vemos en la figura 6.9 las líneas de ScI 531.1 y Hg 546.0 decrecen de manera notable en la segunda parte de la noche. Eso

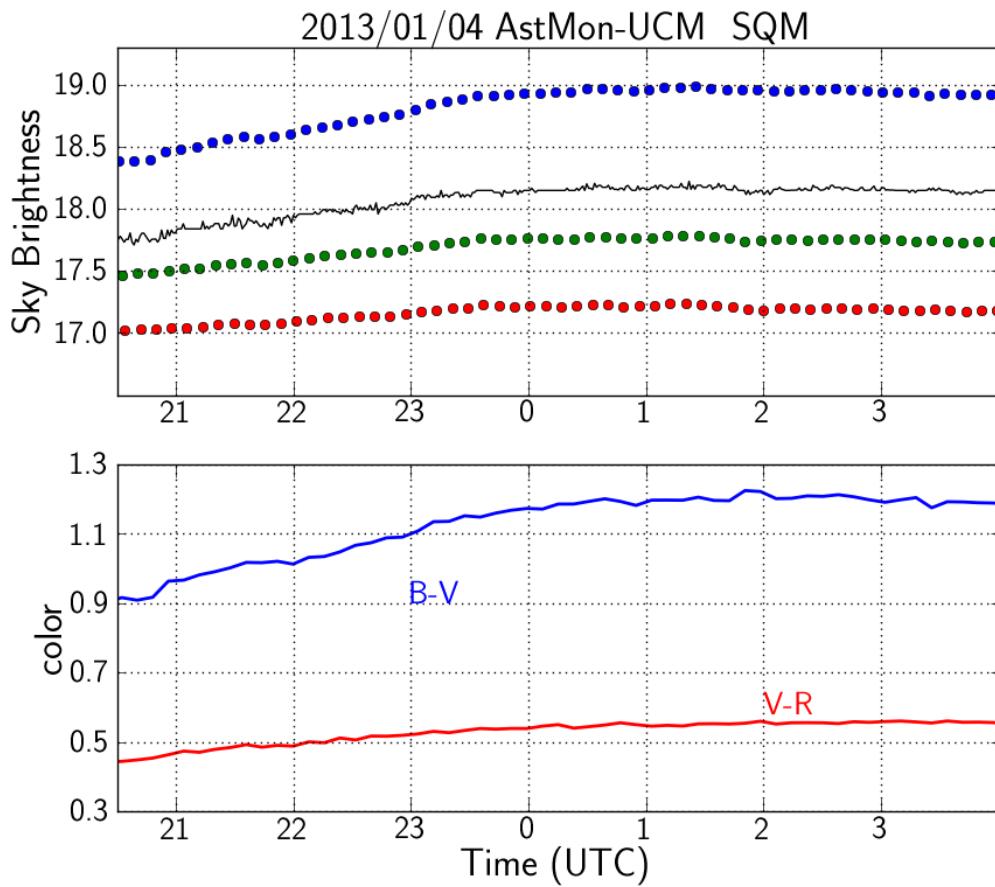


Figura 6.8: Cambio del color del brillo de cielo en Madrid. En puntos los valores de AstMon y en linea continua SQM. En el panel inferior se aprecia que el cambio de brillo es más acusado en B-V que en V-R. Esto se debe al apagado del alumbrado ornamental que es más rico en la componente azul, que el alumbrado vial que es principalmente de sodio.

se debe a que son líneas importantes en la iluminación ornamental, tanto en lámparas de Halogenuros metálicos cerámicos como lámparas Fluorescentes y de vapor de mercurio. También se observa un decrecimiento en la contribución del sodio de alta presión.

En un futuro será posible mediante síntesis espectral establecer la contribución exacta de cada lámpara. Por el momento se ha realizado un sencillo ensayo con 6 tipos de lámparas que como puede verse en la figura 6.11 es posible reproducir aproximadamente el espectro de cielo con dichas lámparas. Las líneas de Hg 435.8 y Ti 451.2 son las más complicadas de reproducir, dado que este tipo de líneas varían con la edad de las lámparas de vapor de Mercurio y tendrían que ser ajustadas de manera individual. También complica la tarea el hecho de que

cada fabricante introduce impurezas de diversos elementos en las lámparas que complican el espectro.

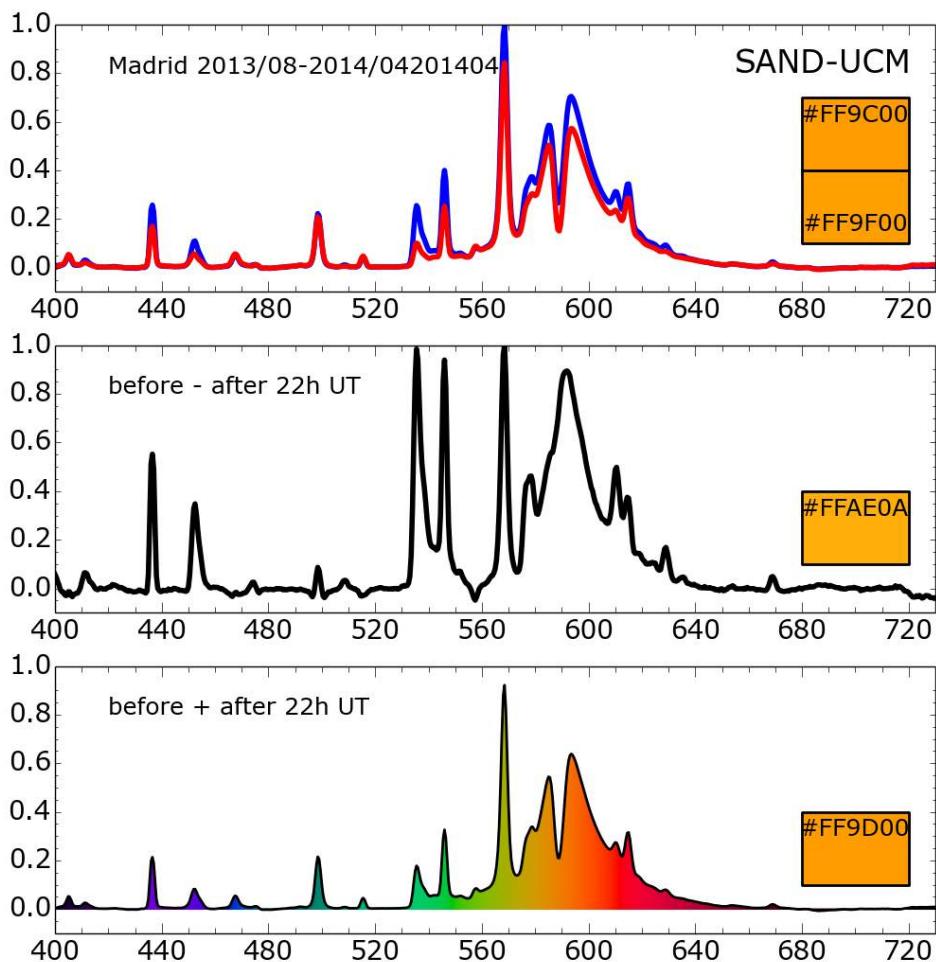


Figura 6.9: Espectro normalizado de brillo de cielo tomado por SAND. Arriba en azul, el espectro de la primera parte de la noche y en rojo de la segunda. En medio, la sustracción de ambos espectros. Abajo, la media de ambos espectros.

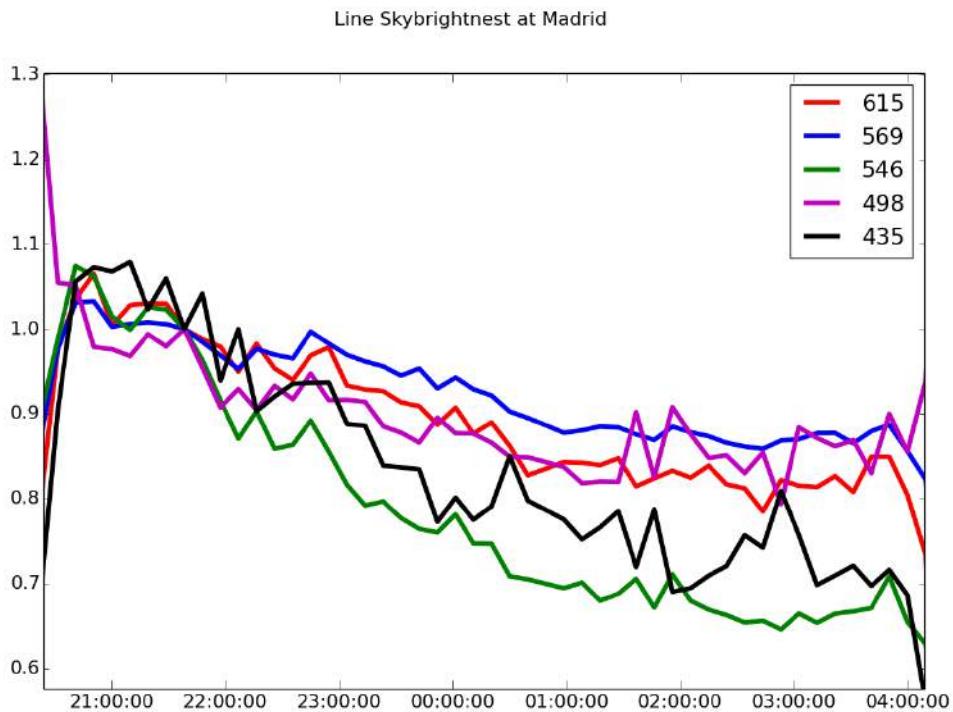


Figura 6.10: Evolución durante la noche de varias características espectrales. 615 , 569 y 498 nm pertenecen a NaI. 546 y 435 nm a HgI. Se aprecia cómo todas, menos la línea 498 son principalmente producidas por el alumbrado. Sin embargo, la línea 498 está presente también en el espectro del airglow.

6.4. Variación temporal del brillo de cielo en la red SQM-UCM

El brillo de cielo varía con la distancia a las fuentes emisoras de contaminación lumínica de manera que para lugares no contaminados y alejados de los focos de las grandes urbes el brillo de cielo es similar al de un lugar natural. Por ejemplo, las medidas esporádicas en lugares progresivamente más alejados de Madrid capital muestran que sus efectos se aprecian a distancias de hasta 150 km como mínimo. Sin embargo ya se ha descrito cómo a lo largo de la noche el brillo de cielo cambia significativamente dentro de Madrid. Para tener una visión completa se necesita disponer de datos de brillo de cielo en estaciones fijas que midan rutinariamente a lo largo de las noches.

En este apartado se muestra cómo las variaciones en la contaminación lumínica de Madrid afectan al brillo de cielo a diferentes distancias. Para estudiar el efecto del brillo de cielo de las

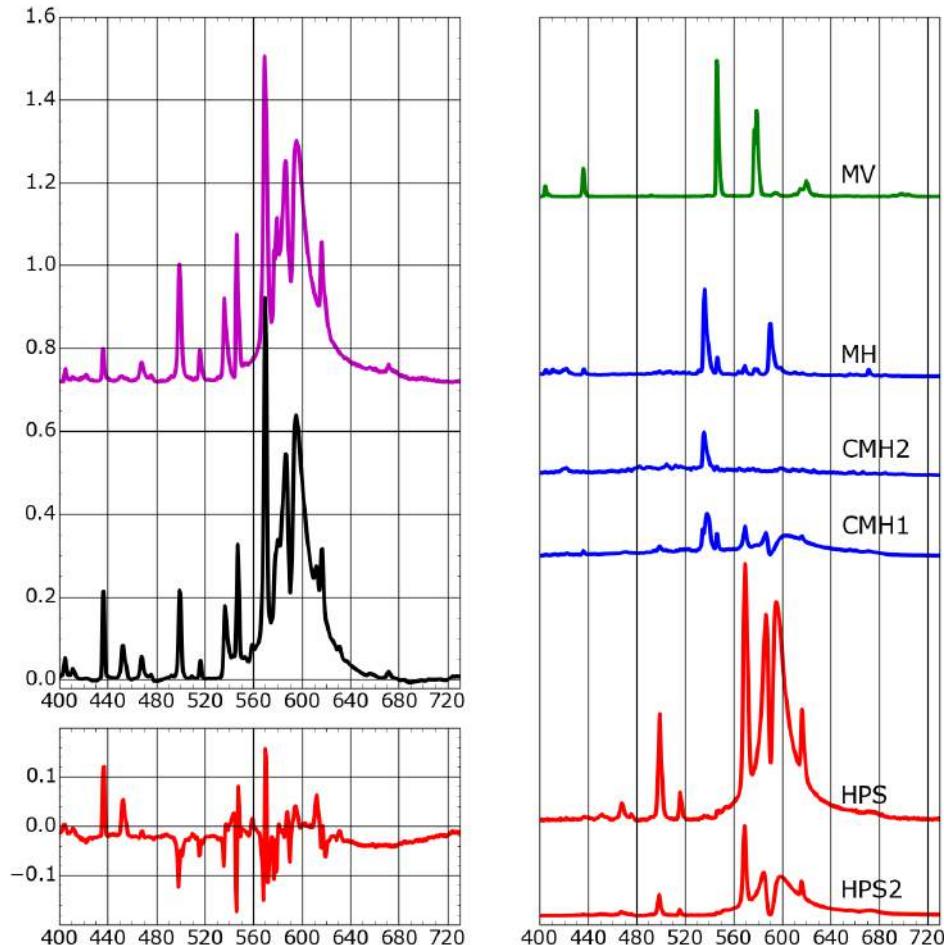


Figura 6.11: Síntesis espectral utilizando lámparas individuales y el espectro de cielo de SAND. Arriba a la izquierda en morado el ajuste, en negro el espectro observado. La combinación se ha realizado de manera manual, por ensayo error. Debajo, los residuos. A la derecha, los espectros utilizados para la síntesis. Es importante destacar la dificultad de ajustar adecuadamente las líneas HgI 435.8 nm y 451.2 nm debido a que la intensidad de estas varía con la edad de la lámpara.

fuentes de contaminación lumínica en Madrid se han instalado fotómetros SQM fijos en diversos puntos de la Comunidad de Madrid y región, cuya posición aparece en la tabla 6.2.

Con las medidas continuas desde estas estaciones es posible tener una referencia de medida del brillo de cielo para su estudio estadístico con diversas condiciones atmosféricas y de

Tabla 6.2: Estaciones de medida SQM

Nombre	Coordenadas	Descripción
Observatorio JIZ-Madrid	40°26'50.6"N 3°39'29.9"W	Dentro de Madrid (M30 E)
Majadahonda	40°28'8"N 3°51'48" W	Área residencial, Madrid a ~ 17km
Observatorio UCM (Madrid)	40°27'04"N 3°43'34"W	Madrid (Ciudad Universitaria)
El Gurugú	40°26'02"N 03°17'56"W	Área residencial ~ 40km de Km0
Observatorio de Yebes	40°31'27"N 3°05'22"W	Área Rural a ~ 70km de Km0
Villaverde del Ducado	41°00'05"N 2°29'31"W	Área rural a ~ 130km de Km0

emisión. Compararemos los resultados con los obtenidos para el Observatorio UCM, que es no sólo la estación de referencia sino la más afectada por contaminación lumínica.

Observatorio Yebes A continuación vamos a estudiar el brillo de cielo en el Observatorio Astronómico de Yebes, perteneciente al Observatorio Astronómico Nacional, y está situado a 65 km de la Puerta del Sol(Madrid)¹⁸, en la provincia de Guadalajara (40°31'30.75"N, 003°05'19.41"O).

El lugar es significativamente más oscuro que el Observatorio UCM, con un brillo de cielo en el zenit de entre 2 y 2.5 veces del brillo de cielo natural. El brillo de cielo es mucho menos cambiante que el del Observatorio UCM, con tan solo 0.3 magnitudes de variación. En la figura podemos observar cómo la mayor variación se produce al principio de la noche, entre las 18:30 h y las 23:00 h TU. Este oscurecimiento se debe probablemente al apagado de las luces de los comercios y casas del corredor del Henares. Al no ser plano como el del Observatorio UCM, no se puede achacar su componente principal al alumbrado ornamental. Existe una depresión en torno a las 3 TU que suponemos que es debido al paso de algún objeto celeste por el Zenit, ya que esa misma depresión se observa en invierno en la estación de Villaverde del Ducado (fig. 6.14). Esta depresión, sin embargo, en Villaverde ocurre más temprano, centrado a las 01 TU. Esta diferencia puede deberse a la orientación del fotómetro, ya que el SQM tiene una sensibilidad asimétrica (quizás fue Júpiter con brillo -2 y en oposición en Noviembre de 2013).

Para poder comprobar ese punto en un futuro es importante caracterizar la orientación en que se coloca el fotómetro. Este fenómeno es claramente visible cuando comparamos el comportamiento en verano de Villaverde del Ducado y Yebes. En este caso, Yebes es prácticamente plano hasta las 01 TU, que es cuando entra la Vía Láctea en su campo. Sin embargo en Villaverde, el efecto de la Vía Láctea es patente desde el principio de la noche. Esta es una de las razones por las que disponer de cámaras es cualitativamente mejor que solo fotómetros, ya que

¹⁸Punto de referencia de las carreteras radiales.Kilometro 0(Wikipedia 2014)

es más fácil distinguir estos efectos.

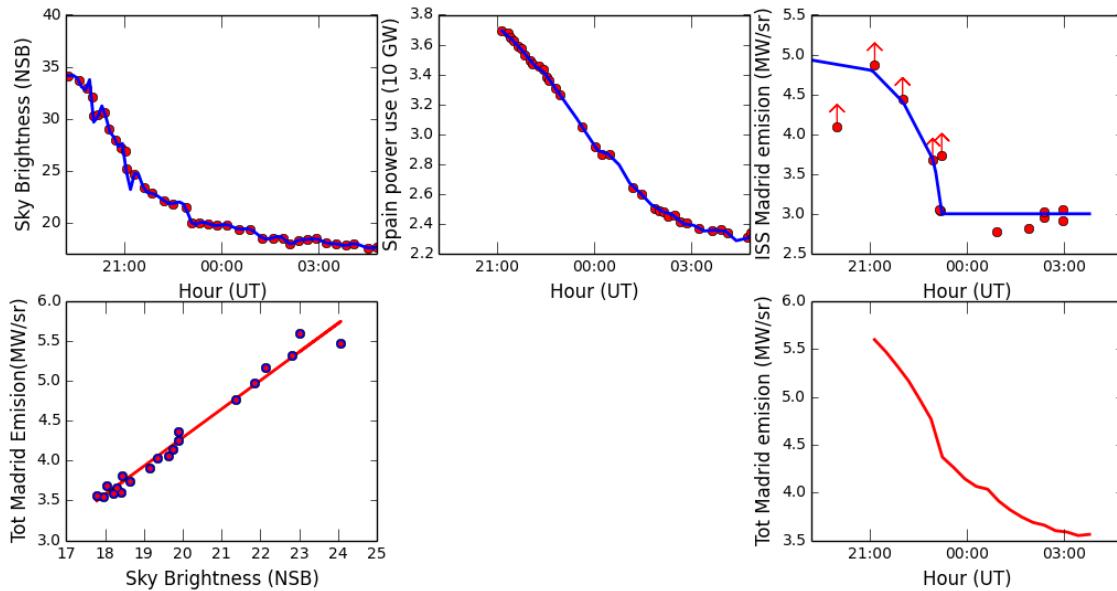


Figura 6.12: Arriba a la Izquierda: Brillo de cielo en unidades del Brillo natural. Centro: Potencia usada en España. Arriba derecha: Flujo medido en las Imágenes de la ISS. Abajo a la derecha: Suma de 0.4 Fot. ISS + Gasto Total España * 0.00001 = Emisión Total de Madrid. Abajo a la izquierda: Ajuste de SB vs Emisión total de Madrid. Se ve que la caída del brillo de cielo más allá de las 23:00 TU está perfectamente explicada por la caída de actividad (coches, comercios y ventanas de casas). La caída de antes de las 23:00 TU se explica por la inyección masiva de luz por parte del alumbrado ornamental y oficinas, casa y tráfico).

Estación de observación de meteoros de Villaverde del Ducado En Villaverde del Ducado (41.00082 N, 2.491 O) tiene el Dep. de Astrofísica y CC. de la Atmósfera una estación de detección de Bólidos operada por el Prof. Jaime Zamorano. Esta estación está a más de 139 km de la Puerta del Sol de Madrid, y está en una región que en invierno llega a tener en el Zenit un brillo de $21.5\text{mag}/\text{arcsec}^{219}$, que es considerado cercano al natural. En verano es significativamente más brillante, hasta 0.2 magnitudes. En esta estación la oscuridad es tal que se aprecia claramente el efecto del paso de la Vía Láctea en verano, como comentábamos por comparación con el caso de Yebes.

¹⁹No existe consenso sobre cuál es el valor de brillo de cielo natural en lugares no polucionados a nivel del mar. Si bien el rango comúnmente aceptado va entre 21.5 y 21.7.

Es de destacar que en invierno, quizás debido al efecto de la nieve, puede darse el caso de nubes brillante, que produzcan brillos de cielo de hasta mag 17. Sin embargo, en Verano esto no se produce, por lo que parece que se puedan producir lo que se conoce como nubes negras. En general, en sitios polucionados las nubes incrementan el brillo de cielo, sin embargo en este caso no es así, al haber pocas fuentes de contaminación lumínica en los alrededores.

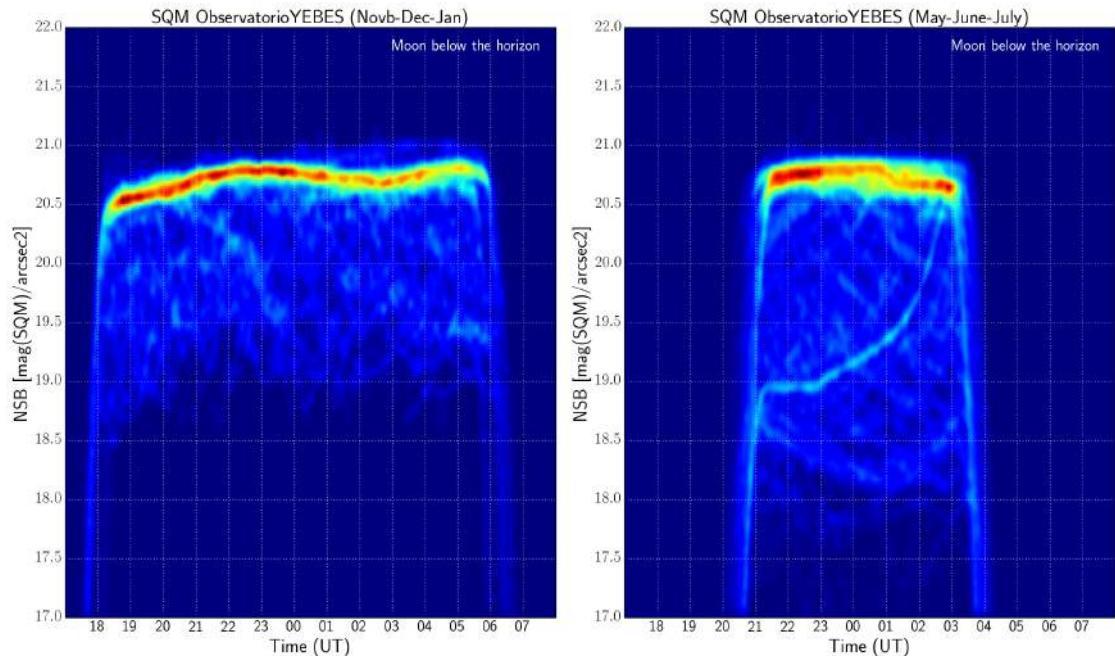


Figura 6.13: Diagrama de densidad del brillo de cielo en el zenith del Observatorio Yebes. A la izquierda los meses cercanos al solsticio de invierno. A la derecha los meses cercanos al solsticio de verano.

6.5. Variación espacial de brillo de cielo

6.5.1. Introducción

Se estudia en este apartado la variación espacial del brillo de cielo en la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) y sus alrededores con el fin de proporcionar una base de datos muy amplia que permita la aplicación de los modelos de difusión atmosférica a la zona central de la península ibérica. El resultado final es un mapa del brillo de cielo que se registra típicamente en diferentes zonas y que puede ser comparado con las imágenes nocturnas obtenidas por satélites desde el espacio que corresponden a la contaminación lumínica.

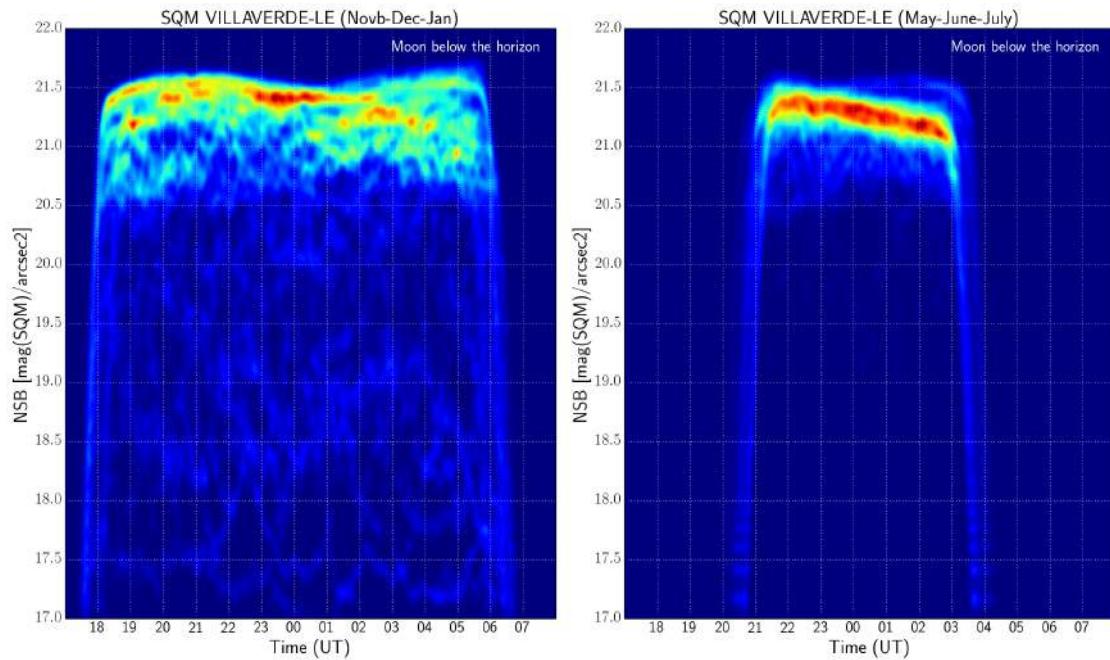


Figura 6.14: Diagrama de densidad del brillo de cielo en el zenit del Villaverde del Ducado. A la izquierda los meses cercanos al solsticio de invierno. A la derecha los meses cercanos al solsticio de verano.

6.5.2. Adquisición automática de datos

Los modelos de SQM que tienen conexión a ordenador pueden ser usados para medidas de campo usando ordenadores portátiles (Pila Díez 2010) o pequeños ordenadores como la RaspberryPi (Conci 2013). Más aun, cuando instalamos el dispositivo en lo alto de un vehículo en movimiento, podemos obtener medidas de brillo de cielo durante el viaje. Mientras que los modelos SQM-L necesitan un tiempo de integración de aproximadamente 20 segundos en los sitios más oscuros ($21.5 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$) antes de dar una lectura, por contra, los dispositivos SQM-LU y SQM-LE pueden dar lecturas cada 5 segundos sin pérdida de precisión en lugares oscuros. De esta manera, podemos obtener una medida cada 100 m en un vehículo que se mueva a una velocidad de 72 km/h. Este procedimiento nos permite cubrir un gran área con suficiente resolución espacial.

Esta es la estrategia empleada en la adquisición de los datos que se ha utilizado para la elaboración del mapa, ya que las medidas individuales con fotómetros manuales son claramente insuficientes. Para la localización de cada medida se utiliza un GPS comercial (Garmin eTrex Legend HCx) que registra simultáneamente el recorrido. Es importante que exista una correcta sincronización entre los tiempos utilizados por el ordenador y el GPS antes de comenzar cada

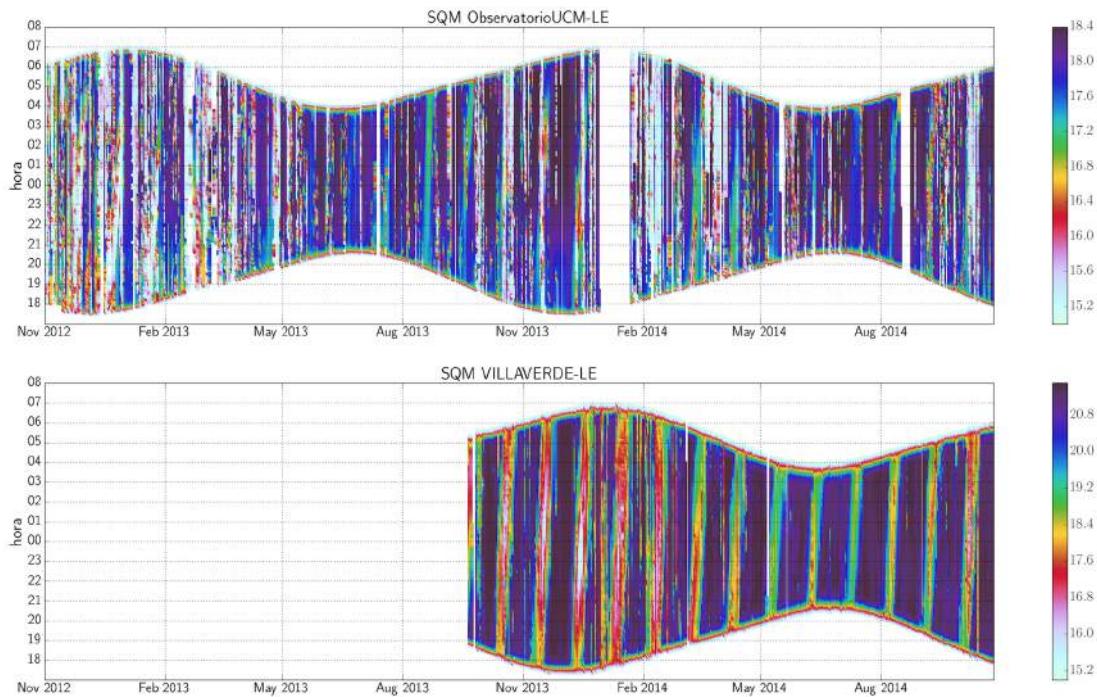


Figura 6.15: Registro completo de medidas SQM en las estaciones del Observatorio UCM y Villaverde del Ducado. En Villaverde se aprecian claramente las lunaciones, mientras estas son difícilmente distinguibles en los registros de Madrid.

viaje, ya que dichos tiempos pueden utilizarse como control para ligar los valores obtenidos en las medidas y las posiciones. Al final de la noche, es posible correlacionar las posiciones con las medidas (véase Pila Díez (2010)) o utilizar un programa que tome las posiciones y medidas simultáneamente como es el programa RoadRunner (Rosa Infantes 2011).

El procedimiento descrito anteriormente acelera enormemente la adquisición de datos, pero se deben tomar algunas precauciones. Para un fotómetro en movimiento el brillo de cielo obtenido es un promedio de los valores a lo largo del recorrido durante el tiempo de integración. Si bien no esperamos variaciones significativas en distancias de 100 m sí se da el caso de que puedan aparecer obstáculos tales como puentes, árboles y demás que puedan desvirtuar medidas concretas. Se han realizado varios ensayos consistentes en la repetición del mismo recorrido varias veces a diferentes velocidades sin que se puedan percibir cambios en los valores. En cualquier caso, la velocidad puede ser ajustada a la resolución espacial del mapa final. Para la adquisición se han utilizado tanto el software SQM-ReaderPro como Roadrunner, ya que ambos nos permiten controlar la frecuencia de adquisición. El intervalo de lectura de datos se fijó en 5 segundos, aunque para las regiones más oscuras fue de 15 segundos.

Este procedimiento fue desarrollado por el estudiante Alejandro Sánchez por primera vez



Figura 6.16: Montaje medida automática desarrollado para esta investigación. Por la cual se realiza una toma de medidas de brillo de cielo de manera extensiva. Consiste en un fotómetro SQM adosado al techo del vehículo y un GPS controlados por un ordenador portátil. Los datos se sincronizan bien por software o por una señal de tiempos.

para el trabajo de Pila Díez (2010), dado que hasta el momento no se disponía de ningún método para realizar medidas de manera masiva. Era preciso realizar este tipo de medidas para poder comprobar si los modelos que dan predicciones bidimensionales eran correctos (Cinzano et al. 2001a). Este procedimiento fue presentado junto con los resultados de la primera campaña en el XIX Congreso Estatal de Astronomía en Madrid en octubre de 2010. Durante aquel congreso se comprobó que había otros grupos interesados en la metodología (Rosa Infantes 2011) y desde entonces se ha colaborado con esos grupos.

6.5.3. Viabilidad e implementación

Los datos presentados en este trabajo corresponden al brillo de cielo en zenit. Con este propósito se aseguraron los fotómetros al techo de los vehículos, cuando que su dirección fuera perpendicular al suelo. El apuntado puede ser tan bueno como un grado de precisión, pero esperamos diferentes inclinaciones debido a la pendiente de la carretera. Se podría utilizar una montura estabilizada para compensar dicho problema, sin embargo, la mayoría de las carreteras

están diseñadas para no presentar inclinaciones superiores a 8.6% (4.9 grados) como ejemplo de una pequeña porción de la subida al Puerto de Navacerrada (Sierra de Guadarrama, montañas cercanas a la ciudad de Madrid). La inclinación máxima permitida 7% en carreteras convencionales y en con lugares de inclinación excepcional de 10% para carreteras con velocidad máxima permitida de 40 km/h (Dirección General de Carreteras (2008)).

Los mapas de brillo de cielo obtenidos con los mismos fotómetros usando un trípode y tomando medidas cada 30 grados de azimut y alturas de 20, 40, 60, 80 y 90 grados muestran cambios muy pequeños entorno al zenith, i.e. un error de 5 grados en el apuntado no debería de producir cambios significativos incluso en zonas altamente polucionadas. Como referencia, el valor medio en el Observatorio Astronómico de la Universidad Complutense de Madrid (Observatorio UCM) es de 17.9 en el zenith y 17.8 a 80 grados (i.e. el ángulo zenital de 10 grados) después de cuatro años de monitorización continua con un monitor astronómico. Además, las carreteras más inclinadas suelen estar en zonas oscuras, donde este efecto no es tan importante.

Se debe tener en cuenta que el fotómetro SQM-L tiene un ángulo de aceptación de la luz entrante. Además, existe una fuerte variación de la respuesta angular del fotómetro que cae con la distancia angular al eje óptico. Es posible estimar la diferencia entre el valor real del brillo de cielo en un punto preciso del cielo donde apunta el SQM-L y el valor medido por el fotómetro. Para dependencia angular del dispositivo se han usado los resultados de Cinzano (2005) en las pruebas de los fotómetros SQM y para la dependencia típica del brillo de cielo con la distancia al zenith (la Tabla C.1 de Patat, 2003 utiliza el modelo de Garstang (1989))

Encontramos que las lecturas de los SQM-L serán ligeramente más brillantes que los valores reales cuando el ángulo zenital se incrementa (a bajas alturas) para un típico cielo oscuro con un incremento de 1 magnitud por arco segundo cuadrado desde el zenith al horizonte. Concluimos pues que las medidas tomadas con los SQM-L corresponden con el brillo de cielo promedio de la región a la que apunta el dispositivo. Para cielos contaminados típicos, donde el brillo cerca del horizonte presenta un crecimiento intenso, estas diferencias son más relevantes.

Resulta interesante estimar la pequeña variación del brillo de cielo cerca del zenith en zonas de brillo cercano al natural ($\sim 21.5 \text{ mag/arcsec}^2$). Si el dispositivo SQM-L no está correctamente apuntado al Zenit y está apuntando con un error de unos 10 grados, las diferencias entre el valor medido y el real son menores de un 1%. Lo mismo es cierto en cielos moderadamente contaminados ($\sim 20 \text{ mag/arcsec}^2$). Hemos obtenido imágenes de todo el cielo usando cámaras Reflex digitales (DSLR) con objetivos ojo de pez en el Observatorio Astronómico de Yebes a 70 km de Madrid. Las imágenes de todo el cielo calibradas producen mapas de brillo de cielo donde podemos ver la asimetría del mismo debido, desplazándose la parte más oscura del cielo del zenith en dirección opuesta a Madrid y Alcalá de Henares (figura 6.18).

Mostramos en la Figura 6.19 la variación del brillo de cielo con el ángulo zenital medido

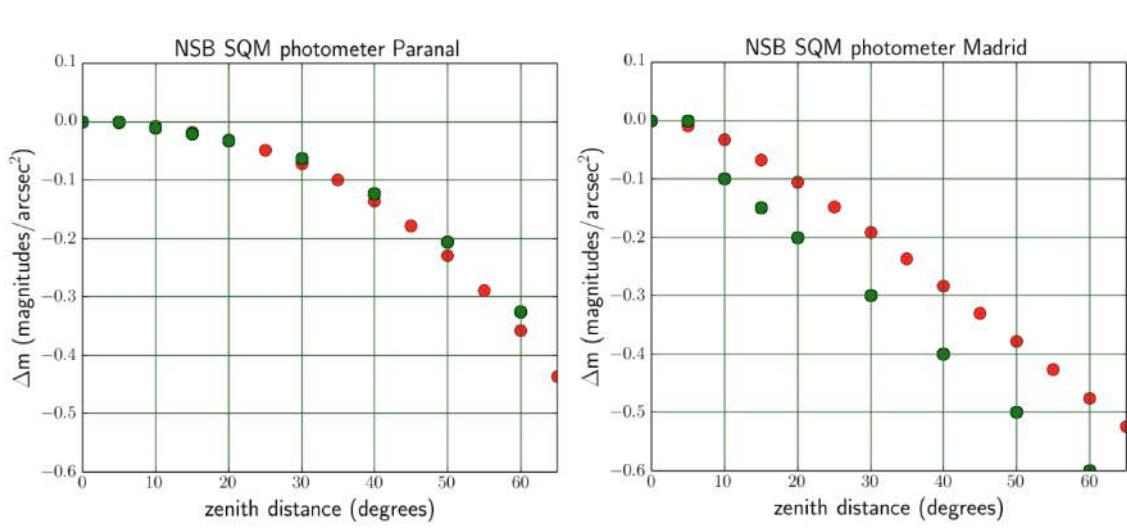


Figura 6.17: Comparación de las medidas con fotómetro SQM (puntos verdes) y los valores reales del brillo de cielo (puntos rojos). Para cielos oscuros como el Observatorio de Paranal (panel izquierdo) los valores coinciden mientras que para lugares con contaminación lumínica como Madrid (panel derecho) las diferencias son del orden de 0.1 mag/arcsec².

a lo largo de la línea NW-SE para este mapa y los valores esperados usando un dispositivo SQM-L (se ha hecho pasar los datos de la cámara a través de la respuesta angular de un SQM). Una vez más el error debido a que apunta inexacta es del mismo orden.

Sin embargo, hemos de ser más cuidadoso cuando se toman medidas en áreas altamente contaminadas (18 mag/arcsec²) ya que un incorrecto apuntado puede darnos valores incorrectos de brillo de cielo (ver figura 6.17). Para un correcto estudio de estas fuente de error, dos fotómetros SQM fueron instalados en lo alto de un mismo coche apuntando al zenith al mismo tiempo. Los datos obtenidos durante el recorrido entre Fuentidueña de Tajo y Tarancón el 26/01/2014 se pueden ver en la figura 6.21. Existe una diferencia de entorno a 0.1 mag/arcsec² entre los valores medidos de brillo de cielo (puntos verdes y puntos rojos). Es interesante notar que dicho desplazamiento no es constante en la misma dirección. Nuestra conclusión es que un pequeño error de alineamiento puede hacer que uno apunte ligeramente hacia delante y detecte antes al subida de brillo, mientras el otro, que apunta más zenithal no la perciba. Otra posible explicación, es que ya que los fotómetros no estaban alineados en su dirección longitudinal, la asimetría azimutal de la respuesta del SQM provoque que en una dirección un fotómetro sea más sensible que el otro. Tanto uno como el otro efecto explicarían que cuando nos acercamos/alejamos de un pueblo, el fotómetro A se abrillanta/oscurece de manera contra-

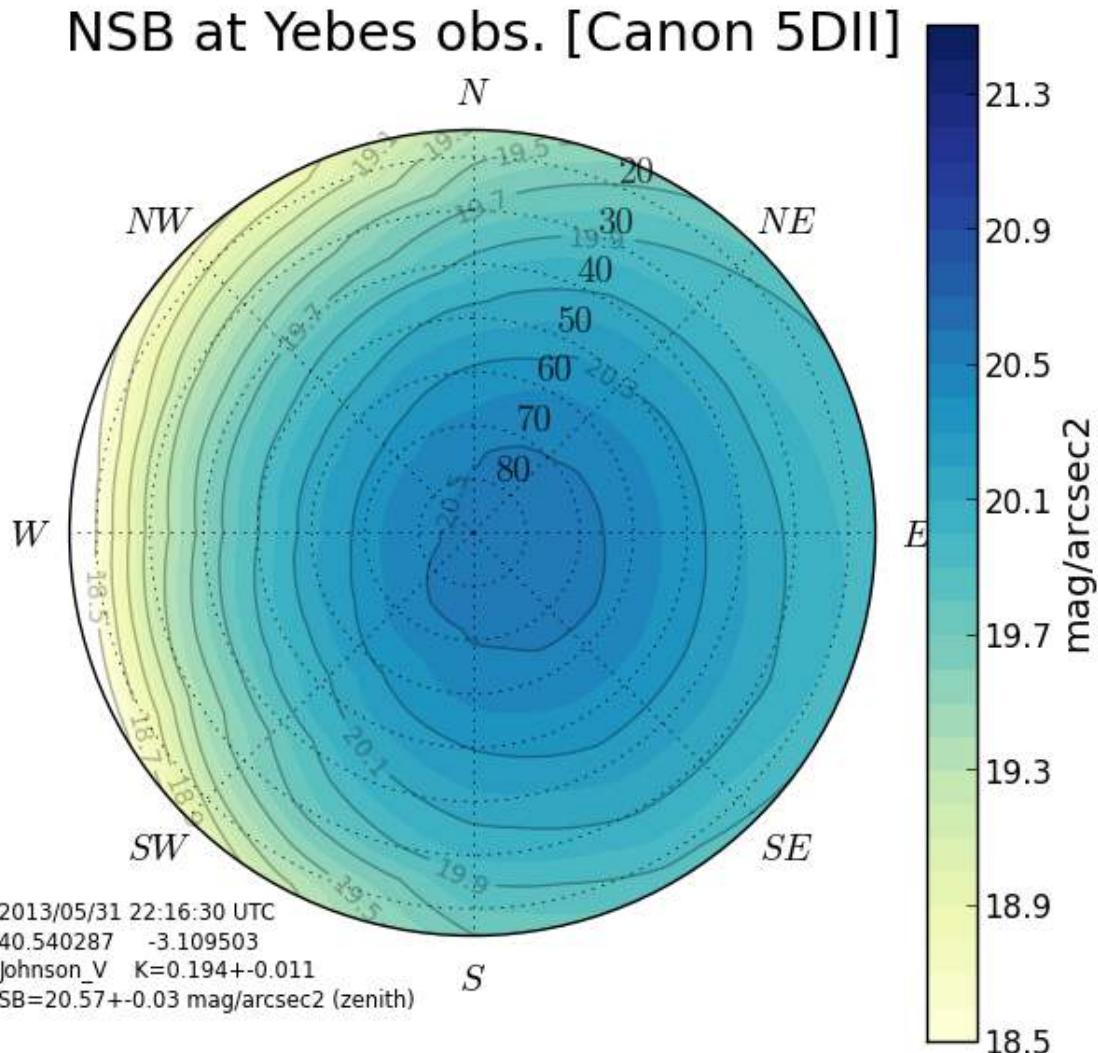


Figura 6.18: Mapa de brillo de todo el cielo, en banda V, Obtenido en el Observatorio Astronómico de Yebes usando una cámara Reflex digital (DSLR). La asimetría es debida a la presencia de Madrid al oeste del Observatorio. Software utilizado pyASB (Nievas Rosillo 2012, 2013).

ria al fotómetro B. Por comparación, el plot incluye otro recorrido en en una noche diferente (29/12/2013) un mes antes. La diferencia entre estos dos recorridos puede llegar a ser de hasta 0.2 mag/arcsec^2 , por lo que, estas diferencias entre la posición de los fotómetros o su inclinación, son menores que los efectos producidos por las condiciones ambientales (el mismo fotómetro se usó en el recorrido anterior)

Otra fuente de problemas en la adquisición automática es la contaminación por la luz directa de farolas. Debido al ancho ángulo de aceptación del fotómetro SQM es muy fácil que sea contaminado por fuentes muy intensas fuera del eje. Aunque a 40 grados fuera del

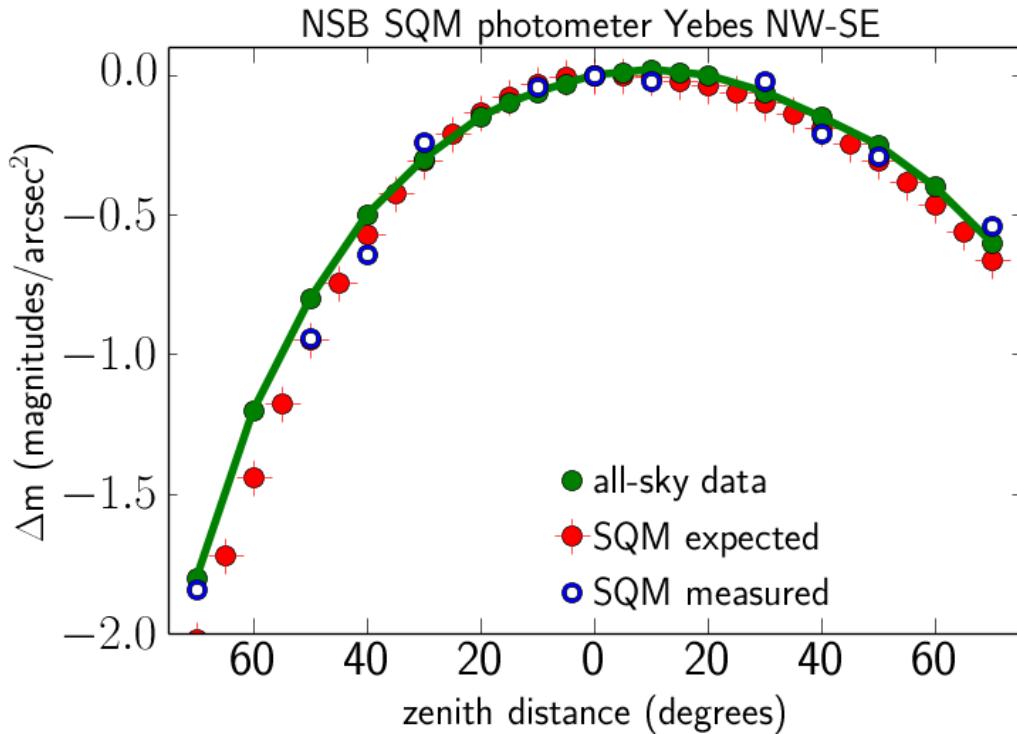


Figura 6.19: Variación de brillo del cielo en la dirección NW-SE en el mapa de la figura 6.18 obtenido con una cámara fotográfica y objetivo de ojo de pez (puntos verdes) en el Observatorio de Yebes. Los puntos rojos indican los valores esperados para medidas con fotómetro SQM y los azules los obtenidos esa misma noche apuntando el fotómetro a las direcciones seleccionadas.

eje la sensibilidad del SQM es 100 veces menor, las luces de la calle son considerablemente más brillantes que cielo (más de cuatro órdenes de magnitud más brillantes). Por tanto, un método cuidadoso sería tomar medidas solo en carreteras no iluminadas y no tomar medidas entrado en las zonas urbanas. Ese procedimiento no precisa de filtrado de datos salvo obstáculos en el camino como árboles, puentes o túneles. Por otro lado, los datos obtenidos en un viaje continuo presentan dos poblaciones claramente diferenciadas como se muestra en la figura 6.21. La bimodalidad del histograma es el resultado de unir los verdaderos valores de brillo de cielo con aquellos que están contaminados por luces de carretera, calles y estaciones de servicio. En este caso, un nivel de referencia puede ser adoptado sabiendo que el brillo de cielo máximo esperado, i. e. las afueras de Madrid. Aunque en el interior de la ciudad pueden llegar a medirse lugares tan brillantes como 17.2 (ver figura 6.7) el valor adoptado como máximo brillo no

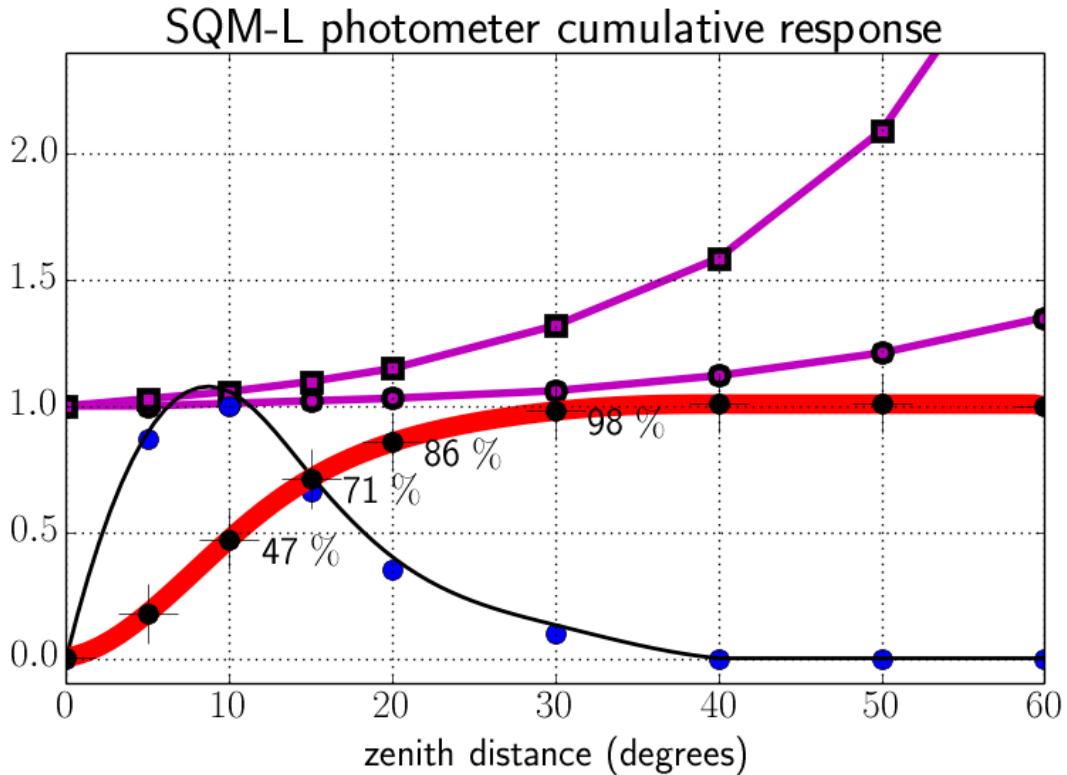


Figura 6.20: Respuesta acumulada del modelos de fotómetro SQM-L (línea roja) a lo largo de la distancia zenital. La línea superior magenta representa la variación del brillo de cielo en unidades lineales relativas para el cielo del Observatorio Astronómico de Yebes en el azimut NW, puntos circulares. Una típica variación del brillo de cielo en unidades relativas usando Patat 2003 y el modelo de Garstang (1989) para un cielo oscuro está mostrado arriba en color magenta, puntos cuadrados. El lugar está afectado por la contaminación lumínica por el brillante horizonte. Los puntos azules son pesados por el ángulo de incidencia de las medidas (Cinzano 2005) y la línea negra muestra la respuesta del SQM-L. El porcentaje del total de la luz registrada usando protecciones que bloqueen ángulos de 10, 15, 20 y 30 grados del zenith esta indicado en la gráfica.

afectado por fuentes fuera de eje es $18 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ para todo viaje fuera de Madrid ciudad. Este puede que sea un valor conservador que rechace valores reales, pero para lugares altamente contaminados como en interior de las ciudades recomendamos usar procedimientos de medida manuales.

Algunos grupos de investigación están utilizando bafle en el fotómetro para rechazar la

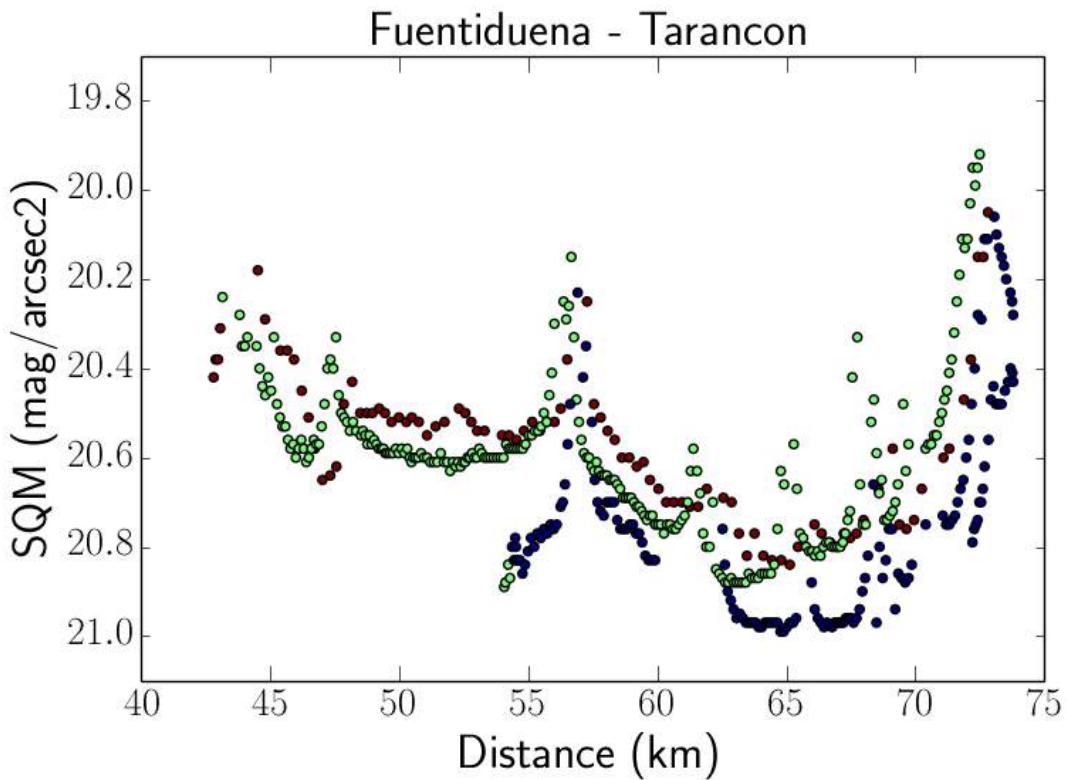


Figura 6.21: En esta figura se aprecian tres secuencias de medidas realizadas entre los municipios de Fuentidueña de Tajo y Tarancón por la carretera A3. Los puntos rojos y verdes fueron tomados simultáneamente (2014-01-25) con dos SQM diferentes (1716 y 1738). Los puntos azules fueron tomados con el mismo dispositivo SQM (1716) que los rojos pero en una fecha diferente (2013-12-29). Se observa que entre los puntos rojos y verdes hay pequeñas diferencias y aparentemente existe un offset entre ellos. Este offset se debe a la diferente inclinación u orientación del SQM. Sin embargo, la diferencia entre ellos es mucho menor que la dispersión natural de los datos por el efecto de los aerosoles, como se puede ver comparando ambas series con la de puntos azules. El día 29/12 hubo un espesor óptico por aerosoles en 500 nm de alrededor de 0.051, comparado con el de día 25/1 que fue de 0.02.

luz que pueda incidir directamente desde ángulos altos. Nosotros hemos calculado la cantidad de brillo de cielo que se pierde mediante la adición de este suplemento. Usando de nuevo los resultados de Cinzano (2005) y la típica dependencia del brillo de cielo con la distancia al zenit (Tabla C.1 de Patat, 2003, quien usa el modelo Garstang 1989) encontramos que el SQM-L

puede registrar el 98 % de la luz total incidente si el bafle bloquea hasta una altura de 30 grados (figura 6.20). Hemos realizado en mismo test para el mapa de brillo de Yebes cerca del horizonte y el resultado es idéntico. Los resultados de los cálculos y los test de campo realizados indican que puede ser recomendable el uso de estos baflas de hasta 30° en áreas altamente polucionadas. Los usuarios de modelos SQM antiguos, sin lente, tienen cobertura mayor, por lo que el uso de dicho bafle bloquearía el 53 % de la luz.

Es interesante determinar cual es la distancia de seguridad a la que podemos medir el brillo de cielo sin vernos afectados por fuentes puntuales. Para una farola con lámpara de mercurio de 3 m de altura obtendríamos un valor real de brillo ($18.85 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$) a una distancia de 25 m desde un poste aislado. El registro obtenido después de conducir a lo largo de carreteras iluminadas muestra una serie de picos y valles como esperábamos. Algunos experimentos fueron realizados para determinar si los valores que había entre farolas podían representar valores reales de brillo de cielo. Por ejemplo, los días 16 y 17 de mayo de 2010 incluyen la parte norte de la carretera de circunvalación M-30 alrededor de Madrid y los primeros 30 km de las autopistas radiales A-1 y A-2. Encontramos que a la máxima velocidad a la que se puede realizar el muestreo es de 60 km/h, entre poste y poste hay una distancia de 50 m, cuando el fotómetro mide a 5 veces por segundo. Esta velocidad es demasiado baja para estas vías, por lo que en estas zonas solo tomamos medidas cuando las luces están apagadas por mantenimientos u otras razones (robo de cable de cobre, apagados selectivos, etc).

No se puede ignorar que existen otras muchas fuentes de error que pueden provocar falsas lecturas cuando se utilizan métodos automáticos de medida. Algunos son los ya mencionados túneles que normalmente dan valores más brillantes cuando esta iluminados o más oscuros en algunos casos. Lo mismo ocurre al pasar sobre un puente cuando las luces laterales del coche iluminan las paredes. En carreteras rurales con árboles a los márgenes son un problema dependiendo de cuanto se introduzcan en la vertical de la carretera. Más oscuro o más claro dependerá de cuánta copa del árbol cubra la misma y sea iluminada por las luces del coche. En lugares contaminados, las copas de los árboles pueden bloquear la luz del cielo y dar valores más oscuros. En estas circunstancias, solemos estudiar con cuidado las medidas tomadas en lugares abiertos para poder discriminar si las mismas están afectadas por los árboles o no. Por ello solemos tomar la precaución de detener en coche en estos lugares abiertos para tomarlos como referencia. En cualquier caso, dentro de un recorrido la tendencia es monótona y se observan grandes cambios como signo de malas detecciones.

Estos datos indeseados puede ser fácilmente rechazados mediante la cuidadosa inspección de la posición y brillo de los datos gracias a la redundancia estadística de cada serie. Como resultado, la distribución de datos tiene una dispersión baja en comparación con los de exploraciones en las que no se tiene control sobre el proceso de medida. Por ejemplo, en las medidas

del proyecto Globe at Night (Kyba et al. 2013) encuentra una cola muy brillante que no puede explicarse de otra manera que como medidas contaminadas por farolas, pero por la naturaleza del proyecto, aunque todas son medidas tomadas de manera manual, al ser estas realizadas por personal sin experiencia y sin el suficiente cuidado en ocasiones, dan lugar a un gran número de valores atípicos²⁰ (outliers) que no pueden ser descartados salvo por su anormales valores sin aportar una explicación al origen del error.

Por otro lado, en muchos recorridos se han tomado notas para conocer las circunstancias del recorrido, ya que el control de la toma de datos mejora mucho el resultado. Aunque por seguridad, lo ideal es que el equipo de medida sea un conductor y una persona encargada de la toma de datos. Sin embargo, en ocasiones esto no es posible, y en esos casos, la grabación del recorrido puede ser una herramienta complementaria, si bien, no mejora la seguridad del conductor que tiene que seguir prestando atención a dos tareas (ejemplo de grabación <http://youtu.be/zesdAUPNuBY>).

Por las razones expuestas en esta subsección y el diferente efecto en zonas contaminadas o no de los árboles y túneles, no es posible establecer un método de filtrado puramente estadístico. Un método automático de filtrado necesitaría conjugar el conocimiento de la falta de obstáculos en el terreno con filtrados paso alta o paso baja dependiendo del nivel de contaminación. La elaboración de ese sistema está fuera del alcance de este trabajo, pero sienta las bases del mismo.

La rápida y eficiente toma de datos desde un vehículo debe ser complementada con medidas manuales tomadas en lugares donde la iluminación artificial puede contaminar los valores o en el interior de las poblaciones donde estamos llenos de fuentes de luz. En estos casos es necesario encontrar un lugar oscuro y tomar las medidas con cuidado. Las mejores localizaciones suelen ser parques, azoteas o aparcamientos donde apaguen las luces tras la hora comercial. Para tomar medidas cerca de las autopistas, es necesario salir a caminos de servicio no iluminados. Lo ideal es tomar medidas con un trípode fotográfico, o en su defecto, tomar medidas con el SQM mirando al N, S, E, W tal y como se experimentó en la reunión de intercomparación de la red LoNNe en Madrid en julio de 2014.

6.5.4. Campañas

El primer gran conjunto de datos fue adquirido por dos estudiantes de licenciatura durante dos trabajos académicamente dirigidos. Berenice Pila Díez obtuvo valores en 3731 lugares durante diez viajes en el rango de 55 a 242 km de distancia de Madrid capital (Abril a Mayo de 2010) con un total de 1146 km (Pila Díez 2010). Alberto Domínguez realizó seis viajes(Abril a Julio 2011) con un total de 550 km.

²⁰Término técnico de poco uso en español. Más común en varios idiomas el uso de la palabra inglesa outlier.

Algunas carreteras fueron repetidas para comprobar la repetibilidad (ver sección 2.4). Aunque el área cubierta era suficiente para extraer conclusiones científicas, decidimos tomar más medidas en otras regiones inexploradas a finales de 2011. La adquisición manual fue utilizada para aquellas áreas complicadas para la toma de datos automática. Es extremadamente importante tomar datos en el centro de Madrid, ya que la capital ocupa un radio de 10 km. Durante dos noches consecutivas sin luna ni nubes se tomaron 20 medidas en puntos sin luces en lugares céntricos de Madrid. Algunas de las medidas fueron tomadas en las azoteas de edificios.

Durante los años siguientes, Carlos Tapia, Francisco Ocaña, Jesús Gallego, Jaime Zamorano y Alejandro Sánchez de Miguel realizaron campañas complementarias extendiendo ampliamente la tomas de medidas (ver tabla 6.4). El objetivo científico de estas exploraciones complementarias ya no era el de simplemente tomar una muestra significativa de medidas de brillo de cielo de la Comunidad de Madrid, sino cubrir todo el rango dinámico posible de brillos de cielo y crear una malla lo más tupida posible en nuestra región. El objetivo científico de estas exploraciones implicó salirse de la Comunidad de Madrid, ya que en su interior no se presentaban lugares que cubrieran el espectro oscuro de valores. Dichas campañas se ha extendido desde 2012 hasta la actualidad, y en ese periodo se han tomado treinta mil medidas, con un total de kilómetros recorridos de 6753 km.

El conjunto de datos actual en torno a la Comunidad de Madrid cubre un área de 5389 km^2 (suponiendo que las diferentes medidas son representativas de celdas de tamaño 2.2 km^2), de los cuales $\sim 4800 km^2$ están dentro de la Comunidad de Madrid. Esto supone un 60 % del total de la Comunidad Autónoma. Las mayores áreas sin cubrir son el Real sitio del Pardo, al ser un área de acceso restringido, el Soto de Villuenlas y otras áreas de acceso restringido o de montaña, no practicable, de alta montaña o zonas urbanas.

Por otro lado, como se verá en la sección 7.1, las medidas ya tomadas pueden ser complementarias de las medidas de satélite realizadas con el satélite Suomi-NPP y su cámara VIIRS en la banda DNB o con la cámara Nikon D3s desde la ISS.

6.5.5. Repetibilidad

Los datos se han obtenido durante noches sin nubes y sin luna (primer cuarto, ultimo cuarto con la luna bajo el horizonte o en luna nueva). Solo se han tomado datos en noches de calidad excelente. Un cielo sin nubes es esencial, ya que las nubes reflejan la contaminación lumínica (Kyba et al. 2011), e incluso nubes o concentraciones de aerosoles imperceptibles al ojo humano pueden hacer que el brillo de cielo aumente dramáticamente (Sánchez de Miguel 2013).

El observatorio astronómico de la Universidad Complutense de Madrid (Observatorio UCM) opera una cámara de todo el cielo (AstMon-UCM) como monitor de astronómico de

Tabla 6.3: SQM usados en SQM-CAM

#	N serie	Tipo	Usuarios
1	0845	SQM-LE	Pila
2	1716	SQM-LU	Sánchez de Miguel
3	1738	SQM-LU	Domínguez, Zamorano
4	5712	SQM-L	Tapia
5	5855	SQM-L	Tapia
6	5884	SQM-L	Gómez-Castaño

calidad de cielo (Aceituno et al. 2011). Este dispositivo mide el brillo de cielo en las bandas fotometricas B, V y R de Johnson.

La respuesta espectral de los fotómetros SQM cubre las bandas Johnson B y V como hemos citado ya (Cinzano 2005). Podemos determinar el impacto de las nubes en el brillo de cielo urbano del observatorio situado en la parte exterior de la Ciudad de Madrid. La media de los valores de brillo de cielo desde agosto de 2010 a Julio de 2011 fue de 19.20 ± 0.12 y 17.90 ± 0.09 en las bandas B y V respectivamente, haciendo el promedio solo de las noches claras y sin nubes. El incremento de brillo en noches con nubes es de 2.15 ± 0.33 y 3.69 ± 0.68 , i.e 7.2 y 30 veces mayor respectivamente.

Obviamente, medir con cielos cubiertos (o parcialmente cubiertos) nos proporcionaría brillos mayores, pero de otra naturaleza y mucho más difíciles de tratar. Para ver cómo de importante es este efecto en zonas altamente polucionadas, el análisis del brillo del cielo en noche con nubes realizado con fotómetros SQM muestra un incrementos de $0.3 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ por cada 3 oktas²¹ de nubosidad, i.e. 2/8 partes del cielo cubiertas (Kyba et al. (2011)).

Los fotómetros SQM han sido calibrados de fábrica y el fabricante afirma que la precisión y las diferencias entre instrumentos (ver tabla 6.3) y de punto cero son del orden de $0.1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. Esto es suficiente para el propósito de esta investigación, donde otras fuentes de error o simple variación natural de las condiciones atmosféricas tienen más importancia que dicho error de cero. Aun así, se han realizado tests a doce unidades usadas en el proyecto NIX-NOX (Zamorano et al. 2011b).

Para estimar el error sistemático y los errores aleatorios acumulados durante las observaciones, hemos repetido varios viajes en diferentes fechas. Aunque podría haber habido alguna evolución general de la contaminación lumínica, las imágenes de satélite indican que el cambio

²¹En meteorología, un okta es una unidad de medida utilizada para describir la nubosidad. Las condiciones del cielo son estimadas en términos de cuantos octavos de cielo están cubiertos por las nubes, desde completamente claros (0 oktas) hasta cielos cubiertos (8 oktas).(Wikipedia)

no ha sido significativo y en la mayoría de lugares continúan igual cuatro años después.

6.5.6. Mapa de brillo de cielo

Para poder comparar con los modelos, se ha desarrollado un método basado en celdas de brillo de cielo constante como primera aproximación. Una vez filtrados los datos espúreos (fallos de la electrónica, paso por túneles, luz directa por farolas y otras fuentes) se espera que el brillo de cielo varíe de manera suave y monótona, sin escalones. Por otro lado, las pruebas de extrapolación realizadas para zonas no muestreadas no es un caso sencillo (Sánchez de Miguel et al. 2010; Espey & McCauley 2014). El uso de diferente tamaño de celda nos permite por un lado comprobar cuan ajustada es la extrapolación local comparando con la realidad y por otro establecer una malla natural de medida donde tratar de tomar medidas de manera uniforme y no sesgada, ya que la diferente velocidad en unas zonas que en otras podría afectar a promedio final.

Los resultados se han agrupado en celdas de tamaño 15, 30 y 60 arcsec que corresponden a 463, 926, 1853 metros en el ecuador, a la latitud de Madrid el ancho de la celda es menor, 298, 595 y 1190, pero el alto es el mismo. Se considera que el brillo de cielo que mediríamos en cualquier lugar de esas zonas no varía significativamente y se calcula como el valor medio (promediando en flujo) de las medidas filtradas pertenecientes a esa celda. En la figura 6.23 se muestra una zona de cuatro celdas antes y después de filtrar. En la figura 6.22 el mapa completo a la resolución de 60 arcsec.

En figura 6.23 Se observa como si no se excluyen los valores altos, se desvía notablemente el valor medio del valor más común de la celda. Estos valores se han eliminado por no tener sentido físico. Para realizar este filtrado se tenían en cuenta las notas que se realizaban durante las observaciones y las grabaciones²².

6.6. Resultados

- Se ha observado como el brillo de cielo en el Observatorio UCM y en otras estaciones varía con las estaciones y con la hora local. Además se ha medido un cambio en el color del cielo y del espectro del cielo de Madrid.
- Se ha encontrado que el brillo de cielo en Madrid (Observatorio UCM) presenta una variación temporal típica a lo largo de la noche que es medible en las imágenes ISS/D3S. Se ha certificado la gran dependencia a del brillo de cielo con la hora, variando en Madrid hasta $1 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ entre el principio de la noche y el final.

²²Ejemplo de grabación <http://youtu.be/zesdAUPNuBY>

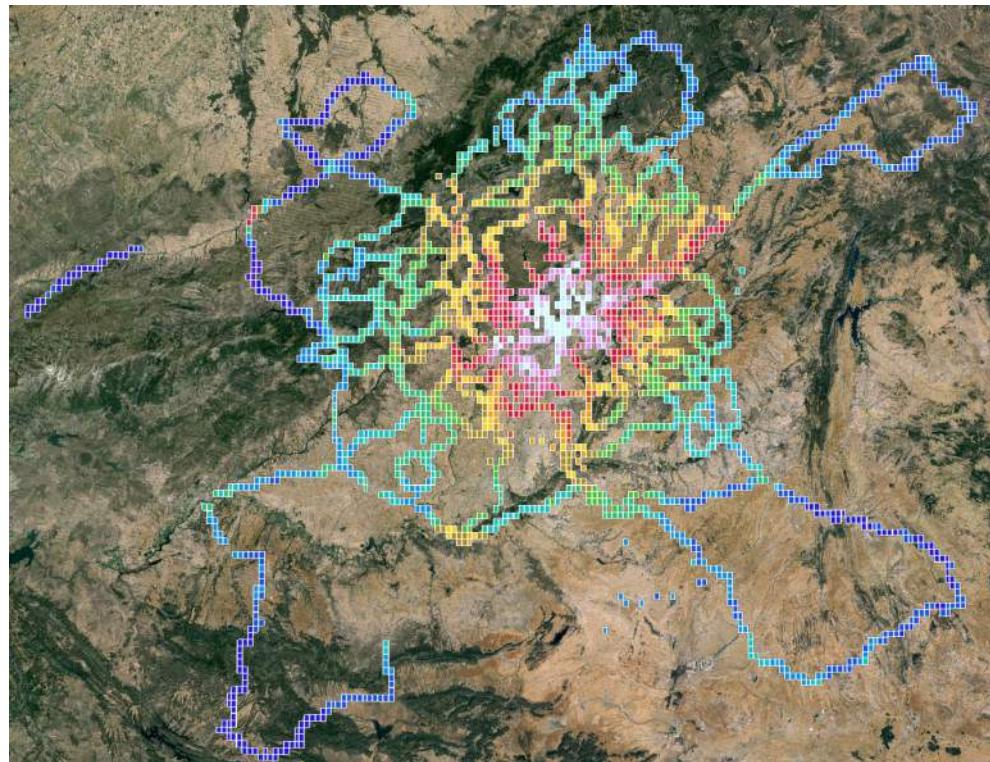


Figura 6.22: Mapa de brillo de cielo en la Comunidad de Madrid y regiones limítrofes, en celdas de 60 arcsec.

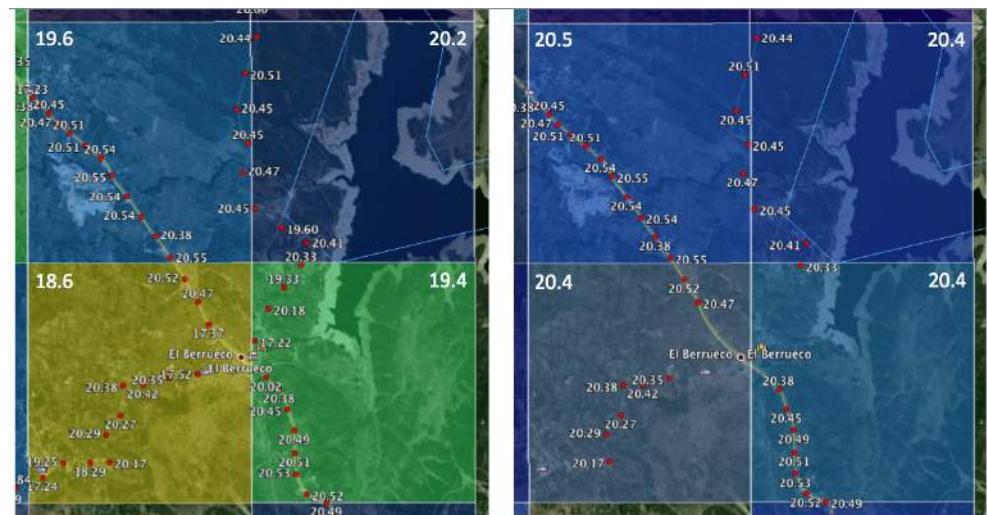


Figura 6.23: La misma región del mapa filtrada y sin filtrar. Se aprecia el efecto sobre la media de la celda si no se eliminan los valores atípicos.

- Esta evolución concuerda con la evolución en la iluminación ornamental y actividad de tráfico que se aprecia desde tierra y aparece con la misma forma que la variación nocturna del gasto eléctrico general de España.
- Existen fuentes de contaminación lumínica que no son trazables mediante las imágenes de satélite (automóviles, ventanas o escaparates y otras luces de los comercios) que sí tiene su reflejo en el gasto eléctrico o en la fotometría directa en las calles.
- Los análisis espectro-espacio-temporales indican que el brillo de cielo nocturno varía en intensidad y espectro de acuerdo a las variaciones temporales de las fuentes contaminantes, pero dependen además en gran medida de las condiciones de la atmósfera.
- Hemos establecido la relación causal entre el contenido de aerosoles de la atmósfera y el aumento del brillo de cielo. Para el caso de Madrid el cielo se oscurece 0.4 magnitudes en días en que el contenido en aerosoles es reducido (profundidad óptica²³ 0.02 frente a una profundidad óptica típica de 0.09 en 500 nm).
- Aunque la variación nocturna del brillo de cielo está menos influenciada por la contaminación lumínica según nos alejamos de los grandes núcleos de población, sus efectos se aprecian a cientos de km de distancia.
- Se ha realizado un mapa del brillo de cielo nocturno en la zona central de la península Ibérica a partir de miles de observaciones desde un automóvil usando una técnica desarrollada ex profeso.
- Se han comparado el brillo de cielo medido desde tierra con las radiancias medidas desde el espacio encontrando una relación entre el brillo de cielo entorno a la Comunidad de Madrid y alrededores que nos permitirá crear mapas de brillo de cielo basados en las observaciones directas de satélite, ahorrando una gran cantidad de tiempo y recursos.
- El estudio directo de las fuentes de contaminación lumínica desde satélite es 14 veces más sensible que la medida del brillo de cielo aunque la instrumentación de observación debe ser mejorada. Entiéndase como más sensible al ratio de las variaciones detectables en las fuentes, frente a la variaciones detectables en el brillo de cielo.
- El análisis de las relaciones permiten demostrar que la luz difusa que detectan los satélites desde el espacio coincide con la radiación provocada por la contaminación lumínica que es observada desde tierra.

²³Optical Thickness

Tabla 6.4: Log book SQM-CAM

year	date	serial	name	year	date	serial	name
2010	04-04	845	Pila	2013	01-06	5884	Gómez
	04-05	845	Pila		01-14	5855	Tapia
	04-07	845	Pila		02-05	1736	Sánchez de Miguel
	04-09	845	Pila		02-14	1738	Zamorano
	05-05	845	Pila		02-15	1716	Sánchez de Miguel
	05-16	845	Pila		04-01	1738	Zamorano
	05-17	845	Pila		05-13	1716	Sánchez de Miguel
	05-18	845	Pila		06-03	1716	Sánchez de Miguel
	06-14	1716	Sánchez de Miguel		06-14	1716	Sánchez de Miguel
	06-29	5690	Tapia		06-29	5690	Tapia
2011	01-21	5884	Gómez	2014	01-25	1716	Sánchez de Miguel
	01-24	5884	Gómez		01-25	1738	Zamorano
	01-25	5884	Gómez		02-02	1716	Sánchez de Miguel
	02-01	5884	Gómez		02-02	1716	Sánchez de Miguel
	02-03	5884	Gómez		06-29	1716	Sánchez de Miguel
	02-05	5884	Gómez		07-18	1738	Zamorano
	02-27	5884	Gómez		07-26	1738	Zamorano
	04-01	5884	Gómez		07-26	1738	Zamorano
	04-01	1738	Domínguez		11-06	1738	Zamorano
	04-02	1738	Domínguez		11-28	1738	Zamorano
2012	04-08	1738	Domínguez		12-19	1738	Zamorano
	05-07	1738	Domínguez		12-20	1716	Sánchez de Miguel
	07-07	1738	Domínguez		12-22	1738	Zamorano
	07-30	1738	Domínguez		11-26	1716	Sánchez de Miguel
	11-28	1738	Zamorano		11-27	1716	Sánchez de Miguel
	12-19	1738	Zamorano		11-28	1716	Sánchez de Miguel
	12-20	1716	Sánchez de Miguel		02-18	1738	Zamorano
	12-22	1738	Zamorano		02-20	1716	Sánchez de Miguel
	11-26	1716	Sánchez de Miguel		02-23	1716	Sánchez de Miguel
	11-27	1716	Sánchez de Miguel		02-24	1738	Zamorano
	11-28	1716	Sánchez de Miguel		02-27	1716	Sánchez de Miguel
	02-18	1738	Zamorano				
	02-20	1716	Sánchez de Miguel				
	02-23	1716	Sánchez de Miguel				
	02-24	1738	Zamorano				
	02-27	1716	Sánchez de Miguel				

Capítulo 7

Relación entre el brillo de cielo y la radiancia medida en las imágenes de satélite

7.1. Relación entre la emisión difusa en imágenes de DMSP, VIIRS y ISS con el brillo de cielo en la Comunidad de Madrid

La existencia de una relación entre el brillo del cielo nocturno y la radiancia medida en las imágenes de satélite surgió con los modelos de emisión de Falchi & Cinzano (1998) que fue generalizada más tarde por Cinzano et al. (2001a). Cinzano y Falchi crearon un mapa del brillo de cielo basado en estos modelos y a las medidas de que disponían en la región de Italia y no se realizó un análisis crítico de la calidad del mapa hasta casi diez años después. Kyba et al. (2013) mostraron cómo el mapa era correcto excepto para los centros de las ciudades en que se sobreestimaba ligeramente el brillo de cielo. Sin embargo en ese trabajo también se indicaba que las propias imágenes del DMSP tenían una gran correlación con las medidas de SQM a pesar de ser medidas directas de las fuentes de contaminación. Este resultado también fue detectado por nuestro grupo de manera independiente de Kyba et al. (2013) y presentado en Zamorano et al. (2013c). La explicación que Kyba et al. (2013) da a este hecho es que, si bien la resolución de las imágenes del DMSP es de 5×5 km, se realiza un suavizado resultante del promedio de los diferentes pasos, ya que cada pixel no cae en cada pasada sobre la misma posición. De esta manera se realiza una mejora de la resolución mediante la técnica de superresolución de *Oversampling*¹. Todos estos factores (incluyendo la natural PSF de la óptica del DSMP/OLS)

¹El algoritmo exacto no está descrito en ningún artículo

contribuyen a la buena correlación encontrada entre el brillo de cielo y los datos de satélite Kyba et al. (2013).

Nuestro grupo especula en Zamorano et al. (2013c), Sánchez de Miguel et al. (2014c) y Zamorano et al. (2013a) sobre la posibilidad de que la luz difusa presente en las imágenes del DMSP fuera en realidad no sólo resultado de la PSF del instrumento, sino directamente la luz difundida en la atmósfera. La naturaleza de la emisión difusa ha sido discutida brevemente en otros trabajos como Elvidge et al. (1999) o Townsend & Bruce (2010). Sin embargo, debido a la amplia PSF y desenfoque del DMSP, es muy difícil separar la contribución de la difusión atmosférica de los efectos instrumentales.

Sin embargo, para las imágenes del VIIRS/DNB la resolución es mucho mayor (la resolución de VIIRS/DNB es de 750 m, frente a los 5 km del DSMP/OLS) y el FWHM de la PSF parece ser cercana a la resolución del instrumento como se ha discutido en la sección 2.3. Esto nos indica que la emisión que observamos en regiones no iluminadas, como el parque natural del Real sitio del Pardo de Madrid en las imágenes de VIIRS/DNB es realmente luz difusa proveniente de la contaminación lumínica circundante en su mayoría. Como se ha citado en la sección 2.3, la cámara VIIRS es tan sensible que detecta emisión en toda la tierra, llegando a detectar la señal del airglow y otras fuentes de luz difusa aún por estudiar. Nuestras observaciones indican que existe una relación extremadamente fuerte entre el brillo de cielo promedio en un lugar y su emisión difusa en VIIRS/DNB, como se desprende de la figura 7.2.

La explicación más plausible para esta fuerte correlación es que la principal contribución a la emisión difusa cerca de las ciudades es la contaminación lumínica, y por tanto, la emisión difusa que observa VIIRS desde el espacio tiene la misma amplitud y distribución espacial que la observada desde el suelo con fotómetros SQM. Dado que las bandas de medida son muy diferentes de un instrumento al otro, esperamos que esta relación no se mantenga constante en toda la Tierra y varíe con el espectro de las fuentes. Pero si el espectro de cielo está dominado por un tipo de lámpara en áreas relativamente grandes (200 km), esta relación se mantiene en todo ese área. Esta relación permitirá en un futuro realizar mapas de brillo de cielo basados en imágenes de satélite, si bien, los datos de VIIRS aun no disponen de calidad suficiente como para hacer mapas globales de brillo de cielo. Muestra de ello son los valores anómalos que presenta la imagen de Madrid enero de 2013 o la región de Coruña en las imágenes de mayo de 2014. Sin embargo, VIIRS si es fiable en la parte de fuentes de contaminación luminica y por ello esta siendo utilizado para producir modelos² que podrán ser verificados con estas medidas.

Además se detecta una posible relación entre los lugares más oscuros en VIIRS con el albedo de la región (el albedo típico de un bosque es inferior a 0.17, superior a 0.17 de los campos

²Falchi 2015, comunicación privada.

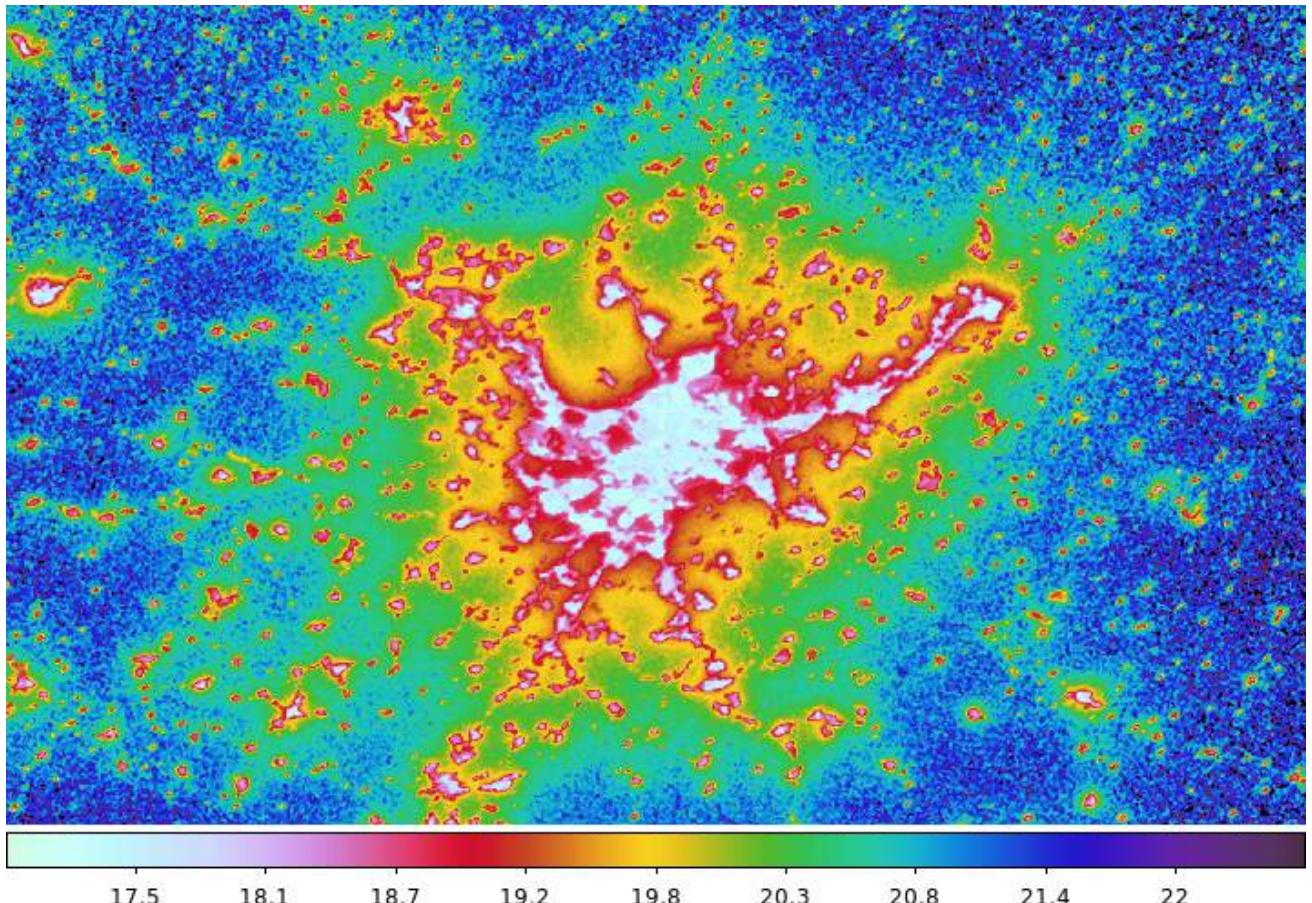


Figura 7.1: Mapa de brillo de cielo de la zona centro de la península ibérica usando la imagen HDR ISS040E0812-58+62

(Csiszar & Gutman 1999)). Este resultado no sorprende ya que toda la emisión atmosférica³ se puede ser reflejada por el mismo, si bien su contribución no es apreciable por encima de valores de $0.20 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$. Este valor puede ser un primer umbral para determinar si una zona de bajo albedo está contaminada lumínicamente o no. Por ejemplo, la Abufera de Valencia, que presenta radiancias de $1.7 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, o el Real sitio del Pardo, con $1.9 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, frente a los $0.17 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ que presentan otros lugares de similar albedo como el Parque natural de Chera-Sot de Chera, en Valencia o los $0.14 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ del Parque natural de Cabañeros, ambos relativamente cercanos a grandes focos de contaminación como Valencia y Madrid respectivamente.

En las figuras 7.2 y 7.3, pero especialmente en la figura 7.4 se observa cómo el distinto tamaño de las celdas afectan a la calidad de la correlación y a su dispersión. Especialmente se ve como aparece una cola a la derecha de la relación principal que indica la presencia de datos de SQM en lugares que el brillo en la imagen es significativamente mayor del esperado. La cantidad

³Entiéndase como las líneas aurorales, brillo de las estrellas, airglow, etc.

de estos puntos es mayor cuanto más grande es la celda. Se ha comprobado que esos valores corresponden a medidas muy cercanas a municipios, por lo que al aumentar el tamaño de las celdas, estas se ven contaminadas por zonas iluminadas. En cambio, la resolución con la que se toma las medidas de SQM es de decenas de metros (dependiendo de la velocidad del coche en el tramo). Se observa que además, los municipios son menos brillantes en brillo superficial cuanto más nos alejamos de la ciudad⁴, por lo que contribuye a que exista una relación espúrea entre el brillo de cielo y la intensidad en las imágenes de satélite. Este hecho explica la gran dispersión encontrada con el satélite DMSP/OLS por Kyba et al. (2013) y Zamorano et al. (2013c).

7.2. Análisis espectro-espacio-temporal de la emisión nocturna en rango visible de Madrid

A lo largo de los seis capítulos anteriores hemos analizado por separado la evolución de la contaminación lumínica de Madrid, que es nuestro caso de estudio. Sin embargo, solo hay una ciudad y una región de Madrid, por muchas maneras diferentes de mirarla que existan.

Evolución histórica La evolución de la contaminación lumínica en Madrid, desde una perspectiva histórica, puede entenderse fácilmente con el gráfico 2.4, en el que se aprecia cómo tras más de 15 años de lento crecimiento, en el año 1992 el gasto en alumbrado del Ayuntamiento de Madrid se duplica en 15 años. Este crecimiento, se puede explicar por el aumento de número de puntos de luz, de los 126.000 puntos de 1982 a los más de 225.000 de la actualidad.

Sin embargo, el crecimiento en la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) es incluso más acelerado, duplicándose en tan solo 10 años. Si bien no tenemos imágenes de satélite anteriores al año 1992, las estadísticas nos indican que la cantidad de energía inyectada en la atmósfera era la mitad de la actual a mediados de los noventa, y a su vez la mitad de esta en los años 70. Así, un observatorio urbano como el de la UCM, cuya fuente de contaminación principal es la difusión directa de la luz que en la primera parte de la noche mide en la actualidad un brillo de cielo de $SQM=17.8\ mag/arcsec^2$, habría tenido en el año 95 un brillo de $18.5\ mag/arcsec^2$ y en los años 70 un brillo de aproximadamente $19.5\ mag/arcsec^2$.

Con los datos de que disponemos en la actualidad no podemos ir más allá, si bien en un futuro se podría reconstruir el aspecto de Madrid y su entorno usando la información geográfica (Zollweg et al. 2012) y uniendo esta información con las estadísticas energéticas y los modelos de contaminación lumínica. Aún, y en ese caso, hay factores que serán difíciles de cuantificar, ya que cambios legislativos, como la Ordenanza Municipal del Alumbrado Exterior, y el comienzo

⁴Esto puede ser debido a una menor iluminación real o otros efectos no tenidos en cuenta.

de los apagados de los monumentos a raíz de las acciones de los activistas de Celfosc, el Grupo para la Protección del Cielo y el Grupo de cielo oscuro de la AAM, han supuesto desde finales de los 90 un freno para el aumento del gasto en iluminación. Este efecto sin embargo ha sido menor en la CAM que en la capital, dado que la capital no puede crecer.

Mientras la llamada “burbuja inmobiliaria” produjo un desarrollo de alumbrado enorme entre los años 2000 a 2007, a partir de 2007 se produce un estancamiento debido a la crisis económica, el cambio de tarifas y el decreto de eficiencia en el alumbrado exterior de 2009. Desde 2012 hasta el verano de 2014 no ha habido cambios significativos. Sin embargo, a partir de ese fecha se ha detectado la instalación masiva de LEDs en algunas zonas de la capital y la totalidad del municipio próximo de Rivas-Vaciamadrid. De acuerdo con Luginbuhl et al. (2014), incluso para LEDs de temperatura de color tan baja como 2400 K o FLED (*Filtered LED*), el brillo de cielo con visión escotópica en el zenit podría aumentar entre un 48 % y un 80 %. Por ello es fundamental que este cambio venga no sólo con una menor emisión de flujo hemisférico superior equivalente, sino también con una reducción de potencia. Como hemos visto en la sección 3.6.2, en el caso de la instalación de LED en Rivas-Vaciamadrid no se ha traducido en una disminución del flujo emitido, por lo que la instalación de los LED supone hasta el momento, un aumento neto de la contaminación lumínica.

La esperanza reside en la propiedad de los sistemas LED de permitir la regulación de la intensidad a voluntad por lo que, por fortuna, esto no es irreversible y como se muestra en la sección 3.6.3, podrían equiparse los niveles de iluminación a los de Berlín, disminuyéndose por 3 su intensidad y manteniendo el tipo de lámpara. Esta solución, minimizaría el coste de la reposición de luminarias ya instaladas y disminuiría su impacto, aunque parte del impacto en algunas especies naturales puede que no sea posible de compensar.

Variación horaria del espectro de la emisión de Madrid. En la sección 3.6.2 se mostró cómo cambiaba la cantidad de luz emitida usando las imágenes de la ISS/D3S en las que se aprecia de manera directa que la cantidad de fuentes de emisión de tipo halogenuros iba decreciendo. Usando los fotómetros SQM observamos cómo el cambio de brillo de cielo desde el observatorio UCM (sección 6.4) y su evolución encajaba con la que se observa desde satélite, pero teniendo en cuenta además la influencia de la actividad humana. También veíamos en la sección 6.2.2 que, además de una relación con el tiempo en intensidad, se producía un cambio de color en el cielo. En la sección 6.2.3 podíamos comprobar cómo ese cambio de intensidad no sólo tenía reflejo en la intensidad, sino en un cambio en el espectro.

Estas cuatro estrategias nos dan resultados coherentes desde un punto de vista cualitativo. AstMon-UCM observa un enrojecimiento del cielo, que es precisamente lo que produciría el apagado de las lámparas azules que observamos que se apagan desde la ISS, y es exactamente

lo que observamos con SAND. Trasladar estas relaciones a un plano cuantitativo precisa de la aplicación de un modelo de emisión y de difusión en la atmósfera que es el tema de la colaboración en marcha con el prof. Martin Aubé para la zona central de la península ibérica.

Estos modelos son necesarios para ponderar el efecto de la dependencia con la distancia a las fuentes. Aun así, podemos llegar a algunas conclusiones importantes sin llegar a ese nivel de detalle. El alumbrado ornamental supone al menos el 45 % de la contaminación lumínica producida en invierno que detectamos desde satélite en el centro de Madrid. Llegamos a esta conclusión, porque son las líneas de emisión de tipo halogenuros metálicos las que más decrecen y en las imágenes de satélite son las que producen mayor variación. Sin embargo es evidente que, bien producido por la saturación de este tipo de fuentes tan intensas o bien por que estas fuentes no son detectables desde satélite (ventanas, coches, comercios), existe una parte de la evolución de brillo de cielo que no se puede explicar por ese método. Como trabajo futuro de comprobación se podrían realizar exposiciones consecutivas (*time lapses*) desde lugares apartados de Madrid. Los primeros tests realizados muestran resultados prometedores.

Un resultado muy importante de nuestra investigación ha sido destacar la importancia que el contenido de aerosoles de nuestra atmósfera tiene en el aumento del brillo de cielo. Hemos comprobado tanto en la evolución de brillo de cielo usando AstMon-UCM, los fotómetros SQM y las imágenes de la ISS/D3s que existe una diferencia significativa y que podemos medir entre el brillo de cielo en noches con bajo contenido en aerosoles y aquellas en las que el contenido es elevado. Sin embargo, en la sección anterior se mostró que no hemos sido capaces de detectar una variación significativa en la distribución espacial del brillo de cielo con la cantidad de aerosoles y solo una variación en intensidad. Por otro lado, el efecto de la cobertura nubosa es muy diferente, tanto en reflectancia, como en la distribución en comparación con los momentos de cielos claros, produciéndose una difusión a menor escala de distancia (So 2014; Kyba et al. 2015). Este es un asunto de suma importancia, ya que se han encontrado indicios claros de que el contenido en contaminantes atmosféricos está relacionado con el brillo de cielo (Pun & So 2012) y que la iluminación nocturna podría incrementar el contenido de contaminantes (Stark et al. 2011). Madrid es uno de los lugares ideales para comprobar este efecto por su gran intensidad y por la gran cantidad de estaciones de medida disponibles, pero es estudio de este punto está fuera del alcance de esta tesis y queda pendiente para estudios futuros.

Tal vez el principal resultado a la vista de las evidencias observacionales es que la medida del brillo de cielo en un determinado momento no sirve para caracterizar el brillo de cielo del lugar. Se necesita una serie larga de observaciones a lo largo del tiempo en diferentes condiciones atmosféricas (nubes, transparencia, contenido de aerosoles, etc), horas de la noche y estaciones para caracterizar de forma precisa el brillo nocturno del cielo de un sitio de manera estadística. Las medidas deben tomarse siempre al menos a dos horas diferentes, una al principio de la

noche y otra pasadas las de 1:00 horas de la madrugada, en los lugares cercanos a los grandes focos de contaminación lumínica como núcleos urbanos.

Variación espacial de la Contaminación lumínica en Madrid y región de influencia. En la sección anterior (7.1) se describe cómo la emisión difusa detectada con VIIRS/DNB y la cámara ISS/D3S tiene idéntica distribución que el brillo de cielo detectado desde tierra en la exploración realizada con fotómetros SQM. Esto implica que la contaminación lumínica en el zenit decrece con la distancia a las fuentes, como predicen los modelos, y que para el caso de Madrid es posible detectar su efecto a más de 70 km de distancia. Sin embargo, la amplitud de la variación cambia con la misma, siendo menos acusada conforme nos alejamos. La aplicación de los modelos nos permitirá estimar este punto correctamente, pero lo que se observa en las estaciones SQM fijas indica que la contribución de la almendra central con sus potentes focos variables, es mucho menos importante que la corona metropolitana y el alumbrado público fijo.

Este resultado tiene una gran importancia ya que, si bien para recuperar el derecho a la observación astronómica de los ciudadanos de la capital es más importante limitar y controlar el alumbrado ornamental (ya regulado por el Ordenanza Municipal de Alumbrado Exterior), para el medio ambiente y la preservación del cielo oscuro de las zonas rurales es mucho más importante controlar el alumbrado público (sin regulación a nivel regional). Desde el punto de vista puramente observational, implica que las medidas de brillo de cielo en las cercanías de la capital o dentro de la misma deben ser realizadas a lo largo de la noche, pero las medidas en zonas alejadas pueden ser representativas del brillo de cielo del lugar, siempre y cuando el contenido en aerosoles sea un valor típico del lugar.

7.3. Resultados

- Se han comparado el brillo de cielo medido desde tierra con las radiancias medidas desde el espacio, encontrado una relación entre el brillo de cielo entorno a la Comunidad de Madrid y alrededores que nos permitirá crear mapas de brillo de cielo basados el observaciones directas de satélite, ahorrando una gran cantidad de tiempo y recursos.
- El estudio directo de las fuentes de contaminación lumínica desde satélite es 14 veces más sensible que la medida del brillo de cielo, aunque la instrumentación de observación debe ser mejorada. Entiendase como más sensible alratio de las variaciones detectables en las fuentes, frente a la variaciones detectables en el brillo de cielo.⁵
- El análisis de las relaciones permiten demostrar que la luz difusa que detectan los satélites

⁵Más detalles en el Anexo

desde el espacio coincide en su distribución espacial con la radiación dispersada simétricamente que provoca aumento antropogénico del brillo de cielo observado desde tierra.

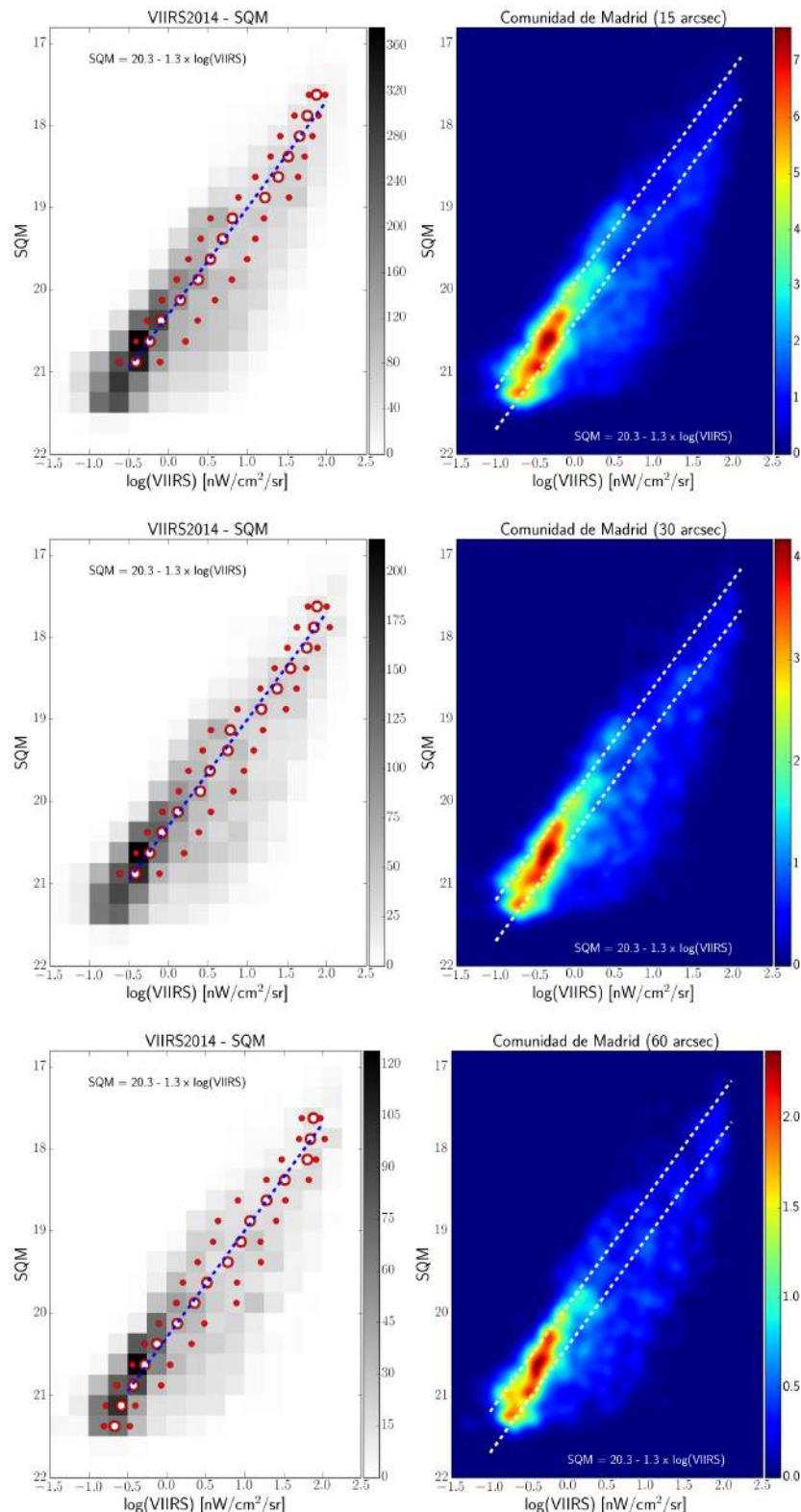


Figura 7.2: Comparación SQM VIIRS utilizando diversos remuestreados. Puntos rojos vacíos indican la media del bin y los sólidos los cuartiles.

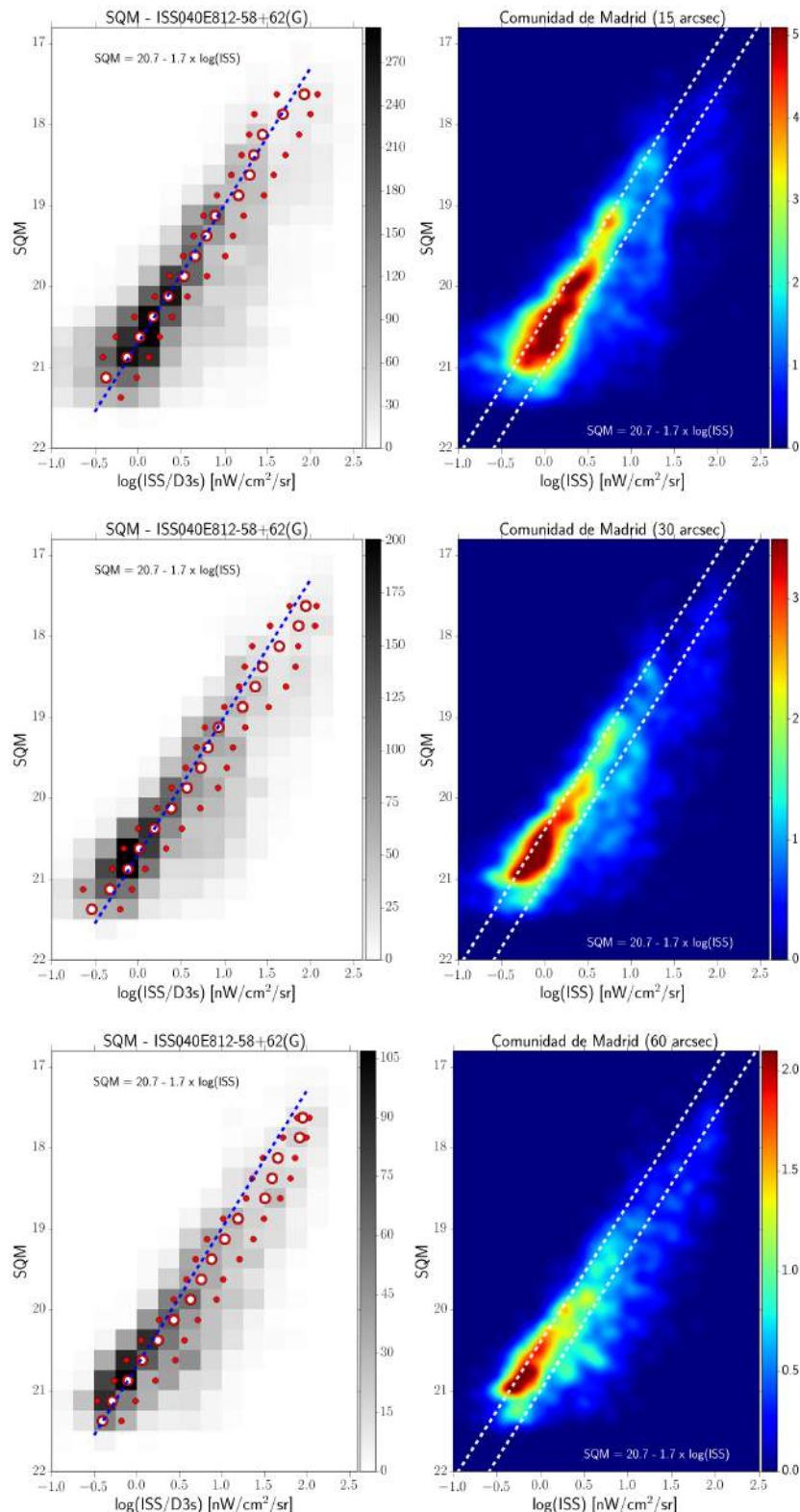


Figura 7.3: Comparación SQM ISS040E0812-58+62 utilizando diversos remeasuredos. Puntos rojos vacíos indican la media del bin y los sólidos los cuartiles.

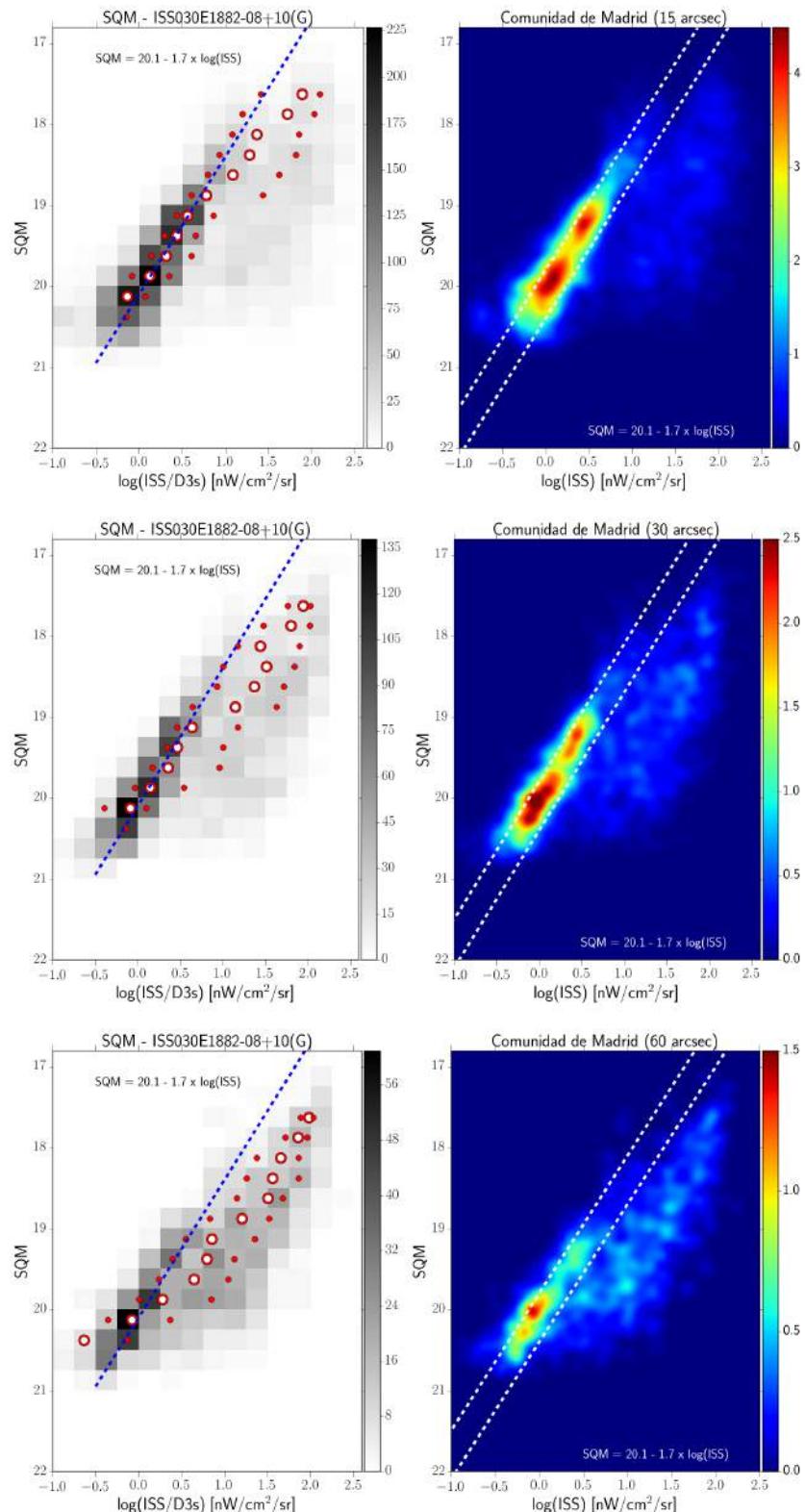


Figura 7.4: Comparación SQM ISS030E1882-08+10 utilizando diversos remuestreados. Puntos rojos vacíos indican la media del bin y los sólidos los cuartiles.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo futuro

Se han presentado en esta memoria los resultados de un estudio sobre la caracterización de la contaminación lumínica mediante observaciones desde el espacio y desde tierra. Los métodos desarrollados permiten monitorizar la contaminación lumínica y seguir su evolución. El control de la contaminación lumínica ayudará a preservar el cielo oscuro para disfrute de las generaciones futuras. Se resumen a continuación los principales resultados desglosados en bloques.

1. Radiancias mediante imágenes de satélites

Se han explorado las características y capacidades de las cámaras embarcadas en los satélites DMSP/OLS y SNPP/VIIRS/DNB que exploran la emisión nocturna de la Tierra. Se han desarrollado las herramientas para la calibración de radiancias medidas en imágenes de satélite que permiten estudiar la evolución temporal de la contaminación lumínica.

- No existen diferencias significativas entre los satélites VIIRS/DNB y DMSP/OLS para los espectros de diferentes tipos de lámparas a pesar sus diferentes respuestas espectrales.
- Los productos disponibles actualmente de la cámara VIIRS/DNB no pueden ser utilizados ciegamente y es necesaria una revisión previa.
- Es posible determinar cambios en el alumbrado público a diferentes escalas usando diferentes satélites.
- El consumo en alumbrado público en España ha crecido de manera constante entre 1992 y 2006. Podría haberse estancado en los últimos 7 años.
- Los datos oficiales entre 1992 y 2006 no son fiables para la mayoría de provincias, con excepciones. Los datos de 2007 son fiables, salvo para 5 provincias.
- Los países que han recibido rescates económicos, atendiendo la prima de riesgo más alta, o que han tenido crecimientos altamente acelerados en los últimos años,

coinciden con aquellos que tienen mayor consumo por habitante en iluminación. Esto sugiere que puede haber una conexión entre la eficiencia y control sobre el gasto público y la iluminación pública. Este extremo debe ser analizado con cautela en futuros estudios. Sin embargo, los datos no apoyan que en el caso de España se deba a una cuestión cultural, ya que en 1992 no existía un exceso de potencia con respecto a otros países europeos y las cuestiones culturales se entiende que tardan varias generaciones en cambiar.

2. Contaminación lumínica con imágenes desde la ISS

Se ha introducido una nueva fuente de datos de radiancias para estudios de contaminación lumínica al demostrar que las fotografías nocturnas de la Tierra obtenidas por los astronautas abordo de la Estación Espacial Internacional (ISS/D3S) pueden ser calibradas.

- Es posible calibrar de manera absoluta las imágenes ISS/D3S mediante fotometría con estrellas y con fuentes en tierra.
- Es viable medir radiancias usando imágenes ISS/D3S.
- Se ha demostrado viable la posibilidad de distinguir diferentes tipos de tecnologías de iluminación mediante diagramas color-color usando los canales R, G y B de las cámaras.
- Los datos de la ISS es la única tecnología capaz de trazar cambios globales en tipo de alumbrado, de gran importancia en la transición al alumbrado LED.
- Madrid es la capital más contaminante¹ de las estudiadas, y probablemente de la Unión Europea.
- Existen grandes diferencias entre los niveles de iluminación en la diferentes capitales estudiadas, también en tecnologías de iluminación.
- Aparentemente cuanto más moderna es la tecnología de iluminación utilizada, mayor es el nivel de iluminación, si bien también es posible que haya una conexión con el color de la misma.
- Los ciudadanos pueden contribuir significativamente a la clasificación, catalogación y georreferenciación de las imágenes ISS/D3S del repositorio de la NASA.
- Las imágenes de mayor resolución son más sencillas de clasificar para los ciudadanos.
- Será posible crear un mapa global de la Tierra de noche en color gracias a la colaboración ciudadana.

¹Mayor cantidad de emisión luminosa por metro cuadrado.

3. Cámaras multiespectrales e hiperespectrales

Se ha realizado un estudio comparativo de las óptimas técnicas de teledetección nocturna para la medida de las fuentes de contaminación lumínica.

- Ninguna técnica es capaz de realizar un estudio completo del problema, siendo complementarias entre sí.
- Las imágenes de satélite actuales monitorizan regularmente todo el planeta pero proporcionan datos pancromáticos. Son ideales para estudios de evolución temporal y se dispone de series largas de datos.
- Las imágenes ISS/D3S mejoran la resolución espacial de los satélites y proporcionan datos en tres bandas espectrales. Por contra, las imágenes no se obtienen de manera organizada y no presentan cobertura global.
- Las cámaras multiespectrales embarcadas en aviones tienen la ventaja de la mayor resolución espacial y espectral, pero presentan baja sensibilidad y su estudio está limitado a zonas poco extensas.
- Otras técnicas de bajo coste como las cámaras embarcadas en drones y en globos pueden ser una alternativa de bajo coste para estudios detallados de zonas concretas.

4. Brillo de cielo nocturno

Se ha realizado un estudio del brillo de cielo nocturno en Madrid y su región. Para ello se han instalado estaciones de monitorización temporal en zonas con diferente grado de contaminación lumínica y se han obtenido medidas por toda la Comunidad de Madrid y sus zonas circundantes. Los resultados obtenidos no limitan su validez a esta zona de estudio sino que son exportables a otros lugares y constituyen una base de datos fundamental para la aplicación de los modelos de difusión atmosférica de luz emitida por los focos de contaminación lumínica.

- El brillo de cielo varía de la misma manera que sus fuentes, en el caso de grandes ciudades como Madrid, haciéndolo incluso en escala de horas. Esta variación es en intensidad y en espectro.
- La evolución puede ser trazada mediante imágenes de la ISS. La mayor contribución a la variación proviene del alumbrado ornamental.
- Sin embargo, no es posible reproducir de manera completa el cambio del brillo de cielo solo con los datos de satélite y es necesario acudir a la evolución de la actividad humana para realizar un diagnóstico completo.

- Existen fuentes de contaminación lumínica que no son trazables mediante las imágenes de satélite (automóviles, ventanas o escaparates y otras luces de los comercios) que sí tienen su reflejo en el gasto eléctrico o en la fotometría directa en las calles.
- Los análisis espectro-espacio-temporales indican que el brillo de cielo nocturno varía en intensidad y espectro de acuerdo a las variaciones temporales de las fuentes contaminantes, pero dependen además en gran medida de las condiciones de la atmósfera.
- Es posible determinar la afectación del brillo de cielo por variaciones importantes en el contenido en aerosoles.
- Aunque la variación nocturna del brillo de cielo está menos influenciada por la contaminación lumínica según nos alejamos de los grandes núcleos de población, sus efectos se aprecian a cientos de kilómetros de distancia.
- Es posible realizar mapas de brillo de cielo mediante la toma de datos de manera automática.
- Existe una relación directa entre el brillo de cielo y la emisión difusa que se aprecia en las imágenes de satélite, descartando la posibilidad de que esta emisión difusa en la ISS/D3S y VIIRS/DNB se deba a efectos instrumentales. Creemos que el brillo de cielo y la emisión difusa son exactamente el mismo fenómeno visto desde puntos de vista diferentes.
- El estudio directo de las fuentes de contaminación lumínica desde satélite es 14 veces más sensible que la medida del brillo de cielo, aunque la instrumentación de observación debe ser mejorada.

5. Conclusiones finales y trabajo futuro

Se ha realizado un estudio ambicioso de la contaminación lumínica mediante técnicas diversas, algunas de las cuales se han desarrollado y otras son novedosas. La combinación de observaciones de radiancias con imágenes desde el espacio y de mapas de brillo de cielo desde tierra ha permitido encontrar relaciones entre ambos conjuntos de datos. Las variaciones espectrales, temporales y espaciales del brillo del cielo nocturno constituyen el ingrediente fundamental para testar los modelos de difusión de la contaminación lumínica por la atmósfera, los cuales cuentan con los resultados de esta tesis como el mayor y mejor conjunto de datos disponible en la actualidad.

Se abren varias líneas de investigación que a partir de ahora pueden ser abordadas con la batería de nuevas herramientas presentadas. Otras surgen a la luz de las conclusiones y sólo han podido ser exploradas en este trabajo. Podemos citar la comprobación de los

modelos de contaminación lumínica, el control de las fuentes contaminantes, su variación espectral y estacional, la influencia del contenido de aerosoles en la atmósfera, la medida remota de su impacto medioambiental, el desarrollo de técnicas menos costosas de medida de radiancias, el impacto en la salud humana o la intensidad de inhibición de limpieza de radicales libres de NO_2 .

Agradecimientos

Desde que tenía 6 años siempre quise ser astrónomo, cuando dejé el catalejo de pirata por el telescopio. Quiero dedicar esta tesis a mis maestros en las “escuelas” y en la vida, que han hecho esto posible. En primer lugar a mis padres, que no solo han sido inspiración sino que además han financiado gran parte de esta investigación de una manera u otra. A mis directores de tesis, Jaime y Jesús, que han sido mucho más que unos meros directores o padres científicos, sino que han creído en mi y en mis investigaciones en ocasiones más que yo mismo y son además grandes amigos. Jaime especialmente tomó las riendas de la investigación en contaminación lumínica mientras yo me dedicaba a las galaxias y sin quien jamás podría haber salido adelante esta tesis. Y un agradecimiento especial a los profesores que me animaron desde pequeño hasta ahora, a continuar mi camino hacia las estrellas, a pesar de mis dificultades. Mercedes, Don Paco, J.M. Navao, Ángeles Cano, Guillermina, Montserrat Ortiz, Gema Piquero, Gabriel Álvarez y Enrique Maciá, ellos además de muchos otros, son los que me motivaron a continuar y disfrutar con el estudio, que es lo que más necesita un estudiante.

Esta tesis además no ha sido un trabajo en solitario, hay colaboración de muchas personas, desde la más directa de mis directores de tesis, Jaime Zamorano y Jesús Gallego que han supervisado y participado en todas las fases con mayor o menor intensidad, desde la toma de datos de campo hasta las interesantes discusiones científicas sobre el futuro de la investigación en Contaminación lumínica.

Después de Jesús y Jaime, quienes más ha ayudado sin lugar a dudas han sido el Prof. Nicolas Cardiel y Sergio Pascual, de los que puedo decir que si alguna vez supe algo de informática, lo olvidé para aprender la nueva fe verdadera del Python, el R y el RED^{UC}E. Siempre han estado ahí con una sonrisa para solucionar los problemas de moral, técnicos o de cualquier tipo que se me presentaron en esta tesis o en cualquiera de mis trabajos.

Otros compañeros han sido también fundamentales en la elaboración de esta tesis, Jaime Izquierdo, Carlos Tapia-Ayuga, Francisco Ocaña y Miguel Nievas han compartido conmigo muchas sesiones de observación, toma de datos y discusión científica que va mucho más allá de lo que se espera de un compañero o casi diría de un amigo. Junto con Raúl Cacho, Cristina Catalán, Lucía Rodríguez, con quienes he compartido también miles de horas de discusión y

exploración del universo forman lo que para mi siempre será una segunda familia y puedo decir que más que compañeros son hermanos científicos.

En esta gran familia también están Raffaela Marino, Alexandre Bouquin, Nestor Espino, Belen Pampliega, Carlos Guijarro, Victor Villar, Esther Marmol, Cristina Díaz, Elisa Toloba, Guillermo Barros, Juan Carlos Muñoz, Magdalena Hernan Obispo y otros muchos compañeros estudiantes de doctorado, con los que nos unen miles de horas de trabajo y lucha por el conocimiento que han aportado a esta tesis su ayuda en miles de “pequeñas” tareas, desde las traducciones de la web Cities At Night, a problemas de reducción, lecciones de Gnuplot y tantas y tantas cosas que se aprenden de los compañeros.

Una de las cosas que más ha contribuido a que esta tesis saliera para adelante es el trabajo de los estudiantes que han colaborado con Jaime y conmigo en sus trabajos académicamente dirigidos. Alicia, Alberto, Rocio, Carlos y tantos otros. Pero tres han sido de especial importancia, Berenice Pila, quien puso en práctica las pioneras ideas que teníamos sobre los mapas de contaminación lumínica; Marian López Cayuela, Guillermo Martín, que contribuyeron notablemente al catálogo de imágenes tomadas desde la ISS.

Una de las personas que sin saberlo ha contribuido mucho a esta tesis ha sido el Catedrático de Fotografía de la Escuela de Bellas Artes, Pedro Saura, que desde que nos conocimos hace ya 8 años ha sido siempre de gran inspiración y ayuda con sus conocimientos de fotografía y prestándonos material para su caracterización. Dos investigadores que no pueden faltar en los agradecimientos de esta tesis son C.C.M. Kyba y Martin Aubé que nos demostraron que la contaminación lumínica es un área de la investigación apasionante y en rápida expansión, con los que he compartido días completos de discusión científica ya sea perdidos en los bosques del norte de Alemania o persiguiendo espectros por las calles de Madrid. Además, gracias a Chris y Martin hay dos interesantes secciones que seguirán desarrollándose en un futuro como son la calibración del mapa de Berlín desde el aire y el estudiopectral de la contaminación lumínica y los modelos de emisión.

Mención especial merecen los colaboradores externos a la Universidad Complutense como Salvador Bará que nos asesora en toda la parte de fisiología y análisis de la contaminación lumínica con el que estamos seguros que nos aguarda una fructífera y exitosa colaboración, con el que compartimos no solo área de investigación, sino la misma pasión por devolver al cielo lo que es del cielo. No hay palabras para agradecer a José Gómez Castaño, Daniel Lombraña y el equipo de Crowdcrafting, con los que hemos desarrollado un proyecto de ciencia ciudadana casi de la nada, solo con las ideas locas de quien piensa que solo hacia falta grandes amigos y un poco de voluntad para conseguirlo. Con ambos nos esperan aun muchos retos que afrontar, el primero, terminar el monstruo que hemos creado y sobre todo, poder vivir de esta investigación.

Otra gente sin la cual Cities at Night no habría podido existir en la gente de MediaLab-

Prado (Beatriz Fernández, Pablo Ripolles, Juan Rodrigo Solera Sánchez-Seco, Marta Vela Ibañez, Alejandro Domínguez y Sonia Diez), que ayudaron a dar forma a la web del proyecto y nos regalaron sus conocimientos y sus diseños.

También tenemos que dar gracias a la gente de NASA(William Stefanov, Sue Rouco, Melissa Gaskill), ESA(Massimo Sabbatini, Jason Hatton, Erica Rolfe, Rosita Suenson), CSA-ASC y a los astronautas de la ISS: Donald R. Pettit, Luca S. Parmitano, Anatoly Ivanishin, Chris Hadfield, Koichi Wakata, SH. ,Kaplerov, Andre Kuipers, Soichi Noguchi y demás astronautas y cosmonautas de NASA, ESA, JAXA, CSA-ASC y ROSCOSMOS que ha hecho posible esta investigación, bien tomando las imágenes, proporcionando nos datos para su caracterización cuando aun no eran públicos, creyendo y difundiendo el proyecto que acaba de comenzar.

Otros que han creído en mis ideas locas como poner una cámara en un globo o en un dron son María de Los Dolores Molina, Fernando Ortúño y mis amigos de Daedalous(Aitor, Miguel Ángel, Pedro, David, Teresa ...), quienes han trabajado por que esta tesis pudiera salir a la luz sobre todo haciendo que los problemas legales no lo fueran tanto y siendo un apoyo moral e inspiración imprescindible. Con ellos espero que finalmente nuestros proyectos comunes terminen de despegar y los que son prototipos, algún día cercano se transformen en herramientas de investigación estandarizadas.

El también agradecer a mi entrañable hermano Iván, que como marca la tradición “Sánchez de Miguel” me ha acompañado en muchas de nuestras aventuras de medida nocturna y ha impulsado más de una sección de esta tesis con su ayuda física, moral y material.

Tenemos que dar gracias también a los investigadores que han cedido sus datos para esta investigación desde el INTA (Eduardo de Miguel Llanes, Óscar Gutiérrez de la Cámara, Alix Fernández Renau), AEMET(Juan Ramon Moreta Gonzalez), Observatorio Astronómico Nacional(Francisco Colomer) y a Metro de Madrid por los datos de las lámparas de Valdecarros.

Una parte fundamental de esta tesis es la colaboración con activistas, otros profesionales y amateurs, pero existe una categoría especial de estos, que son aquellos profesionales que de manera principalmente emocional han colaborado con nosotros con su trabajo, casi todos ellos compañeros de Celsfosc como Fernando Jauregui y Carlos Herranz, de la REECL o IDA, como son o han sido el maestro Ramon San Martín y su discípulo Manuel García Gil con quienes tenemos proyectos abiertos de colaboración, Alberto Castellón (UMA) con quien pretendemos localizar la ISS y trabajamos para perfeccionar nuestra pipeline de reducción, Blanca Trough-ton, Daniel Rosa Infantes quienes nos han prestado el programa Roadrunner, Fabio Falchi, con quien nos une intereses y esperamos sacar pronto los trabajos que tenemos empezados y por el que sentimos gran admiración como pionero de la investigación en contaminación lumínica; Peter Caltner, quien nos ha enseñado tanto sobre la ISS y su política interna además de colaborar localizando incansablemente las imágenes que necesitábamos; Salvador Ribas, quien

esperamos que pronto siga los pasos de esta tesis y presente la suya volviendo al mundo de la investigación de una manera u otra.

Salvador, además es un ejemplo de la red colaboración a la que debo el placer de pertenecer, la red LoNNe, la que me permitió realizar mi estancia en Berlín y contactar con grandes investigadores como Franz Holker, Josiane Meier o Dietrich Henckel o todos mis compañeros de la FU y otras instituciones, Blanca, Carlos, Luis, Ana, Mónica, Zaida, Tania, Helga, Juan y Fani. Que para mí son casi mi familia alemana y con los que me sentí como en casa.

También tengo un recuerdo para Paco Pujol del GPC, con quien comencé hace más de 15 años en el área del activismo contra la contaminación lumínica dentro de la Agrupación Astronómica de Madrid.

Es de justicia, además de agradecer a la personas, agradecer a las instituciones que han apoyado de una u otra manera esta tesis, que si bien el sustento de los dos últimos años ha sido sufragados por la fundación “Sánchez de Miguel”, la beca FPU del Ministerio de ciencia y tecnología, CEI UPM-UCM, AYA2009-10368, AYA2012-30717,Campus de Excelencia de Moncloa (CEI), el proyecto AstroMadrid (CAM S2009/ESP-1496) y REECL financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante la Acción Complementaria AYA2011-15808-E y a la ESSEM COST Action ES1204 que han contribuido de una u otra forma. Además de a estos, dar gracias al IDA por la concesión del premio Dark Sky Defender de 2014, CIEMAT por el uso de sus datos sobre aerosoles para trabajo futuro, y a Google Outreach por el uso gratuito de su plataforma Google Engine. Gracias a todos los compañeros del Departamento de Astrofísica y CC. de la Astmósfera, al personal de comunicación de la UCM, Alícia Mosquera y Margot Almazán, así como también a nuestra querida Ainhoa que nos ayuda con el papeleo, y Antonio con el mantenimiento. Por último y no menos importante a mis amigos Aldo Brunetti, Jess Starkey, a mi prima Beatriz García que me han ayudado en varias partes de la tesis con traducciones y ortografía.

Pero no solo de tesis vive el estudiante de doctorado, y además de todos los amigos ya mencionados, hay algunas personas que me han ayudado encomiablemente a ser feliz y superar toda suerte de problemas que he tenido los últimos 4 años, quizás los más difíciles de mi vida hasta el momento. Entre ellos mi gran amiga Estela con quien descubrí un nuevo yacimiento arqueoastronómico. Mi amigo David con el que me une la pasión por la ciencia, la meteorología y la música. Mis primos Diego, Marta, Dan y Gema, que nos han ayudado a mí y a mi familia en los momentos más duros. Mi amiga Eva Alcolea que ha aguantado tantas y tantas noches de fiestas y no fiestas, con la que comparto muchos amigos tanto en el mundo de la salsa y AEGEE que no cabrían en estos agradecimientos, pero que me han hecho la vida mucho más llevadera. Mis amigas de siempre Diana y Elenita, que siempre estáis ahí, aun cuando no nos vemos mucho, cuando os necesito. Mis amigos António Garrido, Lucía García, Fran, Cristian, David

root, Belén, Adri, Judith, Judit, Leti, Javi, Martazu y Nacho, y tantos otros que han demostrado que la facultad en un gran lugar para encontrar grandes amigos que duran en el tiempo.

Esta tesis, en definitiva es gracias a todos vosotros, mis maestros y maestras. Esperemos que esta semilla en forma de tesis florezca y dentro de algún tiempo vuelvan las estrellas a nuestra querida Madrid y a todo el mundo.

En recuerdo de aquellos que no podrán ver la defensa de esta tesis, solo lo que algún día puedan decir de este investigador:

Principalmente, decían que sabía la ciencia de las estrellas, y de lo que pasan, allá en el cielo, el sol y la luna; porque puntualmente nos decía el cris del sol y de la luna.

Quijote, CAPÍTULO XII

Bibliografía

Aceituno J., Sánchez S., Aceituno F.J., et al., 2011, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 123, 1076

Aldrich J., 1995, Statistical science, 364–376

Alfaro Navarro E., Alfonso Garzón J., Barrado Navascués D., et al., 2009, 100 Conceptos básicos de Astronomía, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas»

Álvarez J.A., et al., 1786, Compendio histórico, de las grandezas de la coronada villa de Madrid: corte de las monarquía de España, El Museo Universal

Amón S., Novillo J.M.C., 1984, El escudo y la bandera: memoria y diseños de los símbolos de la Comunidad Autónoma de Madrid, Comunidad de Madrid

Association J.E.I.D., et al., 1998, Jun, 12, 172

Aubé M., 2015, Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 370, 20140117

Aubé M., Kocifaj M., 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 422, 819

Aubé M., Franchomme-Fossé L., Robert-Staehler P., Houle V., 2005, In: Optics & Photonics 2005, 589012–589012, International Society for Optics and Photonics

Aubé M., O'Neill N., Giguère J.D., Royer A., 2009, In: EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 11, 2591

Ayuntamiento de Barcelona, Estadísticas de alumbrado público, online, URL <http://www.bcn.cat/estadistica/castella/dades/anuaris/index.htm>

Ayuntamiento de Madrid, Estadísticas de alumbrado público online, URL <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Ayuntamiento/Estadistica/Areas-de-informacion-estadistica/Energia%3A-gas-y-electricidad/Electricidad/Alumbrado-Publico?vgnnextfmt=detNavegacion&>

vgnextoid=7255786b10a59210VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnextchannel=c40a8131dd22a210VgnVCM1000000b205a0aRCRD

Ayuntamiento de Valencia, Estadísticas de alumbrado público, online, URL http://www.valencia.es/ayuntamiento/anuario.nsf/fCategoriaVista?readForm&nivel=6_2&Vista=vListadoAnuario&Categoria=Anuario%202014&lang=1&expand=9&subexpandido=2&bdoorigen=ayuntamiento/estadistica.nsf

Bamford S.P., Nichol R.C., Baldry I.K., et al., 2009, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 393, 1324

Bará S., Nievas M., Sánchez de Miguel A., Zamorano J., 2014, Applied optics, 53, 2677

Barducci A., Marcoionni P., Pippi I., Poggesi M., 2003, Applied optics, 42, 4349

Barducci A., Benvenuti M., Castagnoli F., et al., 2006, Annals of Geophysics

Baugh K., Elvidge C.D., Ghosh T., Ziskin D., 2010, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 30, 114

Baugh K., Hsu F.C., Elvidge C.D., Zhizhin M., 2013, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 35, 70

Benn C.R., Ellison S.L., 1999, arXiv preprint astro-ph/9909153

Bertin E., Arnouts S., 1996, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 117, 393

Birriel J., Adkins J.K., 2010, Journal of the American Association of Variable Star Observers (AAVSO), 38, 221

BOE, 1992, Real decreto 1560/1992, de 18 de diciembre, por el que se aprueba la clasificación nacional de actividades económicas (cnae-93)

BOE, 2007, BOE, 102, 207

Bonmati-Carrión M.A., Arguelles-Prieto R., Martínez-Madrid M.J., et al., 2014, International Journal of Molecular Sciences, 15, 23448

Bonnarel F., Fernique P., Bienaymé O., et al., 2000, A reference tool for identification of astronomical sources-Astron. Astrophys., Suppl. Ser., 143, 33-40 (2000)-April (I) 2000

Cao F., Guichard F., Hornung H., Masson L., 2009, Sensor information capacity and spectral sensitivities

- Cardiel N., october 1999, Star Formation in Central Cluster Galaxies, Ph.D. thesis, , Universidad Complutense de Madrid, Spain, (1999)
- Cardiel N., Gorgas J., Gallego J., et al., 2002, In: Astronomical Telescopes and Instrumentation, 297–304, International Society for Optics and Photonics
- Cheshire C., Antin J., 2008, Journal of Computer-Mediated Communication, 13, 705
- Cinzano P., 2000, Memorie della Società astronomica italiana, 71, 159
- Cinzano P., 2005, ISTIL Int. Rep, 9
- Cinzano P., Elvidge C.D., 2004, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 353, 1107
- Cinzano P., Falchi F., 2000, The ida worldwide project for ccd amateur measurements of night sky brightness, URL <http://www.inquinamentoluminoso.it/cinzano/en/sbeam2.html>
- Cinzano P., Falchi F., 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 3337
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C., Baugh K., 2000, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 318, 641
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., 2001a, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328, 689
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., 2001b, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 323, 34
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C., 2006, In: meeting of the IAU Comm, vol. 50
- Clifton C., Cooley R., Rennie J., 2004, Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on, 16, 949
- Coffin D., 2006, Dave coffin's dcraw, URL <http://www.cybercom.net/~dc coffin/dcraw/>
- Comunidad de Madrid, 2013, Gasto de energía segun uso, online, URL https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.madrid.org%2Fiestadis%2Ffijas%2Festructu%2Fgeneral%2Fanuario%2Fdescarga%2Fanu12-2-3.xls&ei=GUTIVO_q0sarU7jTg9AP&usg=AFQjCNG4XbeIPxVG0VW0kLSVjug1mJd87w&sig2=2SeeivqwMfFV9kNK716liQ&bvm=bv.84607526,d.d2s

- Conci A., 2013, SQM-PI:helping astronomers to mesure light pollution, Ph.D. thesis, , Università degli studi di trento, Trento, (2013)
- Crawford D.L., 1997, The Observatory, 117, 14
- Csiszar I., Gutman G., 1999, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 104, 6215
- Darg D., Kaviraj S., Lintott C., et al., 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 401, 1552
- Darula S., 2013, In: International Conference on Light Pollution Theory, Modelling and Measurements
- de Vera Quintero Á.S., 2014, Equipamiento y servicios municipales, 14–18
- DeFries R.S., Rudel T., Uriarte M., Hansen M., 2010, Nature Geoscience, 3, 178
- Dirección General de Carreteras D., 2008, Trazado: instrucción de carreteras, norma 3.1-IC, Ministerio de Fomento
- Dodson H., Levin P., Ride S., Souviney R., 2000, Computers & Geosciences, 26, 683
- Dorremochea C.H., 2011, Física y sociedad, 26–29
- Dressel L., 2012, Wide Field Camera 3, HST Instrument Handbook, 1
- Dubovik O., King M.D., 2000, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 105, 20673
- Ducati J., 2002, Catalogue of Stellar Photometry in Johnson's
- Duriscoe D.M., 2013, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 125, 1370
- Elvidge C., Bauch K., Hobson V., et al., 1997a, Global Change Biology, 3, 387
- Elvidge C.D., Green R.O., 2005, In: 13th JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, California, May 24-27, 2005., Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2005.
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., 1997b, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63, 727
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., et al., 1997c, International Journal of Remote Sensing, 18, 1373

- Elvidge C.D., Baugh K.E., Dietz J.B., et al., 1999, Remote Sensing of Environment, 68, 77
- Elvidge C.D., Cinzano P., Pettit D., et al., 2007, International Journal of Remote Sensing, 28, 2645
- Elvidge C.D., Ziskin D., Baugh K.E., et al., 2009, Energies, 2, 595
- Elvidge C.D., Keith D.M., Tuttle B.T., Baugh K.E., 2010, Sensors, 10, 3961
- Elvidge C.D., Baugh K.E., Zhizhin M., Hsu F.C., 2013, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 35, 62
- Elvidge C.D., Hsu F.C., Baugh K.E., Ghosh T., 2014, Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation, 97
- ENCY I., 2014, Key world energy statistics
- EOG, NGDC, NESDIS, NOAA, 2014, Global radiance calibrated nighttime lights, URL http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/download_radcal.html
- Espey B., McCauley J., 2014, Lighting Research and Technology, 46, 67
- Estes L.R., 2002, In: IAF abstracts, 34th COSPAR Scientific Assembly, vol. 1, 876
- Estrada-García R., García-Gil M., Acosta L., et al., 2015, Lighting Research & Technology, submitted
- Falchi F., Cinzano P., 1998, arXiv preprint astro-ph/9811234
- Faraji H., MacLean W.J., 2006, Image Processing, IEEE Transactions on, 15, 2676
- Fernández Sánchez J.F., Barranco Ríos J., Naráez Rueda J.J., 2014, In: Libro de actas del XXI Congreso Estatal de Astronomía, 205–209, RAdA
- Fischler M.A., Bolles R.C., 1981, Communications of the ACM, 24, 381
- Fotios S., Cheal C., 2011, Lighting Research and Technology, 43, 143
- Frei Z., Gunn J.E., 1994, The Astronomical Journal, 108, 1476
- Fukugita M., Shimasaku K., Ichikawa T., 1995, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 945–958
- Gallaway T., Olsen R.N., Mitchell D.M., 2010, Ecological Economics, 69, 658

- García L., 2008, Astronomía con webcam, URL http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/AstroWebcam_2008b_LuciaGarcia.doc
- García Gil M., Francia Payàs P., San Martí Páramo R., Solano Lamphar H., 2012, Contaminación lumínica: Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial, Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica
- García Valverde J.M., Ayesa Blanco R., 2009, Contaminación lumínica observada con imágenes por satélite, URL <http://eprints.ucm.es/15487/>
- Garstang R., 1984, The Observatory, 104, 196
- Garstang R., 1989, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 306–329
- Gaskill M., 2014, Space station sharper images of earth at night crowdsourced for science, URL http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/crowdsourcing_night_images
- GDirección_de_Comunicación_UCM, 2014, Astrofísicos de la complutense elaboran el primer atlas de imágenes nocturnas de la tierra tomadas por astronautas (9 de julio), URL <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag\discretionary{-}{}{}56948/Atlas%20de%20im%C3%A1genes%20nocturnas%20DEF.pdf>
- Ghosh T., Anderson S.J., Elvidge C.D., Sutton P.C., 2013, Sustainability, 5, 4988
- Gillespie T.W., Frankenberg E., Fung Chum K., Thomas D., 2014, Remote Sensing Letters, 5, 286
- Green D.W.E., jul 1992, International Comet Quarterly, 14, 55
- Gunn J.E., Stryker L., 1983, The Astrophysical Journal Supplement Series, 52, 121
- Habib A., Pullivelli A., Mitishita E., Ghanma M., Kim E.M., 2006, The Photogrammetric Record, 21, 29
- Hale J.D., Davies G., Fairbrass A.J., et al., 2013, PloS one, 8, e61460
- Hatton J., 2011, Research announcement for iss experiments relevant to study global climate change annex 1: Additional technical information on iss capabilities and background information, URL <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/201107/Annex1-ESA-ISS-CC-AO-Climate-Change.pdf>
- Hayes D.S., Latham D., 1975, The Astrophysical Journal, 197, 593

- Haythornthwaite C., 2009, In: System Sciences, 2009. HICSS'09. 42nd Hawaii International Conference on, 1–10, IEEE
- Henden A.A., Kaitchuck R.H., 1982, New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1982. 405 p., 1
- Henderson B., 2010, Netpbm, URL <http://netpbm.sourceforge.net/>
- Henderson J.V., Storeygard A., Weil D.N., 2009, Measuring economic growth from outer space, Tech. rep., National Bureau of Economic Research
- Herman J., Bhartia P., Torres O., et al., 1997, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 102, 16911
- Hetrick J., 2013, How To Use GoPro Hero 3 Cameras: The Adventure Sports Edition for HERO3+ and HERO3 Cameras, Jordan Hetrick
- Heydorn J., Higgins M., Stefanov W., et al., jun 2014, The gateway to astronaut photography of earth, URL <http://eol.jsc.nasa.gov/sseop/metadata/camera.htm>
- Hoffmann B., Tappert C., Schlosser W., et al., 1998, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 128, 417
- Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., et al., 2000, Astronomy and Astrophysics, 355, L27
- Holben B., Eck T., Slutsker I., et al., 1998, Remote sensing of environment, 66, 1
- Hölker F., Wolter C., Perkin E.K., Tockner K., 2010, Trends in Ecology & Evolution, 25, 681
- Hsu F.C., Baugh K.E., Ghosh T., Zhizhin M., Elvidge C.D., 2015, Remote Sensing, 7, 1855
- Hsu N.C., Herman J., Torres O., et al., 1999, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 104, 6269
- Huang Q., Yang X., Gao B., Yang Y., Zhao Y., 2014, Remote Sensing, 6, 6844
- ImageMagick Studio L., 2008, Imagemagick
- Jacoby G.H., Hunter D.A., Christian C.A., 1984, The Astrophysical Journal Supplement Series, 56, 257
- Jones A., Noll S., Kausch W., Szyszka C., Kimeswenger S., 2013a, arXiv preprint arXiv:1310.7030
- Jones A., Noll S., Kausch W., Szyszka C., Kimeswenger S., 2013b, In: EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 15, 8478

- Jones A., Noll S., Kausch W., et al., 2014, In: EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 16, 11013
- Kloog I., Haim A., Stevens R.G., Portnov B.A., 2009, Chronobiology international, 26, 108
- Kocifaj M., 2007, Applied optics, 46, 3013
- Koyama H., Jiang H., 2011, Journal of The Society of Photographic Science and Technology of Japan, 73, 94
- Krisciunas K., Schaefer B.E., 1991, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1033–1039
- Kuechly H.U., Kyba C.C., Ruhtz T., et al., 2012, Remote Sensing of Environment, 126, 39
- Kyba C., Ruhtz T., Fischer J., Höller F., 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425, 701
- Kyba C., Garz S., Kuechly H., et al., 2014a, Remote Sensing, 7, 1
- Kyba C., Hänel A., Höller F., 2014b, Energy & Environmental Science, 7, 1806
- Kyba C.C., Ruhtz T., Fischer J., Höller F., 2011, PloS one, 6, e17307
- Kyba C.C., Wagner J.M., Kuechly H.U., et al., 2013, Scientific reports, 3
- Kyba C.C.M., Tong K.P., Bennie J., et al., 2015, Sci. Rep., URL <http://dx.doi.org/10.1038/srep08409>
- Lang D., Hogg D.W., Mierle K., Blanton M., Roweis S., 2010, The Astronomical Journal, 139, 1782
- Leinert C., Bowyer S., Haikala L., et al., 1998, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 127, 1
- Letu H., Hara M., Yagi H., Tana G., Nishio F., 2009, Urban Remote Sensing Event, 2009 Joint, 1–7
- Letu H., Hara M., Yagi H., et al., 2010, International Journal of Remote Sensing, 31, 4443
- Levin N., Johansen K., Hacker J.M., Phinn S., 2014, Remote Sensing of Environment, 149, 1
- Li X., Chen X., Zhao Y., et al., 2013, Remote Sensing Letters, 4, 45

- Liao L., Weiss S., Mills S., Hauss B., 2013, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 12
- Lillo Bravo I., Macías Anarte S., Ruiz Hernández V., 2007, Resumen de las actuaciones de los ayuntamientos ante las nuevas tarifas electricas, URL <http://www.famp.es/famp/varios/ciudadessostenibles/docums/Informe%20FEMP%20300107.pdf>
- Lintott C., Schawinski K., Bamford S., et al., 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 410, 166
- Lintott C.J., Schawinski K., Slosar A., et al., 2008, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 389, 1179
- Liu Y., Zhou X., Sun W.H., et al., 2003, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 115, 495
- Lo C., 2001, Photogrammetric engineering and remote sensing, 67, 1037
- Lo C., 2002, Annals of the Association of American Geographers, 92, 225
- Lombraña González D., Domínguez A., Keegan M., et al., May 2015, pybossa: v0.2.2, URL <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17516>
- Lorenz D., 2013, Light pollution atlas 2006, URL <http://djlorenz.github.io/astronomy/lp2006/>
- Luginbuhl C.B., Lockwood G.W., Davis D.R., Pick K., Selders J., 2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121, 185
- Luginbuhl C.B., Boley P.A., Davis D.R., 2014, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 139, 21
- Marchant P., 2010, Radical Statistics, 102, 32
- Marin C., 2009, Proceedings of the International Astronomical Union, 5, 449
- Martín E.L., 2009, Historia del departamento de Astrofísica de la Universidad de la Laguna, IAC y ULL
- Meier J., Hasenöhrl U., Krause K., Potthast M., 2014, Urban Lighting, Light Pollution and Society, Routledge
- Mellinger A., 2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121, 1180

- Metcalf J.P., 2012, Detecting and Characterizing nighttime lighting using multispectral and hyperspectral imaging, Tech. rep., DTIC Document
- MIEYC, 2009, Estadísticas Eléctricas Anuales, MIEYC, URL <http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Publicaciones/ElectricasAnuales/Paginas/ElectricasAnuales.aspx>
- Mills S., 2010, D43777 Rev F, June, 31
- Mills S., Miller S.D., 2014, SPIE Optical Engineering+ Applications, 921809–921809
- Mills S., Jacobson E., Jaron J., et al., 2010, In: American Meteorological Society 6th Annual Symposium on Future National Operational Environmental Satellite Systems-NPOESS and GOES-R, vol. 9
- Min B., 2008, In: annual meeting of the Midwest Political Science Association
- MITYC, 2005, La energía en España 2004, URL http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_2004.pdf
- Molerò F., Salvador P., Núñez L., Artíñano B., Pujadas M., 2001, Teledetección, Medio ambiente y Calentamiento Global
- Moreno Burgos V., Palacios Morena M., Carrasco Díaz D., 2010, In: Documento Final del Grupo de Trabajo 21 de Conama 10 TELEDETECCIÓN Y SENORES MEDIOAMBIENTALES
- Müller A., Wuchterl G., Sarazin M., 2011, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 41, 46
- Muñoz-Tunón C., Vernin J., Varela A., 1997, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 125, 183
- Navarro P.C., 1986, La ciudad universitaria de Madrid, Editorial Complutense
- NETL, 2002, Lighting market characterization vol. 1 national lighting inventory and energy consumption estimate 9/02., URL http://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/lmc_vol1_final.pdf
- Nievas Rosillo M., 2012, Fotometría absoluta y brillo de fondo de cielo con astmon-ucm, URL <http://eprints.ucm.es/16974/>

- Nievas Rosillo M., 2013, Absolute photometry and night sky brightness with all-sky cameras, URL <http://eprints.ucm.es/24626/>
- Nievas Rosillo M., Zamorano J., 2014, Pysqm the ucm open source software to read, plot and store data from sqm photometers, URL <http://eprints.ucm.es/25900/>
- Pandey B., Joshi P., Seto K.C., 2013, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 49
- Paredes Gil M.A.e.a., 2009, El Lado Oscuro de la luz: Contaminación Lumínica, MIEYC
- Park W., Pak S., Shim H., et al., Jan. 2015, ArXiv e-prints
- Pawson S., Bader M.F., 2014, Ecological Applications, 24, 1561
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al., 2011, Journal of Machine Learning Research, 12, 2825
- Perryman M., Lindegren L., Kovalevsky J., et al., 1997, Astronomy and Astrophysics, 323, L49
- Pettit D., 2008, NASA JSC Houston, TX, 77058, 244
- Pila Díez B., 2010, Mapa de brillo de fondo de cielo de la comunidad de madrid, URL <http://eprints.ucm.es/11364/>
- Pindar A., Papetti M., 2002, Building, and Replacement Practices Task 4b-PICO Feasibility Study
- Posudin Y., 2014, Methods of Measuring Environmental Parameters, 368–370
- Pun C.S.J., So C.W., 2012, Environmental monitoring and assessment, 184, 2537
- Pun C.S.J., So C.W., Leung W.Y., Wong C.F., 2014, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 139, 90
- Puschnig J., Posch T., Uttenthaler S., 2014, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 139, 64
- Ramírez Moreta P., 2011, Brillo de fondo de cielo con astmon-ucm, URL <http://eprints.ucm.es/15000/>
- Rejas J., Prado E., Jiménez M., et al., 2004, IMU, 6
- Rhodes B.C., 2011, Astrophysics Source Code Library, 1, 12014

- Rodríguez Herranz I., 2010, Contaminación lumínica en la ucm (2010). i. evolución de la iluminación en la ucm, URL <http://eprints.ucm.es/11368/>
- Rosa Infantes D., June 27th - July 1st 2011, In: IV International Symposium for Dark Sky Parks, Montsec
- Roth G.D., Roth G.D., 2009, Handbook of practical astronomy, Springer
- Ruggles C.L., Cotte M., 2011, Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the Context of the UNESCO World Heritage Convention: A Thematic Study, International Council of Monuments and Sites
- Ruiz Carmona R., 2010, Contaminación lumínica en la ucm (2010). ii. mapa de la iluminación en la ucm, URL <http://eprints.ucm.es/11367/1/Contaminacion.pdf>
- Sabbatini M., Esposito M., 2011, Nighthpod - nodding mechanism for the iss, URL <http://eea.spaceflight.esa.int/portal/exp/?id=9337>
- Sánchez S.F., Aceituno J., Thiele U., Pérez-Ramírez D., Alves J., 2007, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 119, 1186
- Sánchez de Miguel A., 2007, In: Starlight: A Common Heritage. International Initiative in Defence of the Quality of the Night Sky and the Right to Observe the Stars, Canary Islands, Spain: Starlight Initiative and Instituto de Astrofísica de Canarias, URL <http://www.starlight2007.net/pdf/proceedings/SanchezDeMiguel.pdf>
- Sánchez de Miguel A., 2013a, Stable version: Berlin from the sky, URL <http://youtu.be/9V6i4Sm0qRE>
- Sánchez de Miguel A., 2013b, pyiss, URL <http://guaix.fis.ucm.es/hg/pyiss>
- Sánchez de Miguel A., 2013, Variación del brillo del fondo de cielo en el céntit con la fase y altura de la luna, URL <http://eprints.ucm.es/23995/>
- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., 2010, In: Highlights of Spanish Astrophysics V, 535–535, Springer Berlin Heidelberg
- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., Pila Díez B., et al., 2010, Highlights of Spanish Astrophysics VI
- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., Gómez Castaño J., et al., 2013a, In: Highlights of Spanish Astrophysics VII, vol. 1, 956–956

- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., Pascual S., et al., 2013b, In: Highlights of Spanish Astrophysics VII, vol. 1, 916–919
- Sánchez de Miguel A., Castaño J.G., Zamorano J., et al., 2014a, *Astronomy & Geophysics*, 55, 4
- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., Gómez Castaño J., 2014b, Image classification of night time images detected from the international space station, URL http://eprints.ucm.es/24808/1/ISS_clasification_project.pdf
- Sánchez de Miguel A., Zamorano J., Gómez Castaño J., Pascual S., 2014c, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 109 , URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002240731300472X>, light pollution: Theory, modeling, and measurements
- Schaller M., Park J.H., Mueller A., 2003, *Personality and Social Psychology Bulletin*, 29, 637
- Schawinski K., Lintott C., Thomas D., et al., 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396, 818
- Schawinski K., Urry C.M., Virani S., et al., 2010, *The Astrophysical Journal*, 711, 284
- Schlör J., 1998, *Nights in the big city: Paris, Berlin, London 1840-1930*, Reaktion Books
- Schnitt S., Ruhtz T., Fischer J., Hölker F., Kyba C., 2013, *Sensors*, 13, 12166
- Schubert E.F., Kim J.K., 2005, *Science*, 308, 1274
- Shao X., Cao C., Zhang B., et al., 2014, In: SPIE Asia Pacific Remote Sensing, 92640A–92640A, International Society for Optics and Photonics
- Sicard M., Pujadas M., Alados-Arboledas L., et al., 2011, *Óptica pura y aplicada*, 44, 1
- Siher E.A., Ortolani S., Sarazin M.S., Benkhaldoun Z., 2004, In: *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, 138–145, International Society for Optics and Photonics
- Skibba R.A., Bamford S.P., Nichol R.C., et al., 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, 966
- Small C., Elvidge C.D., 2013, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 22, 40
- Smith M., 2008, *Nature*, 457, 27

- So C.w., 2014, Observational studies of contributions of artificial and natural light factors to the night sky brightness measured through a monitoring network in Hong Kong, Ph.D. thesis, The University of Hong Kong (Pokfulam, Hong Kong)
- Sobrino J., Bianchi R., Paganini M., et al., 2009a, Dual-use european security ir experiment 2008 (desirex 2008) final report
- Sobrino J., Sòria G., Oltra-Carrió R., et al., 2009b, Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección, 80–92
- Stark H., Brown S., Wong K., et al., 2011, Nature Geoscience, 4, 730
- Stevens R.G., Brainard G.C., Blask D.E., Lockley S.W., Motta M.E., 2013, American journal of preventive medicine, 45, 343
- Stevenson R.L., 1881, Virginibus Puerisque and Other Papers, 189–93
- Szpir M., 2002, American Scientist, 90, 226
- Tapia Ayuga C., Sánchez de Miguel A., Zamorano J., 2015, Lica-ucm lamps spectral database
- Tapissier F., 2010, Avex light pollution maps, URL <http://www.avex-asso.org/>
- Tardà A., Palà V., Arbiol R., et al., 2011, Proceedings of the International Geomatic Week, Barcelona, Spain, March, 2011
- Teare S.W., 2000, The Observatory, 120, 313
- Texas Instruments, 1991, Tc241-780-x 488-pixel ccd image sensor. 1-18. 1991, URL <http://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/tc241.pdf>
- Townsend A.C., Bruce D.A., 2010, International Journal of Remote Sensing, 31, 4459
- Transparency international, 2014, URL: <http://www.transparency.org/cpi2014>
- Treanor P., 1973, The Observatory, 93, 117
- Valls-Gabaud D., 2009, Proceedings of the International Astronomical Union, 5, 4
- Van Tichelen P., Geerken T., Jansen B., et al., 2007, Final report lot 9: Public street lighting
- Varela A.M., Munoz-Tunon C., Espinosa J.M.R., et al., 2004, In: Remote Sensing, 105–115, International Society for Optics and Photonics

- Vazdekis A., Ricciardelli E., Cenarro A., et al., 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424, 157
- Walker M., 1970, Publications of the ASP, 82, 672
- Walker M.F., 1977, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 405–409
- Wallace P., 1994, In: Astronomical Data Analysis Software and Systems III, vol. 61, 481
- Wanvik P.O., 2009, Accident Analysis & Prevention, 41, 123
- White A.S., 2013, Photographer's Guide to the Panasonic Lumix LX7: Getting the Most from Panasonic's Advanced Compact Camera, White Knight Press
- Wikipedia, 2014, Kilómetro cero, URL http://es.wikipedia.org/wiki/Kil%C3%B3metro_Cero, [Internet; descargado 9-enero-2014]
- Wu J., Wang Z., Li W., Peng J., 2013, Remote Sensing of Environment, 134, 111
- Zamorano J., Muñoz Marín V.M., 2010, Calibration of sqm-l photometers for the nixnox project, URL <http://eprints.ucm.es/12262/>
- Zamorano J., Ruiz Carmona R., 2013, Sky quality meter cross-calibration for the nixnox project, URL <http://eprints.ucm.es/18015/>
- Zamorano J., de Miguel A.S., Pascual S., et al., 2011a, LICA report, April
- Zamorano J., Sánchez de Miguel A., Martínez Delgado D., Alfaro Navarro E., 2011b, Astronomía, 36–42
- Zamorano J., de Miguel A.S., Ocaña F., Castaño J.G., 2013a, Astronomía, 80–87
- Zamorano J., Sánchez de Miguel A., Alfaro E., et al., 2013b, In: Highlights of Spanish Astrophysics VII, vol. 1, 962–970
- Zamorano J., Sánchez de Miguel A., Gómez Castaño J., et al., 2013c, Night sky brightness and light pollution in comunidad de madrid, URL http://eprints.ucm.es/24201/1/SQM-CAM_LPTM2013.pdf
- Zamorano J., Sánchez de Miguel A., Nievas Rosillo M., Tapia Ayuga C., 2014, Nixnox procedure to build night sky brightness maps from sqm photometers observations, URL <http://eprints.ucm.es/26982/>

Zhao J., Wang Y., Zhang H., 2011, In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, 3464–3467, IEEE

Zhao N., Ghosh T., Samson E.L., 2012, International Journal of Remote Sensing, 33, 6304

Zhizhin M., Elvidge C., Baugh K., Hsu F., 2013, In: AGU Fall Meeting Abstracts, vol. 1, 1526

Ziskin D., Baugh K., Hsu F.C., Elvidge C.D., 2010, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 30, 131

Zissell R.E., 2000, Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO), 28, 149

Zollweg J.D., Gartley M., Roskovensky J., Mercier J., 2012, In: SPIE Defense, Security, and Sensing, 83960C–83960C, International Society for Optics and Photonics