



**Evaluación de la calidad del cielo nocturno en el Pic du
Midi y el Valle del Roncal en el marco del proyecto
*Pirineos La Nuit***

Hector Linares
Eduard Masana

Institut d'Estudis Espacials de Catalunya
Institut de Ciències del Cosmos - Universitat de Barcelona
UB-ICC-IEEC

23 de diciembre 2020
Actualitzat maig 2021

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos del estudio.....	5
3. Marco teórico	6
3.1. Instrumentación	9
3.2. Modelización	10
3.2.1. Illumina.....	10
3.2.2. Mapas de contribución	12
3.2.3. Mapas all-sky	13
4. Resultados	17
4.1. Pic du Midi.....	17
4.1.1 Mapas contribución	17
4.1.2 Imágenes SQC.....	20
4.1.3 Mapas all-sky.....	22
4.2. Valle del Roncal	25
4.2.1 Mapas de contribución.....	25
4.2.2 Imágenes SQC.....	27
4.2.3 Mapas all-sky	28
5. Conclusiones.....	31
Referencias.....	33

1. Introducción

La presente memoria se enmarca en el proyecto Interreg POCTEFA “Pirineos La Nuit” (PLN) financiado con fondos de la Unión Europea.

El proyecto tiene como objetivo proteger y mejorar la oscuridad natural del Pirineo, como factor de calidad de los ecosistemas y la biodiversidad. El proyecto PLN tiene como meta convertirse en referencia en este campo para otras regiones que quieran hacer actuaciones similares.

El incremento del brillo de cielo nocturno debido a fuentes artificiales, efecto conocido como contaminación lumínica, amenaza con alterar de manera directa la composición y el estado de los ecosistemas, ya que la falta de oscuridad afecta al comportamiento y la distribución de especies nocturnas (mamíferos, aves, reptiles, anfibios, invertebrados). El ser humano no es una excepción, la exposición nocturna prolongada a la luz de ciertos colores (azul principalmente) se ha vinculado en estudios recientes con ciertas enfermedades (García-Sáenz et al. 2018), como por ejemplo cáncer de páncreas. Además, el exceso de iluminación nocturna contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero debido al gasto energético que supone, agravando de esta manera la crisis climática que sufre el planeta.

La contaminación lumínica impide también la contemplación a simple vista del cielo estrellado que es Patrimonio Cultural de la Humanidad (certificado por la UNESCO el 2009). Hoy en día el 60% de la población mundial vive bajo un cielo contaminado, llegando al 80% en Europa. Desde el punto de vista de la astronomía, la contaminación lumínica constituye un verdadero obstáculo para el estudio de los cuerpos celestes. Los observatorios astronómicos se han visto obligados a alejarse de las ciudades y buscar los pocos emplazamientos que quedan sin contaminar, habitualmente muy alejados de poblaciones de cierto tamaño.

A pesar de la creciente preocupación por la contaminación lumínica y el esfuerzo de la comunidad científica para reducirla, actualmente sigue aumentando año a año (Kyba et al. 2017).

El proyecto PLN aborda el problema de la contaminación lumínica desde varios ángulos que permitirán la elaboración de una estrategia pirenaica para la protección y mejora de la calidad del medio nocturno:

- Medición y modelización del estado del cielo nocturno del Pirineo. Esta memoria se enmarca en esta línea de actuación.
- Análisis del impacto de la contaminación lumínica en la biodiversidad.
- Certificación de 3 espacios naturales como reservas de Cielo Oscuro/Estrellado.
- Guía de recomendaciones y buenas prácticas en alumbrado.
- Construcción de tramas nocturnas.

2. Objetivos del estudio

Este documento expone el estudio del brillo del cielo que se ha realizado en dos de las localizaciones claves del proyecto PLN: el Pic du Midi de Bigorre (Hautes-Pyrénées, Francia) y el Pico Larra en el Valle del Roncal (Comunidad Foral de Navarra, España). Véase la Figura 2.1 para la localización exacta.

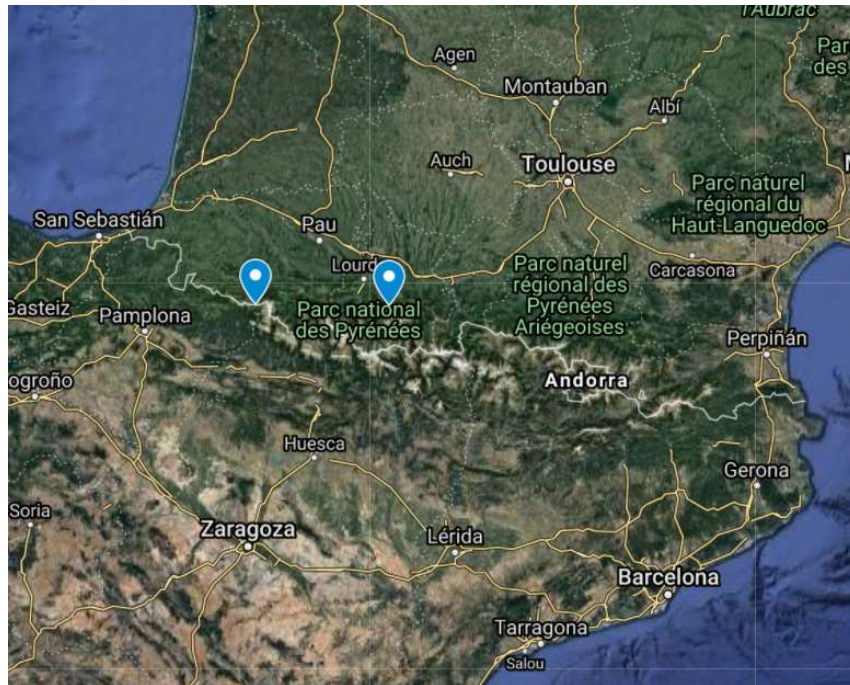


Figura 2.1. Localización geográfica de los puntos estudiados. El Pic du Midi corresponde con el punto marcado más al este y el Pico Larra con el punto marcado más al oeste.

El estudio del brillo del cielo nocturno se ha abarcado desde dos líneas de actuación distintas: medidas directas y simulaciones a partir de modelos de propagación de la luz en la atmósfera.

Las mediciones nos dan información veraz sobre la calidad del cielo nocturno estudiado. Sin embargo, es una información ligada al momento de la toma de las medidas y sus particularidades como: las condiciones atmosféricas, instante de la medid, eventos especiales que puedan producir un cambio en la iluminación de las fuentes próximas, presencia de nieve, etc.

Usando una modelización del comportamiento de la luz a través de la atmósfera se pueden recrear las mediciones del brillo del cielo nocturno. Estas simulaciones son de gran utilidad. Primero, porque permiten tener información de lugares inaccesibles para hacer mediciones. Segundo, porque se pueden seleccionar las condiciones atmosféricas y demás variables que afectan al brillo del cielo. Tercero, porque permiten hacer

estimaciones del impacto que tendría en el cielo cambios en el alumbrado, pudiendo probar así diferentes configuraciones sin necesidad de cambiar una sola bombilla. Por último, permiten saber que fuentes y en qué medida están afectando al cielo estudiado.

En este trabajo, para los dos puntos estudiados se presenta una medición del brillo del cielo de toda la bóveda celeste, el mapa equivalente creado a partir de modelización y un mapa de las fuentes contaminantes de cada punto.

3. Marco teórico

El brillo del cielo es radiación electromagnética, que puede ser entendida como ondas electromagnéticas o fotones que viajan por el espacio. Esta radiación electromagnética está definida principalmente por su frecuencia o longitud de onda. Desde las longitudes de onda más pequeñas hasta las más grandes, el espectro electromagnético se divide en: rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja, microondas y ondas radio. En la figura 3.1 se puede observar esta clasificación.

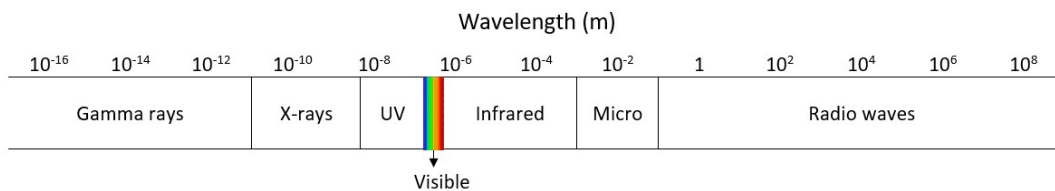


Figura 3.1. División de la radiación electromagnética según su longitud de onda. Longitud de onda expresada en m.

Como se observa en la figura 3.1 la luz visible es una pequeña parte del espectro electromagnético. Se caracteriza por contener el rango de longitudes de onda al que es sensible la visión del ser humano, desde ligeramente por debajo de 400nm a ligeramente por encima de 700nm. Dentro de ese rango la sensibilidad varía con la longitud de onda, la figura 3.2 representa la sensibilidad de la visión *fotópica* (relacionada con altos niveles de iluminación, dominante durante el día) y *escotópica* (relacionada con bajos niveles de iluminación, dominante durante la noche). Existen magnitudes que miden el brillo teniendo en cuenta la sensibilidad de la visión humana, denominadas magnitudes fotométricas. Las unidades más usuales en que se miden estas magnitudes fotométricas son la candela (cd), el lumen (lm) y el lux (lx):

- Candela: intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hercios y de la cual la intensidad radiada en esa dirección es 1/683 vatios por estereorradián (sr).
- Lumen: unidad de flujo Luminoso. $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$.
- Lux: unidad de iluminancia. $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm m}^{-2} = 1 \text{ cd sr m}^{-2}$

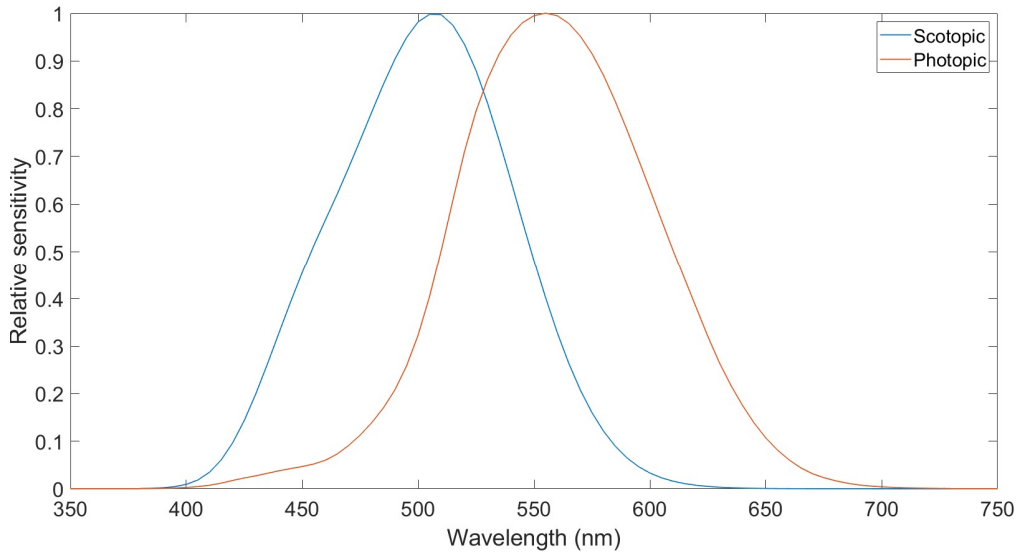


Figura 3.2. Curvas de sensibilidad de la visión humana en función de la longitud de onda. En rojo visión fotópica y en azul visión escotópica.

Sin embargo, la comunidad científica que estudia la contaminación lumínica suele expresar el brillo del cielo en magnitudes astronómicas. Las magnitudes astronómicas son una escala logarítmica adimensional que fue originalmente diseñada para clasificar estrellas según su brillo. Esta escala se vincula con el filtro óptico que se use para medir el brillo. En este estudio usamos el filtro *V* de Johnson-Cousin (Johnson & Morgan 1953, 1955), ampliamente usado en astronomía y contaminación lumínica y que se relaciona con el rango de la luz visible. Por tanto, todas las magnitudes referidas en esta memoria han de entenderse como magnitudes en dicho filtro *V*. En la figura 3.3 se puede ver la curva de transmisión de este filtro, junto con la de los filtros *B* y *R* del sistema de Johnson-Cousin por completitud.

Cuando el objeto de estudio no son fuentes puntuales, sino áreas extensas del cielo, como es nuestro caso, las unidades más comúnmente usadas son magnitudes por arco segundo cuadrado (mag arcsec^{-2}), equivalentes a la magnitud que asignaríamos al flujo proveniente de una región del cielo con un área de un arco segundo cuadrado.

En la figura 3.4 se relacionan las magnitudes astronómicas con algunas magnitudes relacionadas con la visión humana y con el deterioro de la calidad del cielo a medida que aumenta el brillo nocturno. Hay que señalar que a medida que aumenta el brillo del cielo disminuye el valor de la magnitud astronómica. Un incremento de 1 unidad representa un factor 2.5 en el brillo del cielo. En el filtro *V* a partir de un valor 21.4 se considera un cielo oscuro y poco contaminado. En un cielo así la Vía Láctea es fácilmente reconocible y se distinguen a simple vista más de 5000 estrellas. En la figura 3.4 se observa también como este número se va reduciendo a la vez que la Vía Láctea se hace más difícil de distinguir a medida que aumenta el brillo del cielo nocturno. Como referencia un cielo urbano se sitúa normalmente por debajo de un valor 19.0.

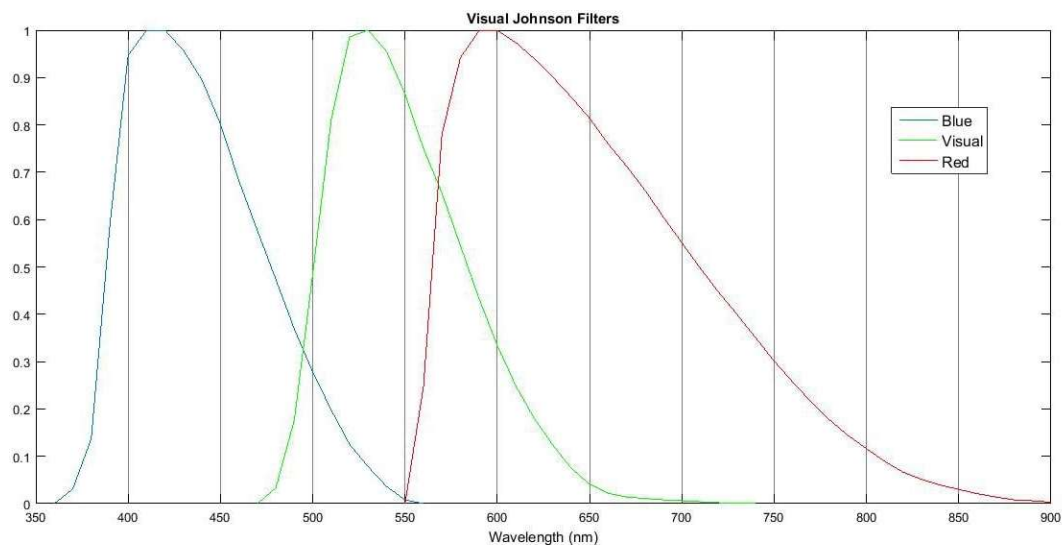


Figura 3.3. Transmisión (normalizada a la unidad) de los filtros *B* (en azul), *V* (en verde) y *R* (en rojo) del sistema Johnson-Cousin.

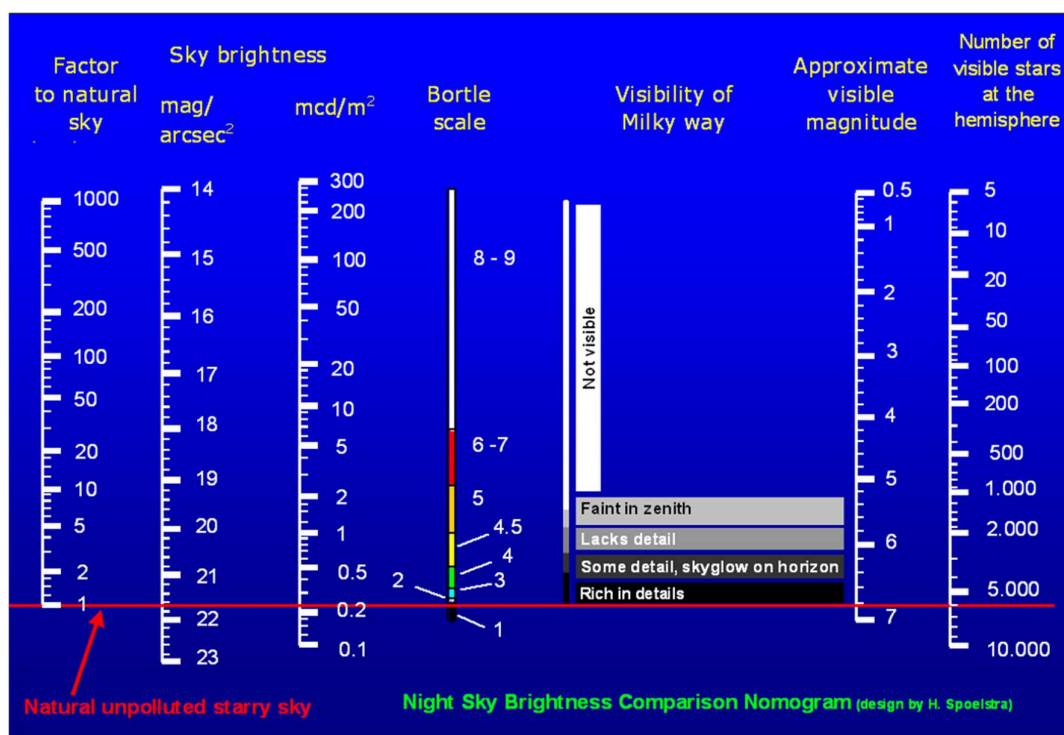


Figura 3.4. Nomograma del brillo nocturno. Las magnitudes corresponden al filtro *V*.

3.1. Instrumentación

Para la toma de medidas del brillo de cielo nocturno se han usado imágenes tomadas con una cámara réflex digital (*DSLR* por sus siglas en inglés) con una lente de ojo de pez que es capaz de adquirir información de toda la bóveda celeste en una sola toma. Las dimensiones reducidas y la facilidad de uso suponen una gran ventaja respecto a otro tipo de instrumentación.

El modelo de la cámara es la Canon EOS 6D, que tiene un sensor de fotograma completo CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico) que cuenta con 20.2 megapíxeles (5496x3670). La lente ojo de pez usada es una Sigma EX DG de 8mm de distancia focal. Las fotos han sido tomadas con una apertura total de 3.5.

Pese a las muchas ventajas que ofrecen, las imágenes tomadas con cámaras DSLR no pueden ser usadas directamente para medir el brillo del cielo. Para ello deben pasar primero un proceso de calibración. En nuestro caso la cámara ha sido calibrada por la empresa Euromix dentro del servicio SQC (Sky Quality Camera), que además de la calibración ofrece un software de procesamiento de las imágenes para obtener información del brillo del cielo en el filtro *V* del sistema de Johnson-Cousin. El software SQC ha sido validado y usado extensivamente en los últimos años por varios equipos dedicados a la contaminación lumínica.

A parte de las imágenes procesadas se han tomado medidas puntuales con instrumentación SQM (Sky Quality Meter), que es el fotómetro más usado en la comunidad de la contaminación lumínica. Aporta un único valor de brillo de un cono de 15° de apertura aproximadamente. En este estudio se ha usado el SQM para medir el brillo del cielo alrededor del zénit. La función de sensibilidad del SQM es única, y se puede aproximar al filtro *V* de manera cualitativa teniendo siempre en cuenta que existen diferencias entre ellas. En la figura 3.5 se observa la transmisión promediada de los fotómetros SQM. En particular se ha usado el fotómetro SQM-LU id 1871.

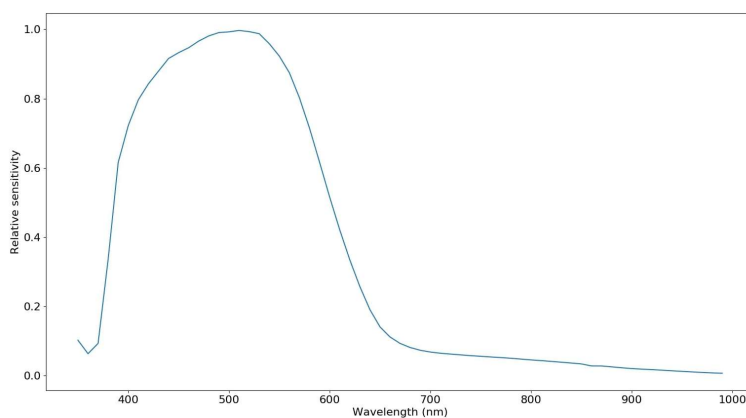


Figura 3.5. Transmisión (normalizada a la unidad) del SQM en función de la longitud de onda (Bará et al. 2019).

3.2. Modelización

La modelización de la contaminación lumínica tiene como objetivo estimar como la luz artificial afecta el brillo de cielo nocturno. Los primeros modelos de contaminación lumínica empezaron a aparecer hace aproximadamente 50 años (Treanor 1973) y han ido evolucionando desde modelos basados en sencillas relaciones empíricas hasta los actuales modelos numéricos que tienen en cuenta los procesos físicos de propagación de la luz en la atmósfera.

Hoy en día el modelo más preciso y completo es Illumina, desarrollado por M. Aubé (Aubé et al. 2005, 2018). Es el modelo en el que se basan las simulaciones presentadas en este informe. A continuación, se explican las características principales de este modelo y posteriormente como se ha usado para crear las simulaciones presentadas.

3.2.1. Illumina

Illumina es un modelo numérico de contaminación lumínica que calcula la radiancia (la radiación electromagnética recibida en un punto por unidad de superficie) recibida en cualquier dirección del cielo.

El modelo usa la información del sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Sensor) a bordo del satélite Suomi NPP para determinar la intensidad del brillo de las fuentes de luz, como pueden ser ciudades, pueblos o polígonos industriales (véase figura 3.6). Cada fuente tiene asociado el espectro de la luz que emite. Si estudiamos una zona extensa con diferentes tipos de fuentes de luz, el espectro de la luz emitida será una combinación del espectro de las fuentes individuales. A la distribución de tipos de fuentes (vapor de sodio, vapor de mercurio, LED...) que encontramos en una zona se la denomina *inventario*. Este inventario es uno de los datos de entrada de Illumina. En caso de no conocerse con detalle, el usuario puede definirlo en base a datos auxiliares (como imágenes nocturnas de la Estación Espacial Internacional) o suposiciones razonables. El espectro de cada fuente se puede definir por separado, e incluso se pueden separar diferentes zonas de la misma ciudad si el inventario de luces es diferente.

Definidas las fuentes, el esquema del modelo es similar al de *ray-tracing*: un grupo estadísticamente seleccionado de fotones provenientes de las fuentes definidas es emitido a la atmósfera y se simulan sus interacciones tanto con las partículas que componen la atmósfera como con el suelo. Illumina tiene en cuenta la absorción de la luz producida por los aerosoles y el scattering producido tanto por las moléculas atmosféricas como por los aerosoles. La absorción molecular no se tiene en cuenta ya que es negligible en el rango de la luz visible. El modelo calcula scattering de primer y de segundo orden, es decir los dos primeros cambios de dirección de los fotones. Se ha demostrado que la contribución del scattering de segundo orden aumenta con la distancia de la fuente y puede llegar a ser superior a la del primer orden. Illumina también tiene en cuenta el efecto del suelo, primero porque tiene en cuenta la luz que

es reflejada por el suelo y segundo porque tiene en cuenta la orografía que puede bloquear u oscurecer ciertas direcciones. Esta elevada precisión del modelo tiene como contrapartida un tiempo de ejecución de cálculo muy elevado. Para un solo mapa de todo el cielo simulado para el filtro V de los que se presentan en este informe se han necesitado más de 15.000 horas de cálculo.



Figura 3.6. Imagen del sensor VIIRS-DNB de la península ibérica y sur de Francia que muestra la intensidad de la luz recibida desde el espacio por cada punto de luz en la tierra.

Ilumina permite que el usuario puede escoger las direcciones exactas (ángulo de azimut y de elevación) en que quiere estudiar el brillo del cielo. En según qué tipo de estudios de contaminación lumínica no es necesario trabajar con el brillo en toda la bóveda celeste. El brillo en unas pocas direcciones nos puede dar suficiente información para caracterizar la calidad del cielo. En el caso más sencillo, una única medida o simulación del brillo del cielo en el cénit es representativa de dicha calidad. De esta forma, numerosos estudios de contaminación lumínica están basado en el valor del brillo del cielo en el cénit.

El modelo también permite escoger que rango espectral queremos simular, desde los 330nm a los 850nm. Además, se pueden escoger las condiciones atmosféricas de la simulación. Esto permite por una parte ajustar a las condiciones típicas del lugar de estudio o las condiciones específicas del momento de una toma de medidas con el fin de validar los resultados; y por otra parte permite estudiar el cielo en casos atmosféricos extremos.

3.2.2. Mapas de contribución

Los mapas de contribución muestran que fuentes y en qué medida están contribuyendo al aumento del brillo del cielo nocturno. Estos mapas son un producto final en sí mismos puesto que permiten responder a la pregunta de cuáles son las ciudades o pueblos que contaminan en mayor medida el cielo de un punto dado.

Más allá de la utilidad que tiene por sí mismos son de vital importancia para acelerar las simulaciones de brillo del cielo. Con la información que ofrecen se puede decidir qué fuentes de luz deben ser incluidas en la simulación del mapa de brillo de cielo. Aquellas que tienen una contribución negligible pueden ser omitidas para acelerar el tiempo de cálculo sin alterar el resultado final de forma apreciable.

Para crear los mapas de contribución en este estudio se ha seguido la metodología propuesta por Bará y Lima (2018). Primero estudiamos como una luz puntual afecta el brillo cielo en función de la distancia. Esta afectación se expresa a través de una PSF (Point Spread Function). Una vez disponemos de la PSF, la aplicamos a las fuentes de luz de los diferentes municipios a estudiar, para evaluar su contribución a la contaminación lumínica del punto estudiado.

Normalmente este tipo de PSF son empíricas, lo que supone que está ligada a las condiciones del momento de las medidas: condiciones atmosféricas, puntos de luz usados como fuentes y región del cielo estudiado. Dentro del marco del proyecto del PLN el equipo responsable de este informe publicó (Linares 2020) un método para crear una PSF basada en Illumina, que fue usada para estudiar el Observatori Astronòmic del Montsec (OAdM), otro de los puntos clave del proyecto pirenaico.

Usar una PSF basada en Illumina permite poder escoger las condiciones atmosféricas, el filtro, el espectro de luces y la región del cielo a estudiar. La PSF se obtiene a través de simular como afecta al cielo una única fuente de luz puntual a ciertas distancias en diferentes ventanas espectrales. En la figura 3.7 se representa la propagación de la luz en función de la distancia para 16 ventanas espectrales distintas.

Con esta información se deriva una ley de propagación que depende de la distancia y la longitud de onda. Esta ley de propagación se aplica sobre todos los puntos de luz alrededor de la localización a estudiar usando las imágenes del VIIRS (véase figura 3.6) como fuente de información para obtener la intensidad de emisión de cada fuente.

En este estudio los mapas de contribución representan la contribución de cada municipio a la luz artificial recibida en el filtro V de Johnson-Cousin en todo el cielo estudiado (valor de brillo integrado).

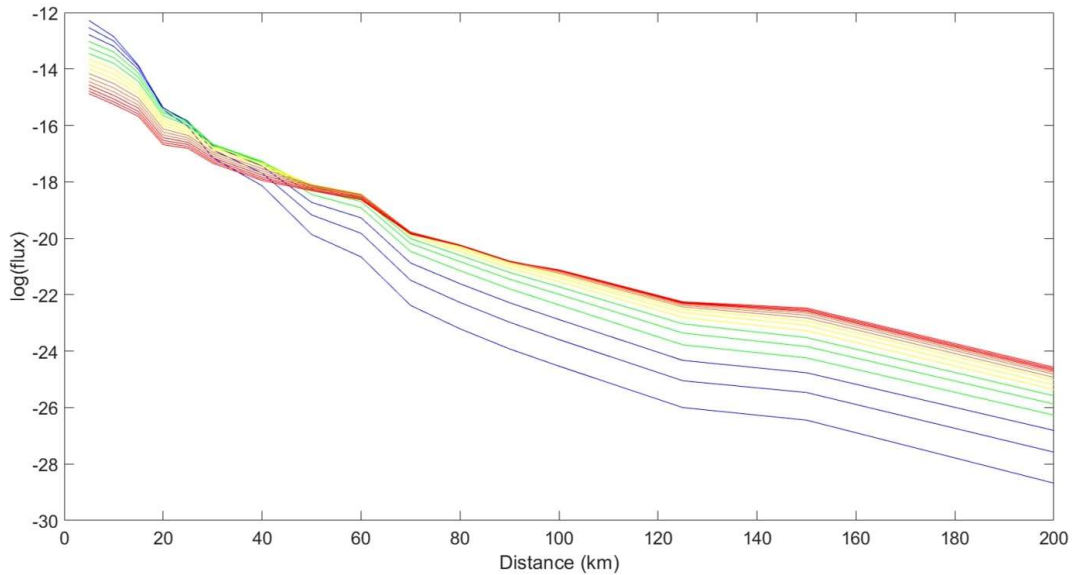


Figura 3.7. Radiancia recibida en función de la distancia usando una fuente de luz puntual. Cada función (línea) representa una ventana espectral distinta. En azul de longitudes de onda más corta, en verde media-corta, en amarillo media-larga y en rojo larga.

3.2.3. Mapas all-sky

Los mapas *all-sky* tienen esta denominación porque muestran información de todas las direcciones del cielo. Las imágenes de las cámaras DSLR procesadas con SQC son mapas all-sky.

Para recrear estos mapas usando Illumina hay que definir un conjunto de direcciones a estudiar. Este paso es crucial ya que, por una parte cada dirección estudiada supone un tiempo de cálculo importante, y por otra parte una separación excesiva entre las direcciones estudiadas puede suponer ignorar el efecto de fuentes de luz ubicadas en las direcciones no estudiadas, alterando la función de brillo en el cielo. El objetivo es encontrar el número mínimo de direcciones a estudiar sin que altere los resultados del mapa final.

Para definir el conjunto de direcciones óptimo (tanto en azimut como en elevación) para muestrear el cielo hemos usado el caso del OAdM. Este caso nos sirve de referencia ya que las fuentes de brillo principales están lo suficientemente alejadas para que afecten regiones pequeñas del cielo. De esta manera aseguramos que la resolución es suficiente para tener en cuenta este tipo de contribuciones. El caso del OAdM fue estudiado por el equipo responsable de este informe con gran resolución espacial en un estudio previo también relacionado con el PLN.

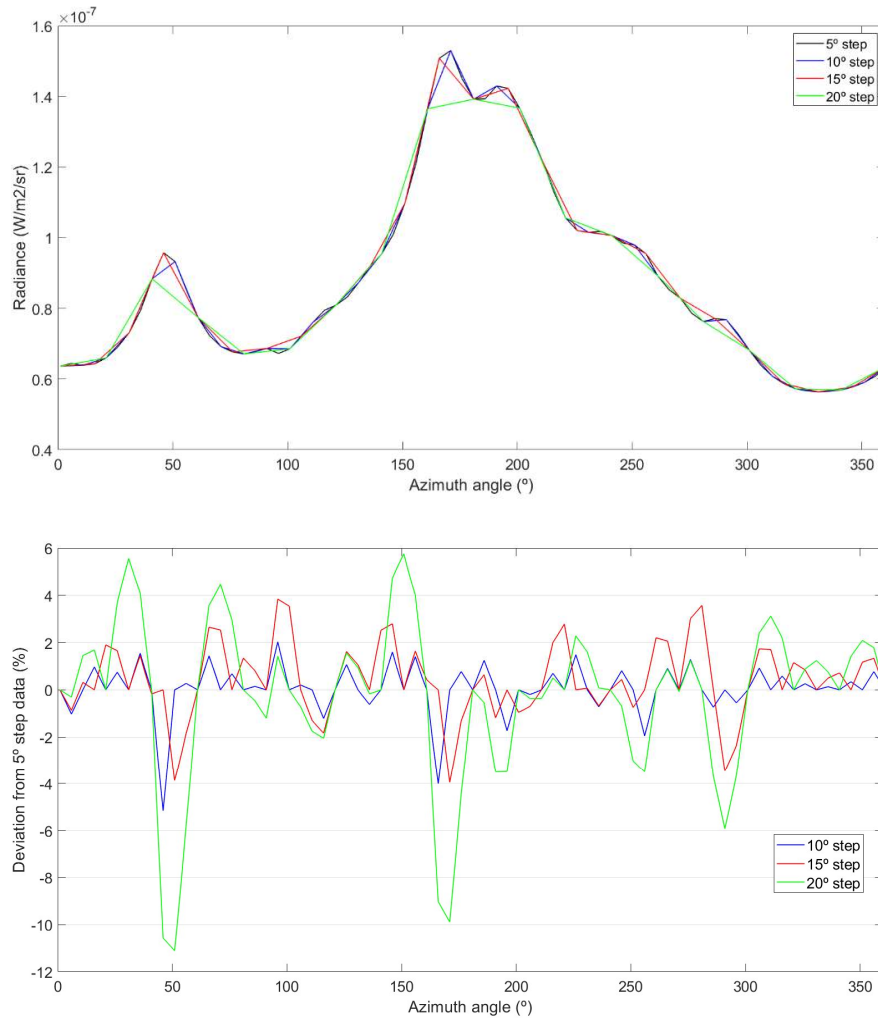


Figura 3.8. Arriba: radiancia recibida en función del azimut en el OAdM para diferentes pasos angulares. En negro paso de 5°, en azul 10°, en rojo 15° y en verde 20°. Abajo: diferencia relativa en % respecto al paso de 5°. En azul 10°, en rojo 15° y en verde 20°.

Para definir el paso en azimut se han estudiado los pasos de 5, 10, 15 y 20 grados como se puede ver en el gráfico superior de la figura 3.8. Los valores de radiancia entre las direcciones simuladas se han calculado usando una interpolación lineal. Después de comparar los casos se ha escogido el paso de 10 grados ya que la desviación respecto al paso de 5 grados está normalmente por debajo del 2%. Los pasos de 15 y 20 tienen una desviación media muy superior que puede alterar el mapa final (gráfico inferior de la figura 3.8). El paso de 5 grados se descarta ya que supone aumentar en un factor 2 el tiempo necesario para la creación de cada mapa.

El paso angular en elevación no es tan sencillo debido a que el brillo no sigue una función lineal respecto al ángulo de elevación. Se obtienen mejores resultados si se interpolan los valores usando el valor de brillo convertido en magnitudes astronómicas (escala logarítmica) como se puede ver comparando las dos primeras gráficas de la figura 3.9.

Aun así, el error debido a la interpolación continúa siendo excesivo para ángulos de elevación pequeños como se puede ver en el gráfico inferior de la figura 3.9. Finalmente se han simulado los ángulos de elevación 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75 y 90. Este conjunto asegura una resolución suficiente para ángulos pequeños, donde hay más variación de brillo, y reduce el número de direcciones en elevaciones superiores, donde la interpolación en magnitudes astronómicas coincide bien con los valores simulados.

El conjunto de direcciones total que se ha usado para elaborar los mapas all-sky simulados se puede ver en la figura 3.10.

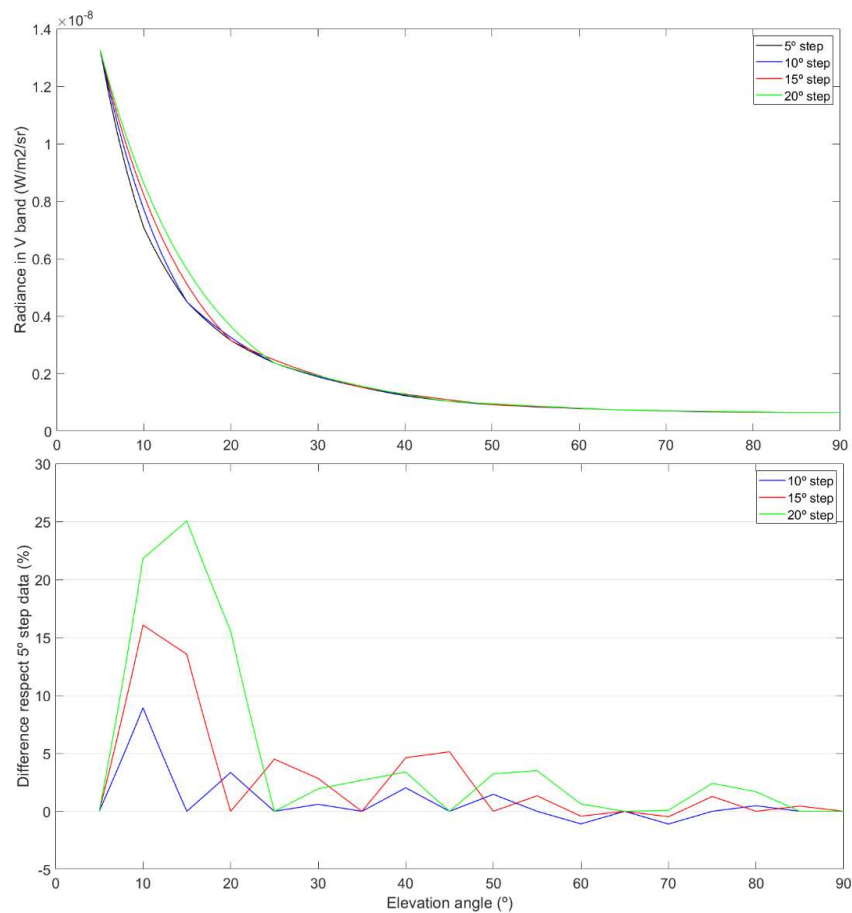


Figura 3.9. Arriba: radiancia respecto al ángulo de elevación en el OAdM para diferentes pasos de elevación con interpolación con la radiancia. Medio: radiancia respecto al ángulo de elevación en el OAdM para diferentes pasos de elevación con interpolación con el valor del brillo en magnitudes astronómicas. Abajo: diferencia relativa en % respecto al paso de 5° (interpolación con magnitudes astronómicas). Para todos los gráficos: en negro 5°, en azul 10°, en rojo 15° y en verde 20°.

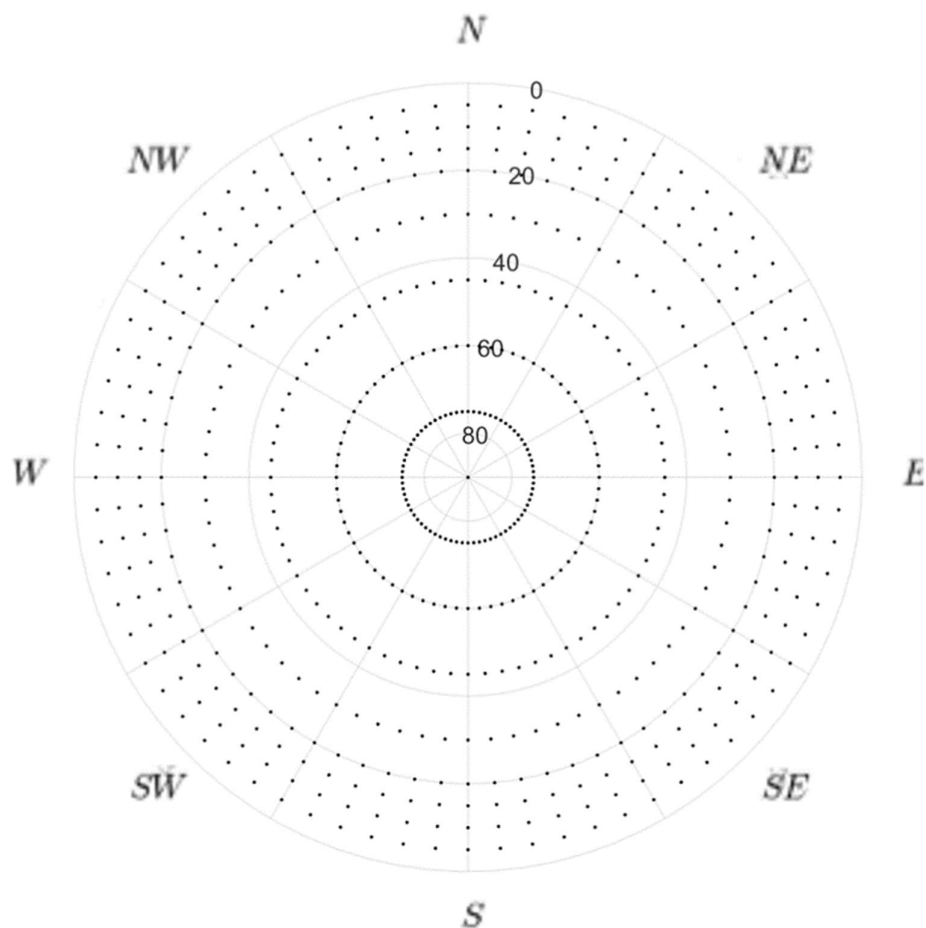


Figura 3.10. Conjunto de direcciones simuladas para la elaboración de los mapas all-sky simulados. El círculo exterior representa el horizonte y el centro el zénit.

Illumina proporciona el brillo artificial recibido en cada dirección. Para reproducir las medidas y poder comparar ambos mapas se debe añadir el brillo de cielo natural a los valores obtenidos con Illumina. Se ha usado un brillo de cielo homogéneo de un valor de $21.8 \text{ mag/arcsec}^2$ (Walker 1987). Es decir, un cielo totalmente libre de contaminación tendría un brillo del cielo de este valor. El valor proporcionado por Illumina es en unidades de radiancia (W/sr/m^2), para hacer la conversión a magnitudes astronómicas se ha usado como referencia la estrella Vega.

4. Resultados

Para cada una de las dos ubicaciones estudiadas se presentan tres tipos de resultados distintos. Primero los mapas de contribución, segundo las imágenes procesadas con SQC y, por último, los mapas de brillo de cielo simulado tipo all-sky.

Se debe tener en cuenta que los mapas de contribución reflejan el porcentaje de brillo artificial proveniente de cada municipio recibido en todo el cielo. Se puede dar el caso que fuentes de brillo lejanas que son claramente distinguibles en las imágenes SQC o los mapas all-sky simulados, tengan un porcentaje de contribución al brillo total del cielo pequeño. Esto es debido a que afectan a un conjunto de direcciones muy reducido y al calcular el porcentaje en todo el cielo su contribución queda diluida.

En el caso de los mapas de contribución, se muestra un primer mapa en el que aparecen todos los municipios alrededor de la ubicación estudiada y otro con solo los municipios que contribuyen con más de un 2% al total del brillo recibido en todo el cielo.

En la elección de las fuentes que contribuyen al brillo del cielo, necesaria para elaborar los mapas all-sky simulados, se ha tenido en cuenta tanto la información de los mapas de contribución como la de las imágenes SQC para no obviar ninguna fuente contaminante.

Para facilitar la comparación entre los mapas all-sky simulados y las imágenes SQC, éstas últimas se vuelven a presentar en el apartado de simulaciones pero eliminando la información entre 0 y 5° en elevación y rotando el eje este-oeste.

4.1. Pic du Midi

4.1.1 Mapas contribución

El Pic du Midi se encuentra en el Parc National des Pyrénées situado en el sur de Francia en la región central de los Pirineos. El punto de estudio se encuentra dentro del recinto del observatorio astronómico del Pic du Midi situado a casi 2900 metros de altura.

Las poblaciones más cercanas son pequeñas. A menos de 5 km al sureste se encuentra La Mongie, un complejo hotelero y turístico dedicado a los deportes de invierno en general y al ski en particular. El pueblo de Campan se encuentra a unos 6 km al noreste y Bagnères de Bigorre a unos 8 km hacia el norte.

Las poblaciones de mayor tamaño alrededor del Pic du Midi son: Lourdes, de 14.000 habitantes, situada a unos 10-12 km hacia el noroeste; Tarbes, de poco más de 50.000 habitantes situada a unos 20 km en dirección norte; por último, Pau, de casi 80.000 habitantes, situada a unos 35 km hacia el noroeste.

No hay ninguna gran ciudad cerca de la ubicación. Toulouse, de casi 500.000 habitantes, está situada a unos 130 km al noreste del observatorio. Debido a la altura del observatorio la luz de Toulouse es visible en direcciones muy próximas al horizonte e incluso por debajo de éste. Otras ciudades a distancias parecidas o ligeramente superiores son: Pamplona, al suroeste; Huesca, hacia el sur; y San Sebastian y Bayona hacia el oeste. Todas estas ciudades tienen una población bastante inferior a la de Toulouse y a priori no afectan al cielo sobre el Pic du Midi.

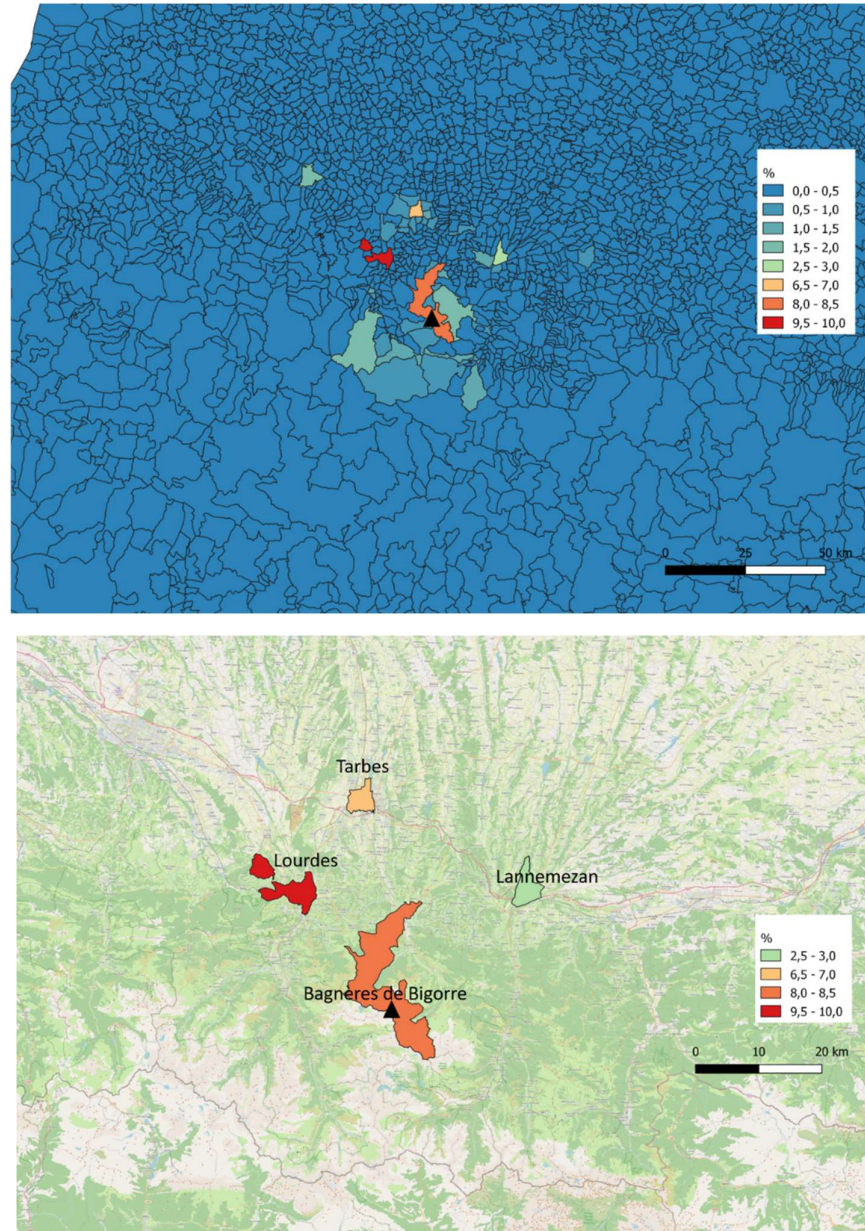


Figura 4.1. Mapas de contribución porcentual al brillo artificial recibido en todo el cielo para el filtro V en el Pic du Midi. Arriba: todos los municipios. Abajo: los municipios con una contribución superior al 2%.

Tabla 4.1. Listado de los 10 municipios con más contribución al brillo artificial sobre el cielo del Pic du Midi ordenados de mayor a menor contribución.

#	Municipio	Contribución (%)
1	Lourdes	9,83
2	Bagnères de Bigorre	8,4
3	Tarbes	6,87
4	Lannemezan	2,98
5	Campan	1,80
6	Pau	1,74
7	Cauterets	1,72
8	Luz Saint Sauveur	1,50
9	Saint Lary Soulan	1,36
10	Sémac	1,27

Los mapas de contribución (Figura 4.1) nos indican que la mayoría del brillo artificial recibido se emite en un radio de 30 km desde el Pic du Midi. Como podemos ver en la Tabla 4.1 hay 3 municipios que tienen una contribución muy superior a los demás: Lourdes, Bagnères de Bigorre y Tarbes.

- Bagnères de Bigorre está muy cerca del Pic du Midi. Debido a su proximidad la luz emitida por el pueblo aumenta el brillo en todo el cielo.
- Lourdes, aunque está algo más alejada, sigue siendo una fuente cercana. Además, su población es mucho mayor que en Bagnères de Bigorre y eso compensa la mayor distancia.
- Tarbes, la mayor ciudad de las tres se encuentra a más de 20 km. La luz emitida por esta ciudad se ve con claridad como una cúpula de luz cerca del horizonte. Su contribución al brillo es más local y no tan uniforme en todas direcciones.

Cabe destacar también que la ciudad de Pau, aunque no tiene una contribución total muy destacable, se encuentra en la misma dirección que Lourdes respecto al Pic du Midi. Esta alineación aumenta la cúpula de luz presente hacia el noroeste cerca del horizonte.

La ciudad de Toulouse tiene una contribución casi negligible, aunque se ha reportado por parte de los trabajadores del Pic du Midi que su luz se ve muchas noches. Hay varias explicaciones para esto. Primero, como hemos comentado, fuentes muy brillantes pero lejanas afectan a una región del cielo muy específica, así que al calcular la contribución en todo el cielo pasan desapercibidas. Segundo, los mapas de contribución estudian el cielo desde el horizonte local hasta el zénit. La diferencia de altura entre el Pic du Midi y Toulouse puede provocar que la ciudad afecte a direcciones por debajo del horizonte local. Tercero, las condiciones atmosféricas impuestas para el cálculo de los mapas de contribución es cielo totalmente despejado. La presencia de nubes, particularmente nubes altas, encima de la ciudad puede multiplicar su contribución.

4.1.2 Imágenes SQC

Las imágenes del cielo del Pic du Midi se tomaron el 18 de octubre de 2020. Tanto la zona del Pic du Midi como toda la zona de su alrededor se encontraban cubiertas totalmente por nieve, hecho inusual dadas las fechas. Esto aumenta el brillo del cielo, particularmente en direcciones cercanas al horizonte, debido a la alta reflectividad del suelo.

En la cima del Pic du Midi se encuentran diversos edificios e instalaciones pertenecientes al observatorio astronómico, los cuales impiden tener una visión completa de los 360 grados del horizonte. Solo desde el tejado de alguno de los edificios se tiene una visión casi completa del horizonte, pero la presencia abundante de hielo y nieve impidió acceder a ellos para la toma de fotografías. Finalmente se optó por tomar 3 conjuntos de imágenes desde diferentes puntos para intentar tener visión sin obstáculos de todas las direcciones (Figura 4.2).

El resultado de las tres imágenes coincide totalmente. El cielo del Pic du Midi está muy poco contaminado a partir de 25-30° en elevación. El valor más oscuro es de 21.63 mag/arcsec² cerca del zénit. La presencia de la Vía Láctea, que cruza el cielo de este a oeste pasando ligeramente al norte del zénit, provoca el ligero desplazamiento del punto más oscuro en dirección sur.

Las imágenes procesadas con el software SQC dan también una estimación del valor de brillo que mediría un fotómetro SQM. Todas las imágenes coinciden en un valor alrededor de 21.40 mag/arcsec², que es la frontera de un cielo oscuro. Mientras se tomaban las imágenes se tomaron medias SQM reales con valores muy próximos a 21.60 mag/arcsec².

El patrón de brillo de cielo se ve alterado por la presencia de la Vía Láctea, en su ausencia se vería claramente un gradiente desde el zénit hacia el horizonte en todas direcciones. Un análisis más detallado de las imágenes cerca del horizonte muestra el efecto en el brillo del cielo de las poblaciones cercanas comentadas en el apartado anterior:

- Al nordeste se aprecia el brillo provocado por Toulouse. Aunque ya hemos comentado que su contribución al brillo total del cielo es poca, su presencia es evidente en las imágenes SQC, si bien su afectación se restringe a elevaciones muy pequeñas ($h < 15^\circ$). Es posible que en momento en que se tomaron las imágenes hubiera nubes altas en la vertical de Toulouse que favoreciesen la dispersión de la luz hacia puntos lejanos.
- A un azimut de aproximadamente 350° (N-NW) se aprecia la presencia de Tarbes. Su contribución queda también restringida a elevaciones muy cercanas al horizonte.
- La dirección de Lourdes queda oculta por edificios en las tres imágenes. Sin embargo, se puede intuir en la primera y segunda imagen en la dirección noroeste. En cualquier caso, su afectación quedaría de nuevo restringida a elevaciones pequeñas.

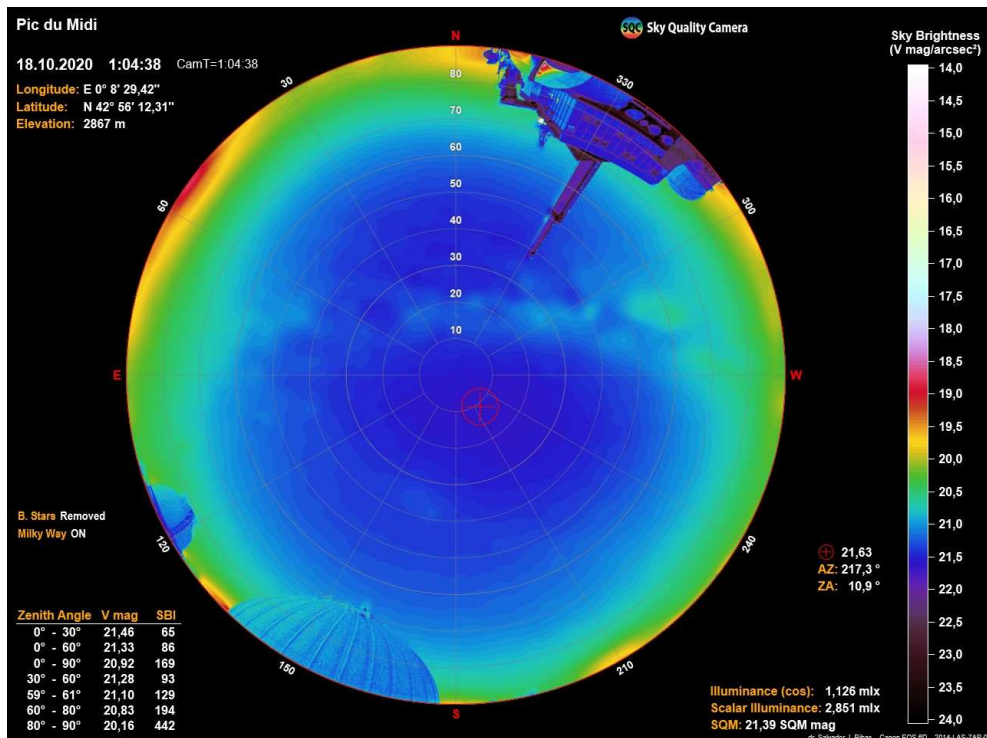
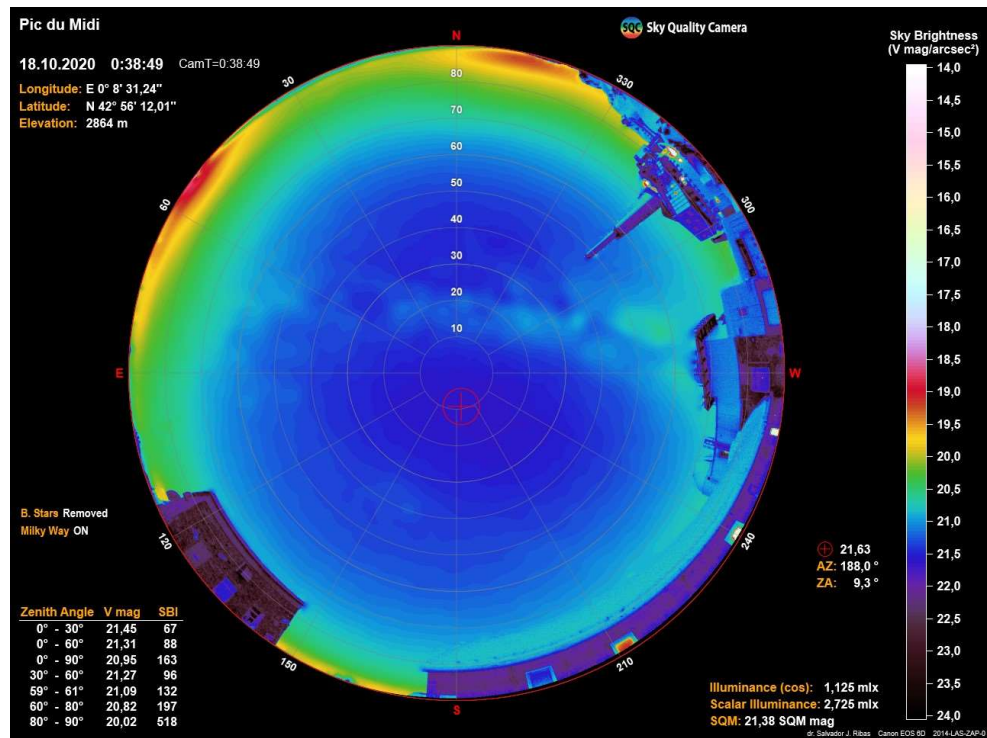


Figura 4.2. Imágenes all-sky procesadas con SQC del cielo sobre el Pic du Midi. Se muestra el brillo del cielo en magnitudes astronómicas en el filtro V de Johnson-Cousin. Cada imagen se ha realizado desde un punto diferente.

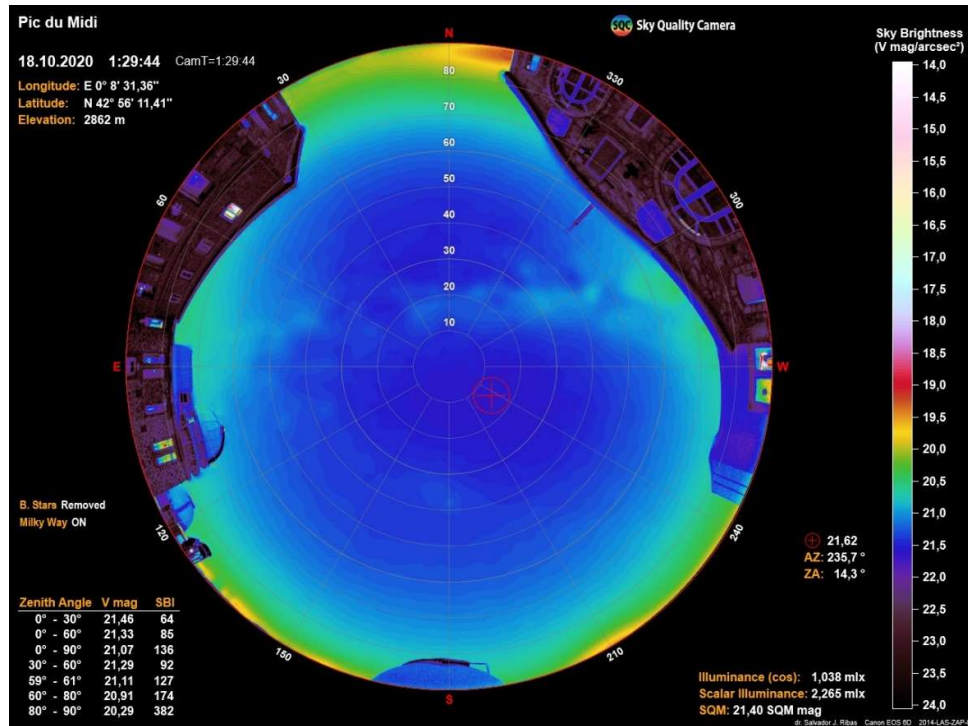


Figura 4.2 (continuación). Imágenes all-sky procesadas con SQC del cielo sobre el Pic du Midi. Se muestra el brillo del cielo en magnitudes astronómicas en el filtro V de Johnson-Cousin. Cada imagen se ha realizado desde un punto diferente.

La presencia de pequeñas zonas contaminadas muy próximas al horizonte, como las que se pueden apreciar en la dirección sudeste, es posiblemente debida a fuentes cercanas. En cualquier caso, su afectación es muy restringida.

4.1.3 Mapas all-sky

Para la creación del mapa simulado se han incluido todas las fuentes de luz a menos de 60 km del Pic du Midi, así como Toulouse, ya que aparece en las imágenes SQC.

Como no se tiene en cuenta la presencia de la Vía Láctea, el mapa all-sky simulado tiene un gradiente muy bien definido desde el zénit hacia el horizonte.

El valor en el zénit es de prácticamente $21.60 \text{ mag/arcsec}^2$, casi idéntico al medido con las imágenes SQC. El valor del brillo supera los $21.00 \text{ mag/arcsec}^2$ en elevaciones por encima de 30° como sucede en las imágenes SQC.

Los valores de brillo a bajas elevaciones son ligeramente más oscuras en el mapa simulado. Esto puede deberse a varios factores: primero, que las mediciones incluyen luz directa que no está incluida en las simulaciones; segundo, que las condiciones atmosféricas no sean idénticas; y por último, la presencia de nieve en la zona que no está contemplada en la simulación podría aumentar el brillo del cielo.

La simulación coincide con las medidas en presentar dos direcciones principales de contaminación lumínica: norte-noroeste y nordeste. La primera coincide con la localización de Tarbes, Lourdes, Pau y Bagnères de Bigorre. La segunda apunta hacia Lannemezan y Toulouse. Estudiamos la afectación en particular de la ciudad de Toulouse y obtuvimos un aumento del brillo de 0.4 mag/arcsec^2 en esta dirección. Sin embargo, simulación ($20.20 \text{ mag/arcsec}^2$) y mediciones ($19.20 \text{ mag/arcsec}^2$) no coinciden con el valor de brillo máximo de estas dos direcciones. Las posibles razones de esta disparidad son las expuestas en el párrafo anterior.

La dirección menos contaminada es hacia el sur con un valor próximo a 20.9 que coincide con lo medido con las imágenes SQC.

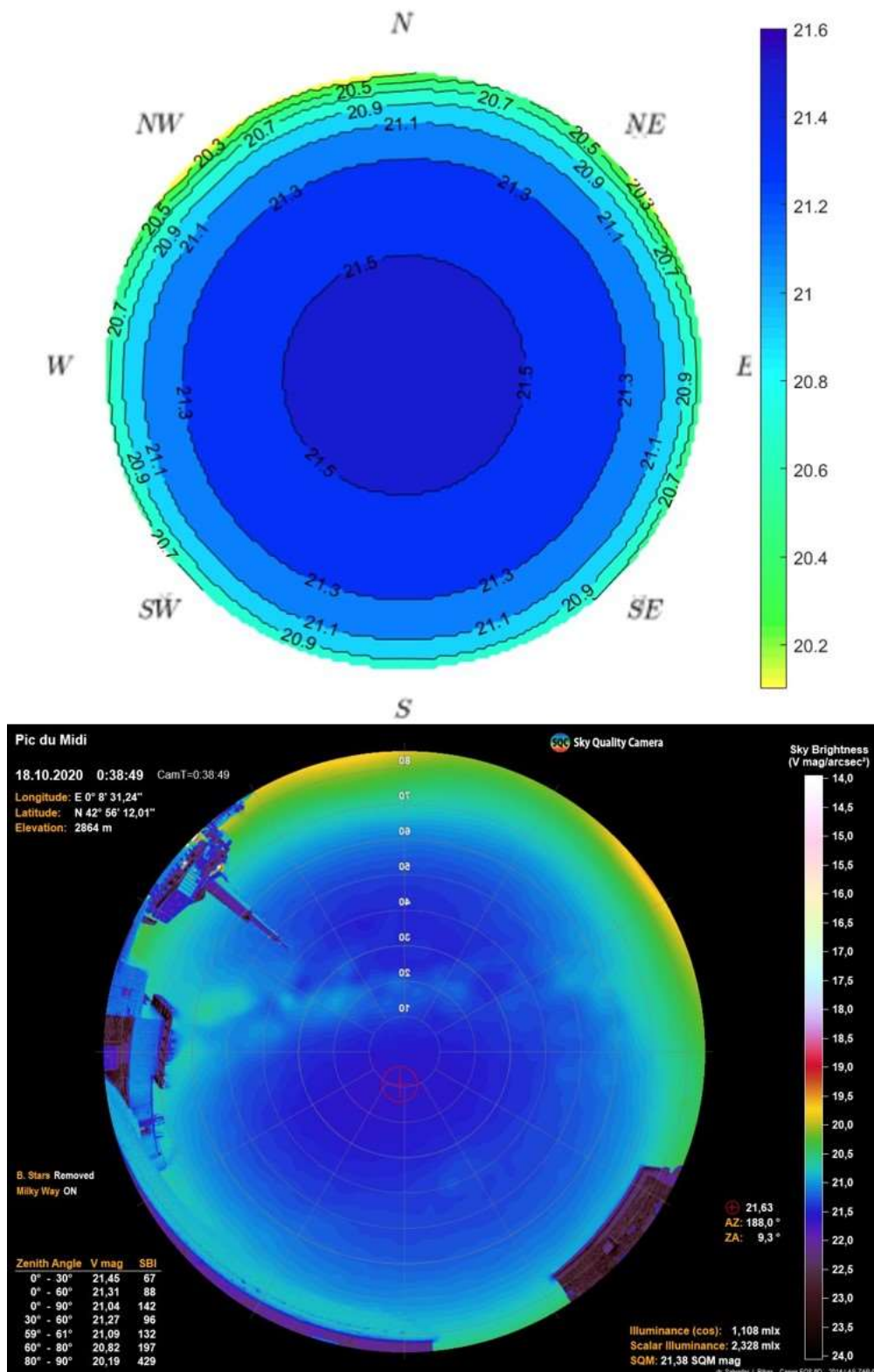


Figura 4.3. Mapas all-sky del brillo del cielo sobre el Pic du Midi. Arriba: mapa simulado con Illumina. Abajo: mapa SQC modificado.

4.2. Valle del Roncal

4.2.1 Mapas de contribución

El Valle del Roncal es una comarca de la Comunidad Foral de Navarra ubicada en el tercio occidental de los Pirineos. Inicialmente el punto escogido para el estudio del cielo en esta zona estaba situado en los alrededores del refugio de Belagua a 1428 metros de altura, pero durante de la toma de medidas comprobamos que no era una buena elección debido a que gran parte del horizonte estaba tapado por las montañas de alrededor. La localización final está situada unos 5 km al noreste prácticamente sobre la línea fronteriza con Francia a 1773 metros por encima del nivel del mar.

La población más cercana es Izaba en dirección suroeste a unos 11 km, un núcleo muy reducido que no llega a los 500 habitantes. A unos 19 km en dirección noreste se encuentra la ciudad de Arette, de poco más de 1000 habitantes. Sin embargo, dentro del mismo municipio, en el extremo sur, se encuentra la estación de esquí de Pierre Saint Martin, que es el principal foco de luz artificial del municipio. A 20 km hacia el este se encuentra la población de Bedous de casi 600 habitantes.

La población más cercana de más de 10.000 habitantes es Olorons Saint Marie, a poco más de 30 km hacia el noreste. Jaca, de casi 13.000 habitantes, se encuentra a casi 50 km hacia el sureste. Pau, de casi 80.000 habitantes, se encuentra a 50 km hacia el noreste y Pamplona, de casi 200.000 habitantes, es la ciudad de grandes dimensiones más cercana, a 65 km hacia el suroeste.

El Valle del Roncal se ve afectado principalmente por fuentes de luz situadas a media distancia, entre 20 y 60 km. Las fuentes de luz más cercanas salvo alguna excepción son tan pequeñas que casi no perturban el brillo del cielo. Como se puede ver en los mapas de contribución (Figura 4.4) y en la Tabla 4.2, hay dos municipios que tienen una contribución muy por encima de las demás: Olorons Sainte Marie y Pau. Ambos se encuentran en dirección noreste, así como otras fuentes de contaminación también importantes como Arette y Lons, por lo que se espera que esta dirección sea la que presente unos valores más brillantes. Aunque Pau es mucho mayor que Olorons Sainte Marie, se encuentra prácticamente al doble de distancia, teniendo pues una contribución menor. Destacan también las contribuciones de las ciudades de Jaca y Pamplona. Es de esperar que en el mapa simulado y especialmente en las imágenes SQC se vea una pequeña cúpula de luz en las direcciones de estas dos ciudades.

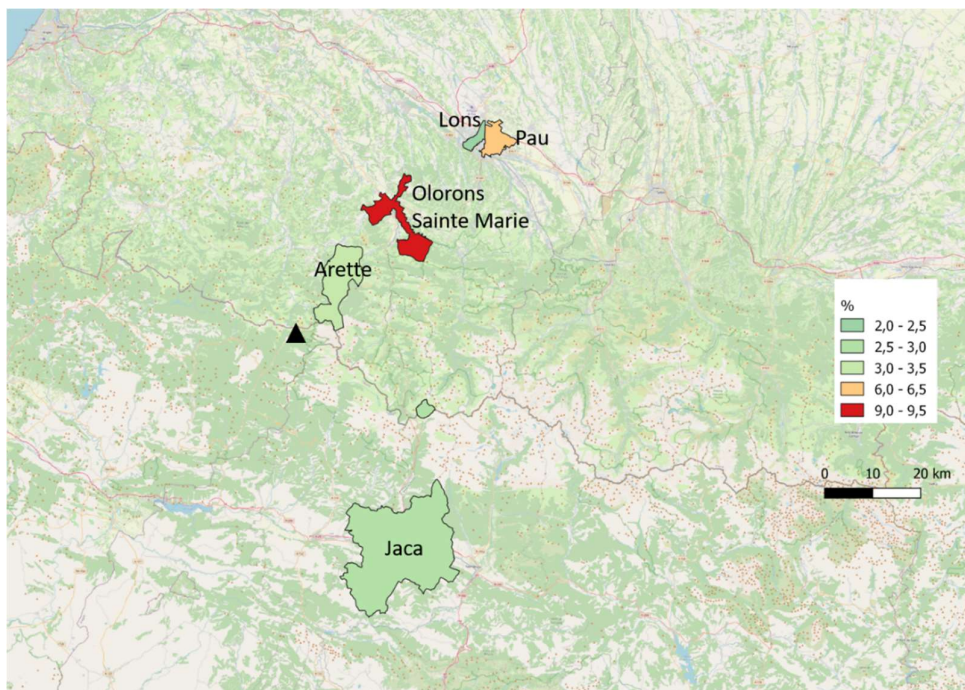
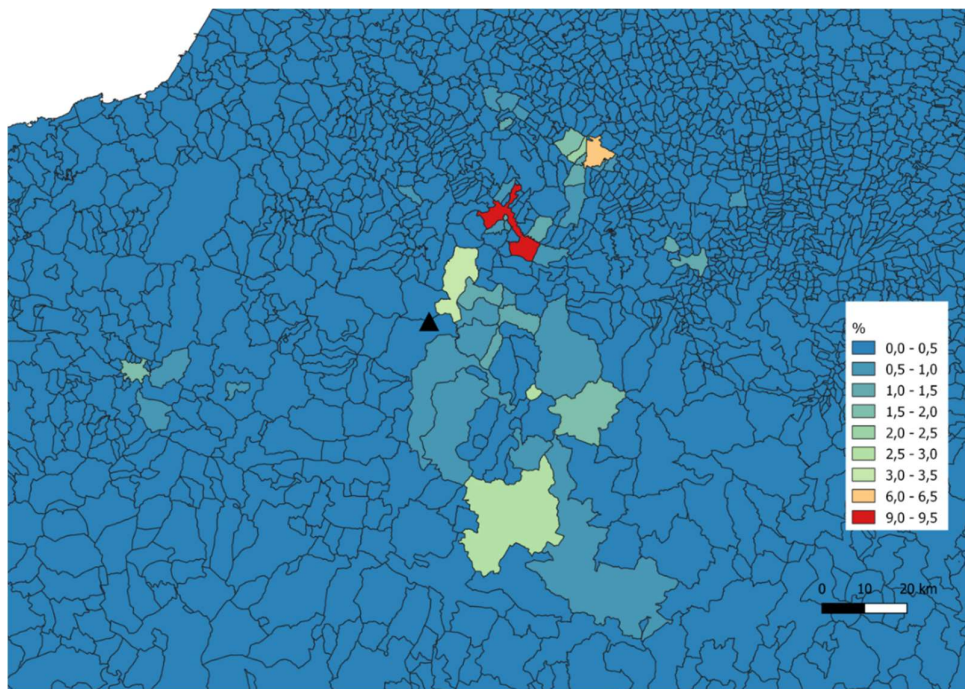


Figura 4.4. Mapas de contribución porcentual al brillo artificial recibido en todo el cielo para el filtro V en el Pico Larra. Arriba: todos los municipios. Abajo: los municipios con una contribución superior al 2%.

Tabla 4.2. Listado de los 10 municipios con más contribución al brillo artificial sobre el cielo del Pico Larra ordenados de mayor a menor contribución.

#	Municipio	Contribución (%)
1	Olorons Sainte Marie	9,23
2	Pau	6,11
3	Arette	3,50
4	Jaca	2,80
5	Lons	2,14
6	Lescar	1,97
7	Pamplona	1,74
8	Sallent de Gállego	1,61
9	Billère	1,42
10	Bedous	1,41

4.2.2 Imágenes SQC

Las restricciones de movilidad a causa de la pandemia SARS-COV-2 junto a la falta de noches con cielo despejado en la zona retrasaron más de ocho meses las mediciones. La toma de imágenes en el Valle del Roncal tuvo lugar finalmente el 7 de abril de 2021.

A parte de las direcciones afectadas por la presencia de la vía láctea al oeste del zénit, el brillo de cielo por encima de 30° en elevación supera los $21.0 \text{ mag/arcsec}^2$ (véase figurar 4.5). El patrón de brillo coincide con lo esperado en el sentido que las direcciones más próximas al zénit son las más oscuras. En concreto, el valor más oscuro se encuentra ligeramente desplazado del zénit hacia el noreste con un valor de $21.97 \text{ mag/arcsec}^2$. La estimación del valor SQM es de $21.64 \text{ mag/arcsec}^2$ que representa un cielo excepcionalmente oscuro.

Se observan cuatro direcciones principales de contaminación lumínica cerca del horizonte:

- Hacia el noroeste se aprecia una cúpula de contaminación lumínica que se extiende en azimut más de 20° con valores de brillo que llegan a $18.50 \text{ mag/arcsec}^2$. Las fuentes principales son Pau, Olorons St. Marie y Lons.
- Hacia el este noreste se encuentra una cúpula de luz pequeña pero brillante con valores alrededor de $19.00 \text{ mag/arcsec}^2$. Las fuentes principales son la estación de esquí de Pierre St. Martin y en menor medida Tarbes.
- Hacia el noroeste se distingue una región con valores entre 19.50 y $20.00 \text{ mag/arcsec}^2$. En el mapa de contribución no se destaca ninguna fuente en esta dirección, como en el caso del Pic du Midi probablemente es debido a ciudades lejanas que solo afectan una región muy reducida de la cúpula celeste. En este caso las fuentes más probables son Bayona, Donostia e Irún.
- Hacia el suroeste, como habíamos previsto, Pamplona aumenta el brillo de cielo. En esta dirección se observa una cúpula de luz con valores ligeramente por encima de $20.00 \text{ mag/arcsec}^2$.

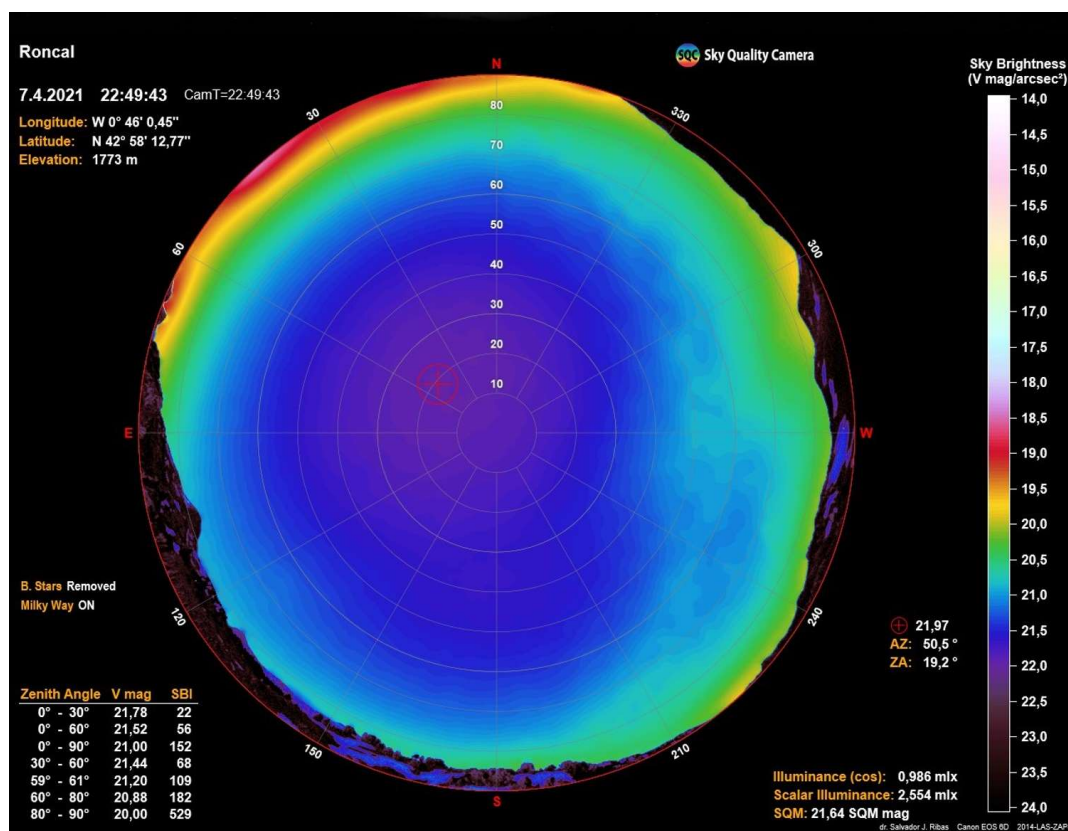


Figura 4.5. Imagen all-sky procesadas con SQC del cielo sobre el Valle del Roncal. Se muestra el brillo del cielo en magnitudes astronómicas en el filtro V de Johnson-Cousin.

4.2.3 Mapas all-sky

Para la elaboración del mapa simulado de brillo del cielo sobre el Pico Larra (Figura 4.6) se han tenido en cuenta todas las fuentes de luz en un radio de 60 km, así como las ciudades de Pamplona, Bayona, Donostia, Irún y Tarbes. Estas ciudades debido a lo observado en las imágenes SQC.

El mapa simulado presenta un patrón de brillo que se asemeja a círculos concéntricos alrededor del zénit. Al igual que en las mediciones se observa un cielo muy poco contaminado por encima de 30° con valores del brillo superando los 21.00 mag/arcsec². EL valor más oscuro está alrededor de 21.70 y concide con el zénit. El valor de las mediciones es de 21.97 mag/arcsec², cabe recordar que para las condiciones atmosféricas que hemos impuesto para las simulaciones el valor de brillo natural es de 21.80 mag/arcsec² por lo que se deduce que las condiciones atmosféricas durante la toma de imágenes no coincide con la descrita en la metodología.

Las dirección más contaminadas es hacia el noreste, con un valor de $20.0 \text{ mag/arcsec}^2$, donde se encuentran alineadas Olorons Sainte Marie, Pau, Lons y Arette. El valor de medido es de $19.89 \text{ mag/arcsec}^2$.

Hacia el nordeste se observa una cúpula secundaria con un valor simulado de $20.30 \text{ mag/arcsec}^2$ y medido de $20.10 \text{ mag/arcsec}^2$. Esta dirección apunta hacia la estación de esquí de Pierre St. Martin y la ciudad de Tarbes que contribuye en menor grado. Hacia el suroeste, los dos mapas tienen valores cercanos a $20.50 \text{ mag/arcsec}^2$, en la dirección de Pamplona.

Los mapas presentan una discrepancia no negligible hacia el noroeste. Las imágenes SQC presentan una cúpula de luz en esta dirección que es inexistente en el mapa simulado (se ha incluido las principales fuentes de luz en esa dirección, que son Bayona, Donostia e Irún). Es probable que nubes lejanas en esa dirección estén aumentando la afectación en el cielo de estas ciudades.

No hay una dirección que destaque como la menos contaminada. Las regiones alrededor del sureste y del sur presentan valores de brillo de $20.80 \text{ mag/arcsec}^2$. Cabe destacar la casi nula contaminación proveniente de Izaba, la población más cercana situada hacia el sur.

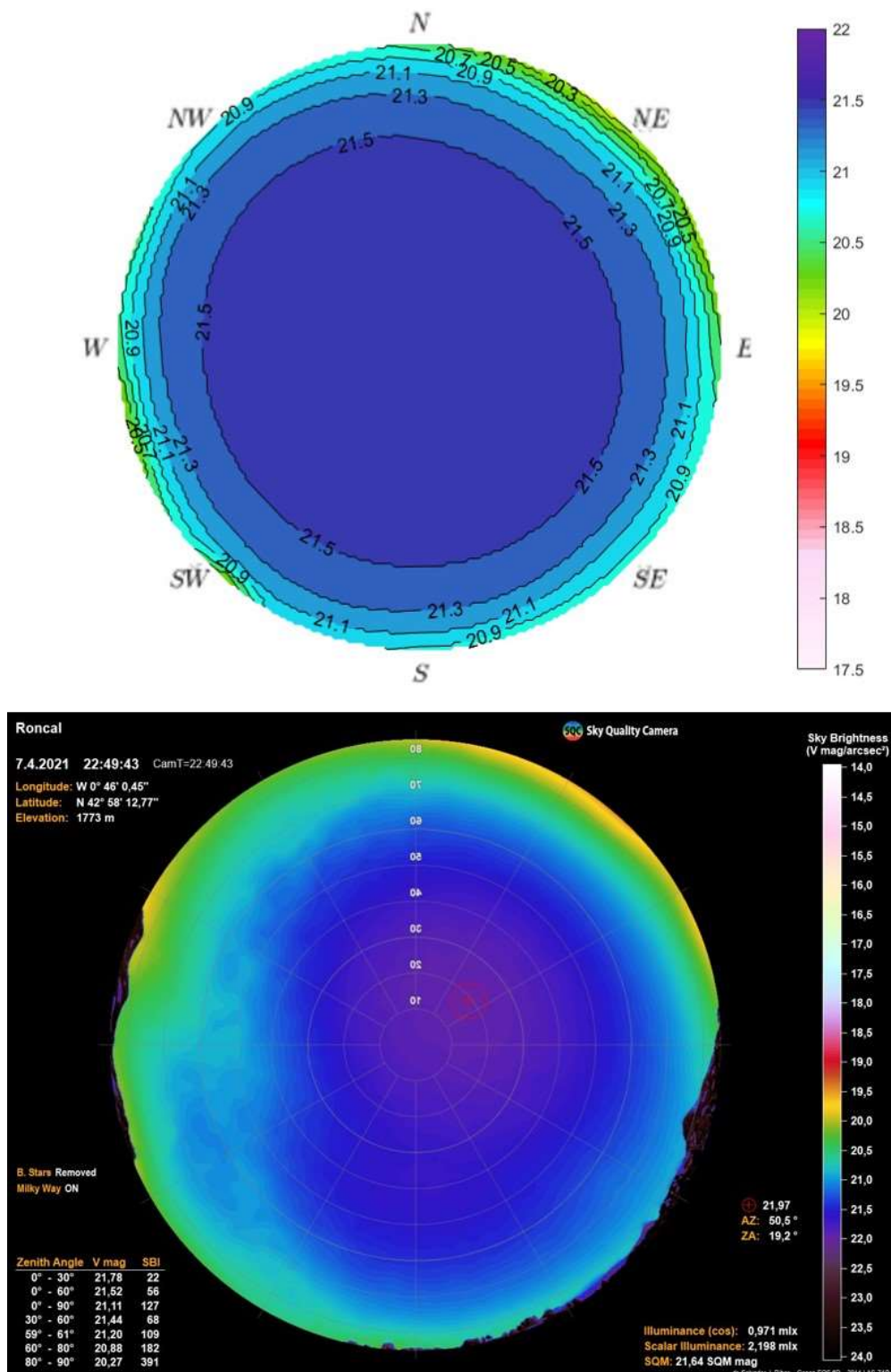


Figura 4.6. Mapas all-sky del brillo del cielo sobre el Valle del Roncal. Arriba: mapa simulado con Illumina. Abajo: mapa SQC modificado.

5. Conclusiones

El objetivo del informe es el estudio del brillo del cielo sobre dos ubicaciones: el Pic du Midi de Bigorre y el Pico Larra. Para ello se han utilizado tres métodos distintos: mapas de contribución por municipio, imágenes fotográficas procesadas y simulación del brillo cielo. Todos resultados se centran en el filtro V del sistema Johnson-Cousin que está relacionado con la visión humana.

Los mapas de contribución nos dan información sobre que cuáles son las fuentes que están contaminando el cielo que queremos medir. Se han realizado usando el método presentado por Bará y Lima (2019) añadiendo las modificaciones presentadas en Linares (2020). Los mapas de las dos ubicaciones se han realizado con éxito. Se muestra que hay dos variables que dominan la contribución de las fuentes, distancia y tamaño. A medida que crece la distancia entre la fuente y el punto de medida la contribución de dicha fuente se reduce. Para la misma distancia, fuentes más intensas (normalmente relacionadas con el tamaño de la población) contribuyen más.

Las imágenes fotográficas se han procesado con el sistema SQC (Sky Quality Camera) usado y validado en varios estudios relacionados con la contaminación lumínica. El resultado es un mapa de toda la bóveda celeste (all-sky map) que muestra los valores de brillo en cada dirección. Sólo se han podido tomar imágenes en el Pic du Midi, se tomaron tres conjuntos de imágenes des de puntos diferentes la noche del 17 al 18 de octubre de 2020. Debido a las restricciones de movilidad debidas al SARS-COV-2 y la falta de noches de cielo despejado en el Pico Larra no se han podido tomar imágenes aún en este emplazamiento.

La simulación de brillo del cielo hace referencia a la creación de all-sky maps parecidos a los obtenidos con imágenes procesadas por SQC. En este caso en vez de medir el cielo directamente se usa un modelo numérico de contaminación lumínica para estimar el brillo del cielo en un punto dado. Para este estudio se ha usado el modelo de contaminación lumínica más preciso hasta el momento, Illumina. Este modelo obtiene información sobre intensidad de las fuentes emisoras usando imágenes de satélite, se calcula la interacción de la luz de esta fuente con los componentes de la atmosfera hasta ser recibido en el punto de estudio. La definición de las condiciones meteorológicas y de las fuentes es flexible, permitiendo así reproducir en gran medida la situación real. Se han simulado imágenes all-sky para las dos ubicaciones estudiadas. En ambos casos se los mapas all-sky son coherentes con la información obtenida con los mapas de contribución y con las imágenes procesadas con SQC.

Tanto el Pic du Midi como el Pico Larra presentan un cielo oscuro y, por lo tanto, poco contaminado en cualquier azimut a partir de 30 grados en elevación. El valor de brillo en el zénit en ambos casos es ligeramente más brillante que el valor de cielo natural, aproximadamente 0.20 y 0.10 magnitudes astronómicas para el caso del Pic du Midi y Pico Larra respectivamente. Se observa una tendencia esperada con el grado de elevación, existe un aumento del brillo del cielo a medida que las direcciones se aproximan al horizonte.

El Pic du Midi se ve afectado principalmente por fuentes cercanas, situadas dentro de un radio de 30 km. Destacan Lourdes, Tarbes, Pay y Bagnères de Bigorre. La ciudad de Toulouse aparece sólo en las imágenes SQC, donde la dirección hacia esta fuente presenta una cúpula de luz claramente distinguible. La hipótesis más plausible es que la presencia de nubes alta sobre la ciudad en el momento de la toma de imágenes haya magnificado su contribución al brillo del cielo en esa dirección.

El Pico Larra por otra parte tiene sus principales fuentes de luz artificial a una distancia media, entre 20 y 60 km. Destacan Olorons Sainte Marie, Pau, Lons, Jaca y Pamplona. Las cuatro primeras fuentes están alineadas respecto al punto de estudio, esto propicia que hacia esta dirección, noreste, encontremos la mayor presencia de contaminación lumínica. La ciudad de Pamplona, a pesar de estar situada a más de 65 km tiene un efecto distinguible sobre el cielo del Pico Larra en dirección suroeste. Se observa una discrepancia entre las mediciones y el mapa simulado hacia el noroeste que es provocado probablemente por la presencia de nubes lejanas que aumentan el radio de afectación de ciudades como Irún, Donostia y Bayona.

Referencias

Aubé, M., Franchomme-Fossé, L., Robert-Staehler, P., & Houle, V. 2005, in Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring, Vol. 5890, International Society for Optics and Photonics, 589012

Aubé, M., Simoneau, A., Wainscoat, R., & Nelson, L. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 478, 1776

Bará, S., & Lima, R. 2018, International Journal of Sustainable Lighting, 20(2),51

Bará, S., Tapia, C., & Zamorano, J. 2019, Sensors, 19(6), 1336

García-Saenz, A., Sánchez de Miguel, A., Espinosa, A., et al. 2018, Environ Health Perspect., 126(4).

Johnson, H., & Morgan, W. 1953, The Astrophysical Journal, 117, 313

Johnson, H., & Morgan, W. 1955, Ann. Astrophys, 18, 292

Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., et al. 2017, Science Advances,3, doi:10.1126/sciadv.1701528.

Linares, H., Masana, E., Ribas, SJ., Aubé, M., Simoneau, A., & Bará, S. 2020. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 249, 106990, ISSN 0022-4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106990>.

Treanor, P. J. 1973, The Observatory, 93, 117