



**UNIVERSIDAD
DE LA SERENA**
CHILE

VICERRECTORIA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS Y POSTTULOS

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA

**Caracterización de los Cielos de la Región
Estrella: Análisis cuantitativo del brillo superficial
y extinción atmosférica desde sitios de interés
astronómico, naturalístico y turístico.**

Tesis presentada para optar al Grado
Académico de Magíster en Astronomía.

AUTOR: JUAN PABLO UCHIMA TAMAYO

INVESTIGADOR PATROCINANTE: RODOLFO ANGELONI

La Serena, Chile, 2 de Julio del 2021

CONSTANCIA

Don

HACE CONSTAR:

Que el trabajo correspondiente a la presente Tesis de Magíster, titulada “Caracterización de los Cielos de la Región Estrella: Análisis cuantitativo del brillo superficial y extinción atmosférica desde sitios de interés astronómico, naturalístico y turístico.”, ha sido realizada por Juan Pablo Uchima Tamayo, bajo mi dirección.

Para que conste y en cumplimiento de las normativas vigentes de la Universidad de La Serena, Chile, firmo el presente documento en La Serena, Chile, mes julio del 2021.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN ASTRONOMÍA

TÍTULO : CARACTERIZACIÓN DE LOS CIELOS DE LA
REGIÓN ESTRELLA: ANÁLISIS CUANTITATIVO
DEL BRILLO SUPERFICIAL Y EXTINCIÓN
ATMOSFÉRICA DESDE SITIOS DE INTERÉS
ASTRONÓMICO, NATURALÍSTICO Y TURÍSTICO.

PRESENTADA POR : JUAN PABLO UCHIMA TAMAYO

DIRECTOR DE TESIS: RODOLFO ANGELONI

TRIBUNAL CALIFICADOR

El tribunal de tesis, conformado por:

PRESIDENTE :

MIEMBROS DEL TRIBUNAL: *

*

*

ACUERDAN OTORGARLE LA CALIFICACIÓN DE:

La Serena, Chile, **2 de Julio del 2021**

Dedicatoria

*Dedicado a
Mis abuelas, Isabel Cristina y Rosa
por su apoyo incondicional desde la distancia.*

Agradecimientos

Quiero decirle gracias:

Mis padres, Martha y Carlos, por permitirme seguir cumpliendo mis sueños. Ellos con su amor y apoyo me han permitido estar en Chile, incluso desde la distancia y en los momentos más difíciles han estado brindándome la mano para salir adelante con todas las dificultades. Quiero agradecer a mis abuelas porque aunque nunca entendieron por qué debía salir de Colombia para estudiar han estado para mí con todos sus consejos y experiencias para los retos que me ponía la vida.

Al Profesor Rodolfo Angeloni porque desde el día uno en Chile que entre a molestar a su oficina, ha estado brindándome todo su apoyo incondicional no solo en lo académico, sino también en lo personal. Además por tenerme toda la paciencia durante el desarrollo de este trabajo y por creer en mí, incluso cuando yo no creía en poder lograr las cosas.

A Pedro Sanhueza director de la Oficina de Protección de Calidad del Cielo del Norte de Chile por apoyarme y recibir a trabajar con toda la buena disposición desde el primer día. Adicionalmente, por todas las enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo y por el préstamo de los equipos con los que pude obtener los datos del proyecto.

A los profesores y compañeros que durante la carrera guiaron y apoyaron en este proceso académico. Resaltando el apoyo de mi compañera Piera que

siempre me ha brindado sus consejos. Finalmente, la Universidad y en particular al programa de apoyo DIDULS por la beca de arancel con la cual pude estudiar.

Resumen

La contaminación lumínica se puede evidenciar como el aumento del brillo del cielo nocturno, por reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y en las partículas del aire urbano, disminuyendo la visibilidad de las estrellas y demás objetos celestes. Las principales fuentes emisoras de contaminación lumínica son el alumbrado público, el alumbrado publicitario y el deportivo. Asimismo, actividades como la construcción o la minería pueden constituir fuentes de contaminación lumínica. No obstante, aunque la contribución del alumbrado privado (casas, patios, terrazas, etc) sea mínima, sigue siendo otra fuente de contaminación. Dependiendo del tipo de luz utilizada se puede ver afectada la calidad de los cielos nocturnos; cuanto más azul sea la fuente, mayor es el daño a los cielos nocturnos debido a la dispersión que se provoca en la atmósfera. De igual forma, la ubicación o la dirección hacia la cual se dirige la iluminación es otra de las causas de contaminación lumínica, así como también la luz emitida en ángulos cercanos al plano horizontal provoca mucho mayor daño que aquellas emisiones dirigidas al zenit.

Chile se ha transformado en el lugar más importante en el mundo para la observación astronómica. Esto se debe a la transparencia de los cielos de la zona norte, así como también a las escasas precipitaciones en dicha región. Sin embargo, la mala iluminación exterior de los centros poblados, carreteras, actividades mineras, etc. Provoca que los observatorios se vean cada vez más afectados por la contaminación lumínica, lo que implica un incremento en el brillo nocturno que impacta negativamente en la calidad de los cielos para la observación astronómica. Es por esta razón que buscamos generar el primer

mapa cuantitativo de brillo superficial¹ ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) desde sitios de interés astronómico, naturalístico y turísticos en la Región de Coquimbo, región que en virtud de la calidad de sus cielos es conocida en el mundo también como Región Estrella.

Desde el año 1999, Chile cuenta con una norma ambiental cuyo objetivo es prevenir la contaminación lumínica de los cielos nocturnos de la zona norte. Esta norma se revisó nuevamente en el 2012 para establecer mayores exigencias y ampliar las fuentes reguladas e incluyendo nuevas tecnologías de iluminación². En el 2014, la norma entró en vigencia restringiendo la emisión de flujo radiante hacia el hemisferio superior por parte de las fuentes emisoras, es decir, deben ser instaladas en ángulo recto, evitando todo tipo de emisión de luz hacia el hemisferio superior. También, se restringe la sobreiluminación y se limita la emisión espectral, favoreciendo el uso de luz blanca cálida sobre la luz fría, pues el contenido de radiación azul de esta última es altamente perjudicial.

A pesar de la relevancia estratégica que la Región Estrella tiene para la Astronomía Mundial, no existe aún un estudio cuantitativo, sistemático y prolongado en el tiempo de la contaminación lumínica. La Universidad de La Serena (ULS) y la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC) deciden desde el 2019 trabajar en conjunto en temas de normativas, fiscalización y soportes a mesas ministeriales para el control de la contaminación lumínica. Sin embargo, en el marco de este esfuerzo institucional e interdisciplinario, esta tesis tiene como objetivo cuantificar la contribución de la Luz Artificial Nocturna de las ciudades más cercanas a los Observatorios Las Campanas, ESO La Silla, el Parque Nacional Bosque Fray Jorge y el Cerro Grande de La Serena, mientras que los demás miembros del equipo ULS-OPCC se van a encargar de otros sitios de interés astronómico como: cerro Paranal, cerro

¹Para conceptos y definiciones, se sugiere ver el Sección 1.2

²<https://luminica.mma.gob.cl/norma-luminica/>

Pachon, cerro Tololo y otros sitios de interés naturalístico, así como también de otros ámbitos (e.g., la iluminotecnica). En esta tesis analizamos los mapas de brillo superficial y los mapas temperatura de color correlacionada de los tres canales espectrales de la cámara DSLR: estos nos permitieron estudiar en detalle la distribución del Brillo del Cielo Nocturno. Finalmente, nuestros resultados se suman a todos los esfuerzos mundiales por la comprensión de la Luz Artificial Nocturna, sin embargo, para Chile representa un primer esfuerzo científicamente sistemático, por proteger y preservar los cielos oscuros que son patrimonio natural de todos.

Summary

Light pollution can be seen as an increase in the night sky brightness, due to the reflection and diffusion of artificial light in the gases and particles of urban air, reducing the visibility of stars and other celestial objects. The main sources of light pollution are streetlights, advertising lights, lighting of sport and leisure facilities. Activities such as construction or mining can also be sources of light pollution. Depending on the type of light used, this may affect the quality of the night sky; the bluer the source, the greater the damage to the night sky due to the scattering caused in the atmosphere. Another cause of light pollution is the direction of the illumination, because the damage caused by the light emitted at an angle close to the horizontal plane is much greater than the damage caused by the emission directed to the zenith..

Chile has become the most important place in the world for astronomical observation. This is due to the transparency of the skies in the north, as well as the scarcity of rainfall in that region. However, bad external lighting in towns, roads, mining activities, etc. has caused the observatories to be affected by light pollution, which implies an increase in night sky brightness, thus affecting the quality of the skies for astronomical observation. For this reason that we seek to generate the first quantitative map of surface brightness ($mag/arcsec^2$) and atmospheric extinction (magnitude) from sites of astronomical, naturalistic, and tourist interest in the Coquimbo Region, that is characterized in particular by its dark skies.

Since 1999, Chile has had in place an environmental standard whose objecti-

ve is to prevent light pollution in the night skies of the northern zone full stop. This standard was revised again in 2012 to establish greater requirements and expand the regulated sources and include new light technologies³. In 2014 the standard came into force restricting the emission of radiant flux towards the upper hemisphere by the emitting sources, i.e., they must be installed at right angles, avoiding any type of light emission towards the upper hemisphere. Also, overlighting is restricted, and spectral emission is limited, suggesting the use of warm light over cold white light, whose radiation content in the blue zone is highly harmful.

In spite of the strategic relevance that the Star Region has for world astronomy, there is still no quantitative, systematic, and prolonged study of light pollution. La Universidad de La Serena (ULS) and la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC) have thus set a collaborative agreement on the issue of regulations, control and support for the Ministerial Conference to control light pollution. However, in the framework of this institutional and interdisciplinary effort, this thesis aims to quantify the contribution of Artificial Night Light from the cities closest to Las Campanas Observatories, ESO La Silla, Fray Jorge National Park, and Cerro Grande de La Serena, while other group members will be responsible for other sites of astronomical importance such as Paranal, Pachon, Tololo and other sites of natural interest, also from other fields (e.g., lighting technology). In this project we analyzed the brightness maps and CCT maps of the three spectral channels of the DSLR camera: these allowed us to study in detail the distribution of the Night Sky Brightness. Finally, our results add to all the worldwide efforts relating to the understanding of Artificial Night Light, however, for Chile, it represents the first scientifically systematic effort to protect and preserve the dark skies that are the natural heritage of all.

³<https://luminica.mma.gob.cl/norma-luminica/>

Contenido

I La Contaminación Lumínica como Fenómeno Antropogénico	1
1. Luz Artificial Nocturna (ALAN)	2
1.1. Impacto del ALAN	2
1.2. Conceptos de Luminotecnia	7
1.2.1. Flujo Luminoso	9
1.2.2. Intensidad luminosa	10
1.2.3. Iluminancia	11
1.2.4. Luminancia	12
1.2.5. Temperatura de Color Correlacionada	13
1.2.6. Características de la Visión Humana	14
2. Contribuciones al Brillo del Cielo Nocturno	16
2.1. Contribuciones Naturales	16
2.1.1. Luz Estelar Integrada	17
2.1.2. Luz Galáctica Difusa	17
2.1.3. Luz Zodiacal	18
2.1.4. Airglow	19
2.1.5. Auroras Polares	21
2.2. Contribuciones Artificiales	23
2.2.1. Manifestación de la Contaminación Lumínica	25
2.2.1.1. Skyglow	25
2.2.1.2. Intrusión Lumínica	28
2.2.1.3. Deslumbramiento	28

2.2.2. Tipos de Lámparas	28
3. ALAN como Área de Investigación Científica Interdisciplinaria	32
3.1. Modelamiento del ALAN	33
3.2. Datos de Satélites	37
3.3. Datos de Terreno	42
3.3.1. Datos Monodimensionales (1D)	42
3.3.1.1. The Sky Quality Meter (SQM)	42
3.3.1.2. The Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS)	44
3.3.2. Datos Bidimensionales (2D)	48
3.3.2.1. TESS Auto Scan (TAS)	48
3.3.2.2. The All Sky Transmission Monitor	49
3.3.2.3. DSLR con Lente Ojo de Pez	50
3.3.2.4. Sky Quality Camera	51
II Caracterización del ALAN en la Región Estrella	54
4. Sitios de Estudio	55
4.1. Observatorio Las Campanas	56
4.2. Observatorio ESO La Silla	58
4.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge	59
4.4. Conurbación La Serena-Coquimbo	60
5. Proceso de Adquisición y Reducción de los Datos	62
5.1. Adquisición de los Datos	63
5.1.1. Observatorio Las Campanas	65
5.1.2. Observatorio ESO La Silla	68
5.1.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge	70
5.1.4. Cerro Grande	72
5.2. Procesamientos de los datos	74
5.2.1. Calibraciones	74
5.2.2. Ubicación	75

5.2.3. Correcciones	76
5.2.4. Sustracciones	77
5.2.5. Fuentes de Contaminación	79
5.2.5.1. Identificación de las Fuentes de Contaminación	
Lumínica	81
5.2.6. Áreas de estudio	84
5.2.7. Datos Procesados	85
6. Análisis	86
6.1. Observatorio Las Campanas	86
6.1.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT	86
6.1.2. NSB en función de la elevación	91
6.2. Observatorio ESO La Silla	95
6.2.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT	95
6.2.2. NSB en función de la elevación	98
6.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge	100
6.3.1. Mapas de NSB y de Mapas CCT	100
6.3.2. NSB en función de la elevación	104
6.4. Cerro Grande	106
6.4.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT	106
6.4.2. NSB en función de la elevación	108
7. Resultados	110
7.1. Consistencia de la Cámara	110
7.2. Observatorio Las Campanas	111
7.3. Observatorio ESO La Silla	117
7.4. Parque Nacional Bosque Fray Jorge	118
7.5. Cerro Grande	119
7.6. La Conurbación La Serena/Coquimbo	120
8. Conclusiones	123

CONTENIDO	XII
III Proyectos a Futuro	126
9. Proyecto Doctorado	127
Bibliografía	131
IV Apéndices	144
A. Datos	146
B. Fotometría con Cámaras DSLR	149
B.1. Cámaras DSLR	149
B.1.1. Trayectoria óptica	150
B.1.2. Sensor de la Cámara	151
B.2. Lentes	153
B.3. Trípodes y monturas	154
B.3.1. Trípodes o monturas fija	154
B.3.2. Montura ecuatorial	154
B.4. Filtros y respuesta espectral	155
B.4.1. Cámara DLSR estándar (sin modificar)	155
B.4.2. Cámara DLSR Modificadas	155
C. Certificación Starlight	156
C.1. Procedimiento de certificación	157
C.2. Parque Nacional Bosque Fray Jorge	158
D. Escala de Bortle	166
E. Vinculación con el medio	168

Lista de Figuras

1.1. Disminución de la relevancia científica del Monte Wilson	4
1.2. Efectos de ALAN en los animales	6
1.3. Definición de ángulo sólido	8
1.4. Definición de intensidad específica	8
1.5. Flujo luminoso	10
1.6. Intensidad luminoso	11
1.7. Iluminancia	11
1.8. Luminancia	12
1.9. Ejemplo del Correlated Color Temperature	13
1.10. Curvas de sensibilidad del ojo a la radiación visible	15
2.1. Composición de la Vía Láctea	18
2.2. Luz Zodiacal	19
2.3. Capas de la atmósfera	20
2.4. Airglow	21
2.5. Auroras	23
2.6. Skyglow en las playas de La Serenas	26
2.7. Esquema dispersión de Rayleigh	27
2.8. Equivalencia de color de las lámparas	30
2.9. Salida espectral de diferentes tipos de fuentes de luz	30
2.10. Salida espectral de diferentes tipos de fuentes de luz	31
3.1. Mapa de contaminación lumínica	37
3.2. La Serena visto desde VIIRS	38

3.3. Mapa de contaminación lumínica	39
3.4. Comparación de una imagen área y una imagen DMSP de la ciudad de Berlín	40
3.5. Vista de Santiago, Chile	41
3.6. Características de un SQM	43
3.7. Comparación de las versiones SQM	44
3.8. Comparación de las versiones de TESS	45
3.9. Comparación de la respuesta espectral TESS, SQM y el cielo de Madrid	46
3.10. Dimensiones del fotómetros TESS-W	48
3.11. Visualización de los datos TAS sobre el oeste de la ciudad de Madrid, España	49
3.12. ASTMON del Observatorio Astronómico de la Universidad Com- plutense de Madrid	50
3.13. Sky Quality Camara	51
4.1. Panorámica del Observatorio Las Campanas	57
4.2. Panorámica del Observatorio ESO La Silla	58
4.3. Panorámica del Parque Fray Jorge	60
4.4. Densidad poblacional censada La Serena/Coquimbo	61
5.1. Proyecciones del software SQC	62
5.2. SQC en Terreno	64
5.3. Posiciones de la SQC en en los sitios de estudio	65
5.4. Condiciones climáticas de la noche del 24 al 25 de noviembre del 2019 desde el LCO	66
5.5. Mapa de todo el cielo desde las Campanas 25-11-2019.	67
5.6. Mapa de todo el cielo desde las Campanas 25-11-2019.	68
5.7. Condiciones climáticas la noche del 24-05-2019 desde ESO La Silla	69
5.8. Mapa de todo el cielo desde ESO La Silla 24-05-2019	70
5.9. Posición de la SQC en el Parque Fray Jorge	71

5.10. Mapa de todo el cielo desde BFJ acceso norte del parque	71
5.11. Mapa de todo el cielo desde BFJ localidad de Peral	72
5.12. Mapa de la bóveda celeste desde Cerro Grande	73
5.13. Diagrama de la metodología de la configuración de los parámetros de la SQC.	74
5.14. Calibraciones de la SQC	75
5.15. Visualización de los datos desde el software SQC	76
5.16. Ejemplo de la definición del parámetro de contorno	77
5.17. Formato RGB y los mapas CCT del software SQC	80
5.18. Delimitación de una región en el software SQC	81
5.19. Delimitación de una región en el World Atlas	82
5.20. Perfil de altimetría de La Serena	83
5.21. Fuentes de contaminación lumínica para el LCO	83
5.22. Ejemplo de áreas de trabajo del software SQC	84
5.23. Menú de descarga del software SQC	85
6.1. Mapas del cielo desde el LCO con MWD	88
6.2. Mapas del cielo desde el LCO con MWU	90
6.3. Perfiles de elevación de brillo en el LCO	92
6.4. Perfiles de elevación de brillo en el LCO	93
6.5. Perfil de distribución angular para el área V en el LCO	94
6.6. Perfil de distribución angular para el área V en el LCO	95
6.7. Mapas del cielo desde el LCO con MWD	97
6.8. Perfil de elevación en La Silla	99
6.9. Perfiles azimutales NSB y CCT en la Silla	100
6.10. Mapas del cielo desde el acceso norte del Parque Fray Jorge . .	102
6.11. Mapas del cielo desde el acceso norte del Parque Fray Jorge . .	103
6.12. Perfil de promedio de las áreas en el BFJ	104
6.13. Perfil de distribución angular para el área V en el BFJ	105
6.14. Mapas del cielo desde Cerro Grande	107
6.15. Perfil de distribución angular promedio de las áreas en la Silla .	108

6.16. Perfil de distribución angular para cerro grande	109
7.1. Comparación con diferentes valores de coeficiente extinción . .	112
7.2. Comparación del suavizado del software del SQC	113
7.3. Comparación del mapa del LCO con MWD desde GAMBONS y la observación realizada.	114
7.4. Comparación del mapa del LCO con MWU desde GAMBONS y la observación realizada.	114
7.5. Variación del NSB en el cenit del LCO desde las 22:18:48 hasta 03:46:55.	116
7.6. Variación del NSB en todas las áreas del LCO desde las 22:18:48 hasta 03:46:55.	116
7.7. Comparación del mapa de la Silla desde GAMBONS y la obser- vación realizada.	117
7.8. Comparación del mapa del BFJ camping desde GAMBONS y la observación realizada.	118
7.9. Comparación del mapa de cerro grande desde GAMBONS y la observación realizada.	120
7.10. Mapa de la Potencia del Alumbrado Público en La Serena . . .	122
9.1. Carta de adjudicación del proyecto	129
9.2. Primera luz espectrógrafo ARPAV	130
B.1. Esquema de una cámara DSLR	151
B.2. Ejemplo de una matriz de un sensor CMOS	152
B.3. Ejemplo de una matriz de un sensor CMOS	152
C.1. Informe Fray Jorge	160
C.2. Informe Fray Jorge	161
C.3. Informe Fray Jorge	162
C.4. Informe Fray Jorge	163
C.5. Informe Fray Jorge	164
C.6. Informe Fray Jorge	165

D.1. Escala de Bortle	166
E.1. Afiche de publicidad ASTROSERENA	169
E.2. Pantallazo de la versión en español de Loss of the Night	170

Lista de Tablas

3.1. Comparación entre las características técnicas del TESS-P y el TESS-W	47
3.2. Configuraciones técnicas SQC.	52
3.3. Tabla Tiempo de exposición	53
4.1. Crecimiento de población y área urbana de la conurbación La Serena-Coquimbo.	61
6.1. Tabla con información sobre las 4 Áreas de ALAN desde el LCO con MWD	89
6.2. Tabla con los límites de las 4 Áreas de ALAN desde LCO	89
6.3. Tabla con información sobre las 4 áreas de ALAN desde la Silla	96
6.4. Tabla con los límites de las 4 Áreas de ALAN desde la Silla . . .	96
6.5. Tabla con información sobre las 5 Áreas de ALAN desde BFJ . .	101
6.6. Tabla con los límites de las 5 Áreas de ALAN desde BFJ	101
6.7. Tabla con los límites de las 2 Áreas de ALAN desde Cerro Grande	106
7.1. Tabla con las potencia y tipo de luminarias de la municipalidad de La Serena hasta el 2017	121
8.1. Tabla con los valores de mínimo de brillo	124
A.1. Informe de las observaciones	148

Parte I

La Contaminación Lumínica como Fenómeno Antropogénico

Capítulo 1

Luz Artificial Nocturna (ALAN)

1.1. Impacto del ALAN

Durante miles de años, la humanidad ha estado fascinada por las estrellas (Romano, 2002). El cielo nocturno siempre ha contribuido a nuestra percepción del mundo natural (Dick, 2011) y ha desempeñado un papel destacado para el desarrollo de la ciencia, la tecnología aplicada y las humanidades, en todas las culturas a lo largo de la historia. El uso de la iluminación eléctrica artificial ha aumentado rápidamente en los últimos cien años, lo que ha permitido al ser humano desarrollar actividades en la noche. Sin embargo, el aumento del uso de la iluminación exterior durante la noche ha producido una degradación del cielo conocida como “contaminación lumínica ” (Teikari, 2007).

El término contaminación lumínica se utiliza para referirse a la poca visibilidad de las estrellas debido a la Luz Artificial Nocturna (ALAN, por sus siglas en inglés), es decir, la alteración de la oscuridad natural de la noche, provocada por luz desaprovechada, innecesaria o inadecuada, generada por el alumbrado de exteriores, tanto público como privado (Teikari, 2007). John Bortle utilizó la percepción que tenemos de las estrellas para medir la contaminación lumínica (Apéndice D). Por ejemplo, la Vía Láctea deja de ser visible en un cielo periurbano, lo que implica que dos tercios de la población estadounidense y más de la mitad de la europea han perdido la capacidad de observarla a

simple vista (Chepesiuk, 2009).

La contaminación lumínica supone una grave amenaza para la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones de los observatorios astronómicos profesionales y se reconoce hoy en día como un problema mundial (Falchi & Bará, 2020). Sin embargo, este fenómeno de exceso de luces artificiales que va dirigida hacia el cielo de forma directa o indirectamente ha sido una preocupación muy importante para la comunidad astronómica desde los años 70 (Walker 1973; Riegel 1973). Incluso, cada vez son más las investigaciones que se realizan periódicamente para monitorear el estado de pérdida de los cielos oscuros debido a las constantes transformaciones de los alumbrados (Kocifaj 2007; Cinzano et al. 2001; Aubé et al. 2005; Falchi et al. 2016).

Un ejemplo sobre como ALAN ha impactado negativamente fue lo que vivió el Observatorio del Monte Wilson¹, en la sierra de San Gabriel, en los alrededores de la ciudad de Los Ángeles, California. Este observatorio fue sin duda el observatorio más importante del planeta durante la primera mitad del siglo XX. Desde el Monte Wilson se hicieron descubrimientos astrofísicos tales como: la nebulosa de Andrómeda es externa la Vía Láctea (Hubble, 1925), la confirmación de la expansión del universo (Hubble & Humason, 1931), la evidencia de materia oscura (Zwicky, 1933), la distinción de las poblaciones estelares (Baade, 1944), entre otros. En cierto modo, el Observatorio del Monte Wilson fue en el siglo XX lo que es hoy el Norte de Chile.

El Observatorio del Monte Wilson era tan importante, que en los años 40 más de una cuarta parte de todos los artículos sobre astronomía publicados en el mundo mencionaban este observatorio por una u otra razón. Sin embargo, después de dos décadas, entre 1950 y 1970, se convirtió en un lugar prácticamente irrelevante para la astronomía mundial, como se aprecia en la Figura 1.1. Sin duda, una de las causas fue la contaminación lumínica, ya que du-

¹<https://www.mtwilson.edu/>

rante estos años el estado de California en Estados Unidos experimentaba un crecimiento urbano y a pesar de las múltiples advertencias hechas por los astrónomos del observatorio acerca de la pérdida de los cielos, no se controló ni reguló el brillo del alumbrado público (Osterbrock et al., 1976).

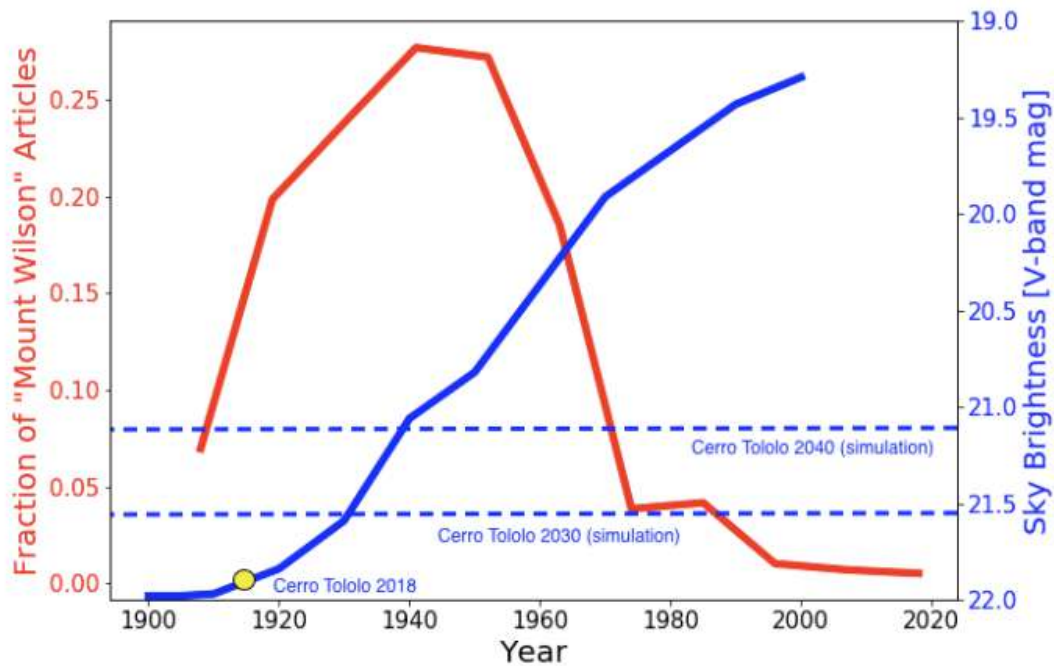


Figura 1.1: Disminución de la relevancia científica del Monte Wilson (curva roja) debido al aumento de la contaminación lumínica (curva azul). El punto amarillo y las líneas punteadas muestran la situación actual de Cerro Tololo en Chile y las proyecciones para dentro de 20 años, si los índices actuales de contaminación lumínica medidos aumentan.
(Martínez-Ledesma et al., 2019)

La nueva era de la iluminación de los diodos emisores de luz o LED (Light Emitting Diode, por su sigla en inglés) nos vuelve enfrentar ante la misma situación. Sin embargo, esta nueva era provocará mayores efectos a la astronomía debido al cambio en la distribución espectral de energía (SED) de la contaminación lumínica, lo que está ya resultando en el paso de algunas líneas de emisión, a cientos de líneas con un nivel de continuo significativamente mayor, especialmente en el rango espectral 470 nm a 550 nm. La comprensión del fenómeno ALAN ha sido considerado por mucho tiempo un problema exclusivo para investigaciones astronómicas y que no tenía ningún

efecto significativo sobre otros campos del conocimiento. No obstante, durante la última década ocurre una situación totalmente diferente, cada vez son más las investigaciones en otras disciplinas para comprender los efectos del ALAN.

Actualmente, se ha determinado que ALAN tiene una fuerte influencia en muchos seres vivos. Como todos sabemos, la mayoría de las plantas necesitan luz para vivir. La luz influye en las actividades fisiológicas y morfológicas e induce, entre otras cosas, la floración, la reproducción, el crecimiento y el reposo de plantas (Narisada & Schreuder, 2004). A pesar de esto, la luz artificial ha generado cambios en la fenología de las plantas: algunos árboles urbanos empiezan a vegetar antes y conservan sus hojas durante más tiempo bajo la influencia de la luz artificial que ilumina las calles por la noche (Briggs 2006; Ffrench-Constant et al. 2016; Massetti 2018). También ALAN afecta al éxito reproductivo de las plantas (Macgregor et al. 2015; Knop et al. 2017), y a muchos otros procesos (Schroer et al. 2019; Bennie et al. 2016).

Por otro lado, una amplia gama de animales también se ven afectados por ALAN (Grubisic et al., 2019). Una de las especies más afectadas son las crías de tortugas marinas (Figura 1.2), que en el momento de eclosionar los huevos en las playas confunden las luces artificiales cercanas a la costa con el reflejo de la Luna sobre el mar (Duarte et al., 2019). Otros ejemplos de especies afectadas son: los mamíferos (Stone et al. 2015; Straka et al. 2020), las aves (Da Silva et al. 2015; Cabrera-Cruz et al. 2019; Brei et al. 2016), los anfibios (Owens et al. 2020; McMahon et al. 2017) e invertebrados marinos y terrestres (Davies et al. 2016; Donners et al. 2018). ALAN tiene una influencia significativa sobre la reproducción de la fauna, la navegación, la búsqueda de alimento, la selección del hábitat, la comunicación y las interacciones sociales (Gaston et al. 2013; Bennie et al. 2016).

En lo que respecta al ser humano, la alteración del reloj circadiano puede causar trastornos del rendimiento, del estado de alerta, del sueño y del me-

tabolismo (Wright et al., 2001). La exposición a la luz por la noche suprime la producción melatonina (Gooley et al., 2011). Los niveles bajos de melatonina en la sangre pueden favorecer el crecimiento de cáncer, especialmente para los cánceres como los de mama y próstata (Glickman et al. 2002; Stevens 2009; Walker et al. 2020). Además, puede tener efectos negativos en varios trastornos como la diabetes y la obesidad (Haus & Smolensky 2006; Turek et al. 2005).



Figura 1.2: Crías de tortugas marinas expuestas a luz artificial. Fuente: Pau Marin, Revista Iluminet.

Otras disciplinas en las que la contaminación lumínica se puede ver involucrada en los últimos años son: la economía con modelos de consumo energético (Gallaway et al., 2010), la filosofía en la pérdida de un bien cultural como es el cielo (Gallaway, 2010), la educación con la enseñanza de nuevas técnicas para afrontar ALAN y la concientización de proteger los cielos oscuros (Percy 2001; Walker et al. 2010), la ética con la pérdida de tradiciones indígenas (Hamacher et al., 2020), el astroturismo como fuente de empleo (Sánchez-Medina et al., 2019), la ciencia ciudadana con el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles (Kyba et al. 2013; Schroer et al. 2018), las políticas con regulaciones y normas para evitar daños a salud humana y daños ecológicos (Morgan-Taylor, 2015), los retos de diseños en iluminación de interiores (Zielinska-Dabkowska, 2019) y la protección del territorio para preservar los cielos oscuros (Papalambrou & Doulos, 2019).

1.2. Conceptos de Luminotecnia

Para entender mejor los términos que se discutirán a lo largo de este trabajo, se consideró importante describir algunos conceptos, los cuales han sido basados en el libro (Rybicki & Lightman, 2008). Inicialmente, partimos con el siguiente concepto:

Ángulo Sólido: Es el ángulo espacial Ω que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica y mide el tamaño aparente de ese objeto (Wilson et al., 2008). El ángulo sólido para una superficie S orientada arbitrariamente subtendida en un punto P es igual al ángulo sólido de la proyección de la superficie S a la esfera unitaria con centro P , que se puede calcular como la integral de superficie:

$$\Omega = \int \int_S \frac{\hat{r} \cdot \hat{n}}{r^2} dS = \int \int_S \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1.1)$$

donde $\hat{r} = \vec{r}/r$ es el vector unitario correspondiente a $\vec{r}$, el vector de posición de un área infinitesimal de la superficie dS con respecto al punto P , y donde $\hat{n}$ representa la unidad de vector normal a dS . Así, uno puede aproximar el ángulo sólido subtendido por una pequeña área de superficie plana dS , orientación $\hat{n}$, y la distancia r del espectador como el que se observa en la Figura 1.3.

$$d\Omega = 4\pi \left(\frac{dS}{A} \right) (\hat{r} \cdot \hat{n}) \quad (1.2)$$

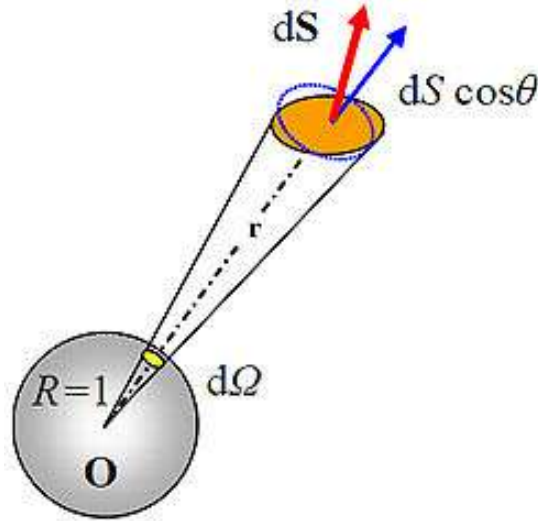


Figura 1.3: Ilustración de la definición de ángulo sólido. Fuente: <https://n9.cl/x3jtz>

Intensidad específica (I_v): Es la cantidad de energía transportada por la radiación en un intervalo frecuencia dv en un tiempo dt a través de una superficie dA y dentro de un ángulo sólido $d\Omega$, como se ve en la Figura 1.4. Las unidades de la intensidad específica son $[erg\ cm^{-2}\ s^{-1}\ Hz^{-1}\ ster^{-1}]$.

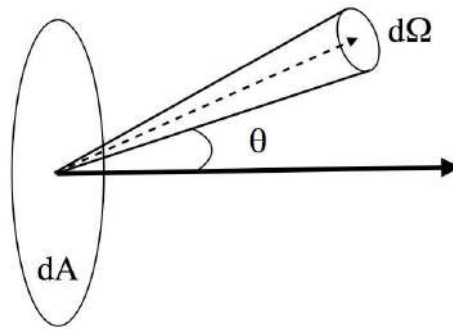


Figura 1.4: Ilustración de la definición de intensidad específica (Forgan, 2009).

Flujo radiativo (F_v): Representa la energía transportada procedente de todas las direcciones en un punto por unidad de superficie, de tiempo y de intervalo espectral (Ecuación 1.2). El término en coseno corresponde a $\hat{k} \cdot \hat{n} = \cos \theta$, siendo $\hat{k}$ la dirección de propagación de la radiación y $\hat{n}$ la normal al elemento del área emisor o receptor. Las unidades del flujo son $[erg\ cm^{-2}\ s^{-1}\ Hz^{-1}]$.

$$F_v = \int I_v \cos \theta d\Omega \quad (1.3)$$

Para fuentes distantes con flujo F_v , la intensidad promedio esta dada por lo siguiente: $\langle I_v \rangle = F_v / \Delta\Omega$, con $\cos \theta = 1$.

Una forma común de describir el flujo, especialmente en astronomía, es el sistema de magnitudes, definido de forma logarítmica.

$$m_v = -2,5 \log(F_v / F_{v0}) \quad (1.4)$$

con F_{v0} un flujo de referencia para la frecuencia v . El sistema de magnitudes se definió originalmente de manera que la estrella Vega tenga magnitud cero en las distintas bandas fotométricas.

Ahora, hay que recordar que la luz es una forma de energía y la energía se mide en Joule (J) en el Sistema Internacional de Unidades. Sin embargo, no toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume se convierte en luz, por lo que se ha de medir de otra forma y para ello definiremos nuevas magnitudes como: el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la iluminancia y la luminancia (Diez-Suárez et al., 2017), las cuales serán descritas a continuación.

1.2.1. Flujo Luminoso

El flujo luminoso (Φ) es la cantidad total de luz radiada en todas las direcciones por una fuente luminosa, durante la unidad de tiempo (Figura 1.5). Sin embargo, el efecto óptico de una fuente de luz no es descrito adecuadamente de esta manera, ya que la radiación entregada es captada sin diferenciación alguna en toda la banda de frecuencias, y porque no tiene en cuenta la sensibilidad espectral variable del ojo. Mediante la consideración de la sensibilidad espectral

del ojo se obtiene la magnitud llamada lumen (Ganslandt & Hofmann, 2011).

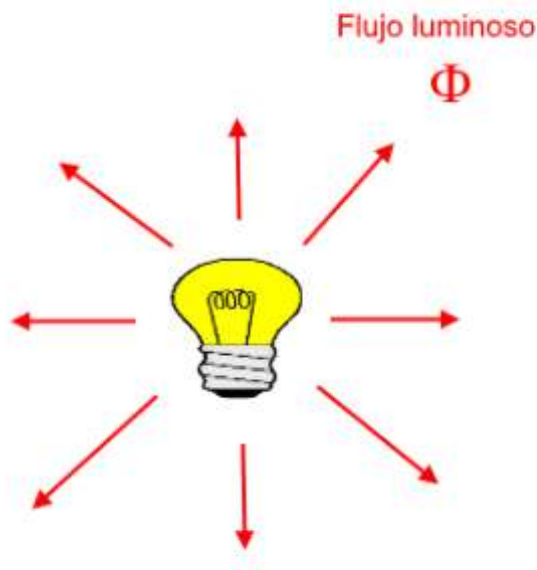


Figura 1.5: Ilustración del flujo luminoso. Fuente: <https://aflly.co/byh5>

lumen (lm): es la cantidad total de luz visible en un ángulo determinado, o emitida por una fuente dada.

1.2.2. Intensidad luminosa

La intensidad luminosa (I) es una medida para caracterizar una fuente de luz. Se define como el flujo luminoso Φ por unidad de ángulo sólido Ω (Figura 1.6). Este término se aplica principalmente con la aproximación de una fuente puntual, es decir, en distancias que son grandes en la extensión de la fuente. La cantidad análoga en procesos radiativos es la intensidad promedio. Las unidades en el Sistema Internacional de Unidades son la candela.

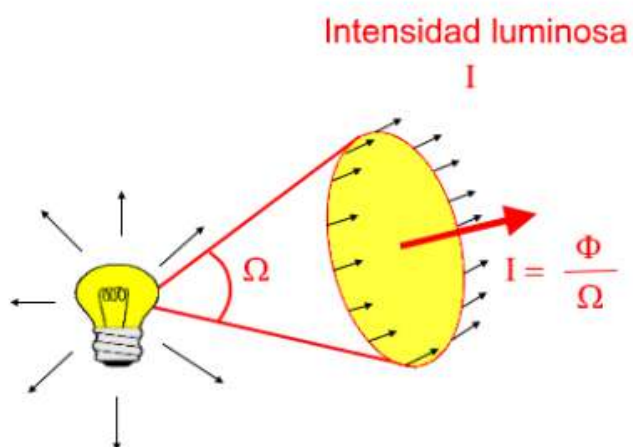


Figura 1.6: Ilustración de la intensidad luminosa. Fuente: <https://afly.co/byh5>

Candela: es la intensidad luminosa de una fuente puntual que emite un flujo luminoso de un lumen en un ángulo sólido de un estereorradián.

1.2.3. Iluminancia

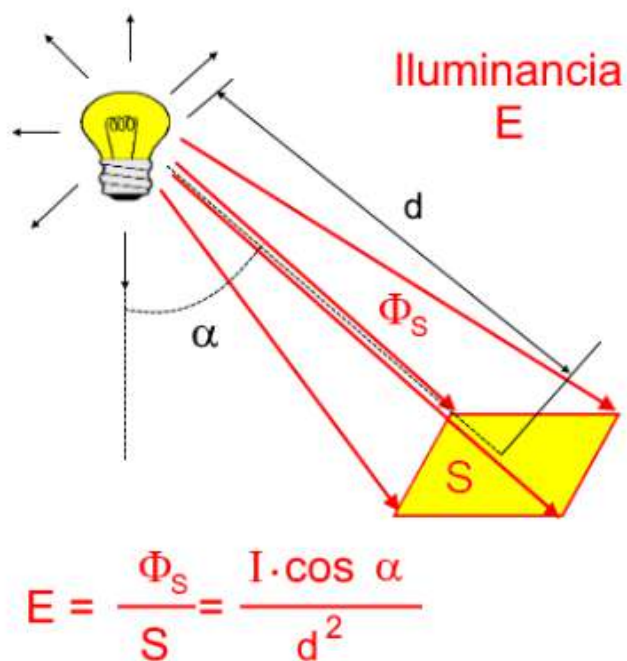


Figura 1.7: Ilustración de la iluminancia. Fuente: <https://afly.co/byh5>

La iluminancia E es el flujo luminoso que incide sobre una superficie Φ_S , es decir, cuanto se ilumina la superficie S (Figura 1.7). La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el lux.

Lux: es la cantidad de iluminación proporcionada cuando un lumen se distribuye uniformemente en un área de un metro cuadrado.

1.2.4. Luminancia

Hasta el momento solo hemos descrito magnitudes que informan sobre las propiedades de la fuente de luz (flujo luminoso e intensidad luminosa), sobre la luz que llega a una superficie, pero no hemos mencionado nada sobre la luz que llega al ojo (o a la cámara) que a la final es lo que percibimos. La luminancia L se define como la relación entre la intensidad luminosa I y la superficie aparente S vista por el ojo en una dirección determinada (Ganslandt & Hofmann, 2011). Su unidad de medida en el Sistema Internacional es la candela por metro cuadrado (cd/m^2).

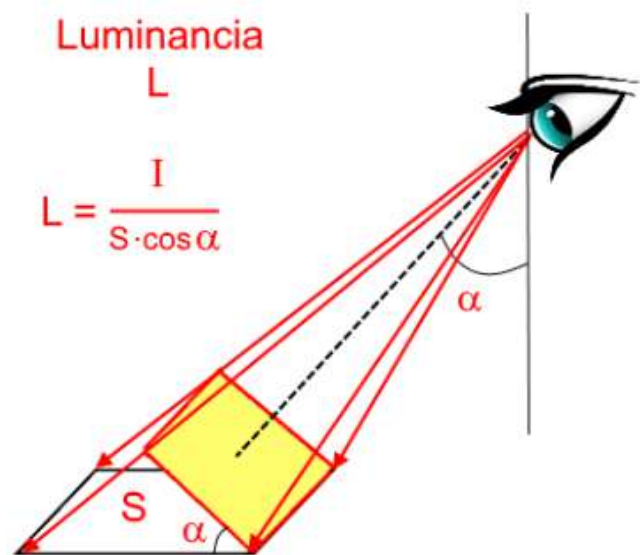


Figura 1.8: Ilustración de la luminancia. Fuente: <https://afly.co/byh5>

El brillo superficial es un concepto utilizado en astronomía para describir el

brillo aparente de objetos astronómicos, es decir, la podemos ocupar para describir la luminancia del cielo y se mide en $mag/arcsec^2$.

1.2.5. Temperatura de Color Correlacionada

La Temperatura de Color Correlacionada (CCT, Correlated Color Temperature por su sigla en inglés) es una magnitud que caracteriza el aspecto de color de una fuente de radiación. Se define como la temperatura termodinámica que tendría un cuerpo negro cuyo aspecto de color es más próximo al de la fuente en cuestión. La unidad de medida para CCT son los grados Kelvin. Cuanto más alto sea la CCT, más frío o más azulado se vuelve el tono de la luz. Una iluminación CCT más baja da como resultado un tono de luz más cálido y amarillento (Campos & Pons, 2015).

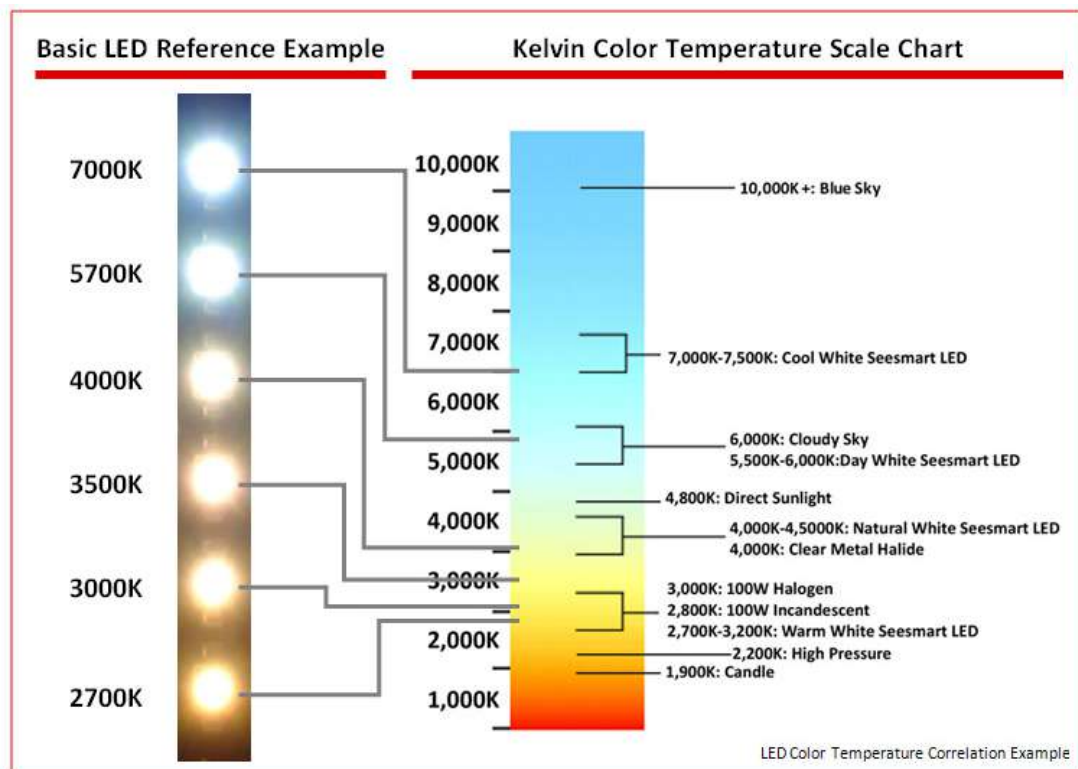


Figura 1.9: Ejemplo de CCT para diversas fuentes. Fuente: Seesmartled

1.2.6. Características de la Visión Humana

Las ondas electromagnéticas que son emitidas o reflejadas por un cuerpo y que son percibidas por el ojo humano como luz, son aquellas que se encuentran entre longitud de onda que van desde 400 nm hasta 700 nm. La visión humana puede clasificarse básicamente en tres tipos:

- **Visión Fotópica:** es la visión en condiciones de buena iluminación, que proporciona la percepción del color y que funciona principalmente debido a las células cónicas en el ojo. La visión fotópica se caracteriza por la interpretación del rango de colores por el ojo, esta interpretación de los colores es dado que existen 3 tipos de conos, que son sensibles a la luz, pero cada tipo de cono es sensible a una región específica dentro del espectro visible (rojo, verde, azul). El efecto de los tres conos combinados producen que el cerebro pueda interpretar colores (Thews & Mutschler, 1983).
- **Visión Escotópica:** es el tipo de percepción visual que se produce cuando los niveles de iluminación son muy bajos. La recepción de la luz se realiza principalmente con los bastones de la retina, estos se encuentran más espaciados en la retina y por ende la resolución (y agudeza visual) es más baja. Por otro lado, los bastones son muy sensibles al color verde del espectro (por lo que son completamente nulos para percibir el rojo). Este tipo de visión es considerada monocromática (Thews & Mutschler, 1983).
- **Visión Mesópica:** es un régimen intermedio entra la visión fotópica y la visión escotópica que se da en situaciones de iluminación que, sin llegar a ser de oscuridad no llegan a ser la luz que tenemos durante el día. Como resultado, actúan los conos y bastones de manera simultánea. Este es el régimen de visión que se utiliza en los crepúsculos, y también en la mayoría de las condiciones de luz artificial cotidianas.

La Figura 1.10 representa las Curvas de sensibilidad espectral para visión fotópica, visión escotópica y la visión mesópica. La visión fotópica (línea negra) tiene un pico de 555 nm, mientras que el pico de la visión escotópica (línea verde) es de 498 nm. La respuesta mesópica es una combinación de las dos, con un pico de 507 nm. Además, la comparación de la respuesta visual incluye la eficacia relativa expresada en lm/W. Esto indica que la eficacia visual relativa es mucho mayor en la región escotópica/mesópica que en la visión fotópica.

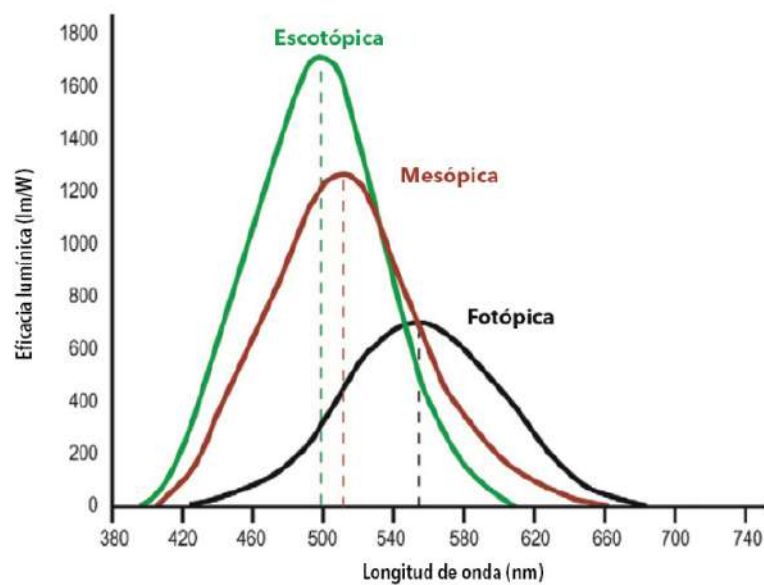


Figura 1.10: Respuesta de la distribución espectral de potencia humana a la luz. Fuente: Emerson Electric

Capítulo 2

Contribuciones al Brillo del Cielo Nocturno

El brillo del cielo nocturno (NSB, en inglés Night Sky Brightness) se refiere al brillo superficial o luminancia procedente del cielo nocturno. Las unidades típicas de NSB son la magnitud por segundo de arco cuadrado ($mag/arcsec^2$) o en el Sistema Internacional de medida la candela por metro cuadrado (cd/m^2). NSB es uno de los indicadores de contaminación lumínica debido a que es una combinación de la luz dispersa de fuentes de iluminación artificial y emisiones naturales.

2.1. Contribuciones Naturales

A continuación detallaremos las contribuciones naturales que aportan al NSB, las cuales se pueden clasificar dependiendo del origen donde son producidas:

- Fuentes extraterrestres: su origen es producido fuera de la Tierra, como por ejemplo, la luz estelar integrada, la luz galáctica difusa y luz zodiacal.
- Fuentes terrestres: es generado en la Tierra por la interacción de la luz con la atmósfera, como por ejemplo, airglow y auroras polares.

2.1.1. Luz Estelar Integrada

La luz combinada de estrellas no resueltas contribuye al brillo del cielo desde el ultravioleta hasta el infrarrojo medio, y la contribución está dominada por estrellas calientes y enanas blancas en las longitudes de onda más cortas, estrellas de la secuencia principal en longitudes de onda visuales y gigantes rojas en el infrarrojo (Mathis et al., 1983). Debido a esto, las estrellas de nuestra galaxia presentan un complejo patrón de luminosidad sobre la tierra, pero este patrón se mantiene casi sin cambios a lo largo de miles de años. Sin embargo, la contribución de la luz estelar integrada al brillo del cielo depende de la capacidad de un instrumento para resolver las estrellas más brillantes (Dunne, 2013). En nuestro caso el detector que ocupamos trabaja en la banda visual. Por lo tanto, el brillo se concentra en la región del cielo que cruza el plano galáctico donde el NSB varía desde un mínimo de $24.33 \text{ mag/arcsec}^2$ en dirección a la constelación de Auriga hasta un máximo de $21.59 \text{ mag/arcsec}^2$ en la zona de la constelación de Sagitario (Leinert et al., 1998).

2.1.2. Luz Galáctica Difusa

La luz galáctica difusa hace referencia a la componente difusa de la radiación de fondo galáctico que es producida por la dispersión de fotones estelares por los granos de polvo en el medio interestelar. Por lo tanto, la luz galáctica difusa es más intensa en direcciones donde la densidad de la columna de polvo y la emisividad estelar integrada son altas (Wesson, 1991). No obstante, esta contribución aporta solo un $\sim 1\%$ del NSB (Cole et al., 1992). Además, el NSB puede variar entre $25.6 \text{ mag/arcsec}^2$ (constelación Auriga) y $24.7 \text{ mag/arcsec}^2$ (constelación Sagitario) (Spinrad & Stone 1978; Leinert et al. 1998).

En la Figura 2.1, se puede observar una composición de la Vía Láctea, el cuadro rojo representa la dirección del mínimo de NSB (Constelación de Auriga), mientras que el cuadro azul el máximo de NSB (Constelación de Sagitario).

La imagen es una composición de 1200 fotos de 6 minutos de exposición obtenidas desde Paranal, La Silla y La Palma con una cámara digital Nikon D3.

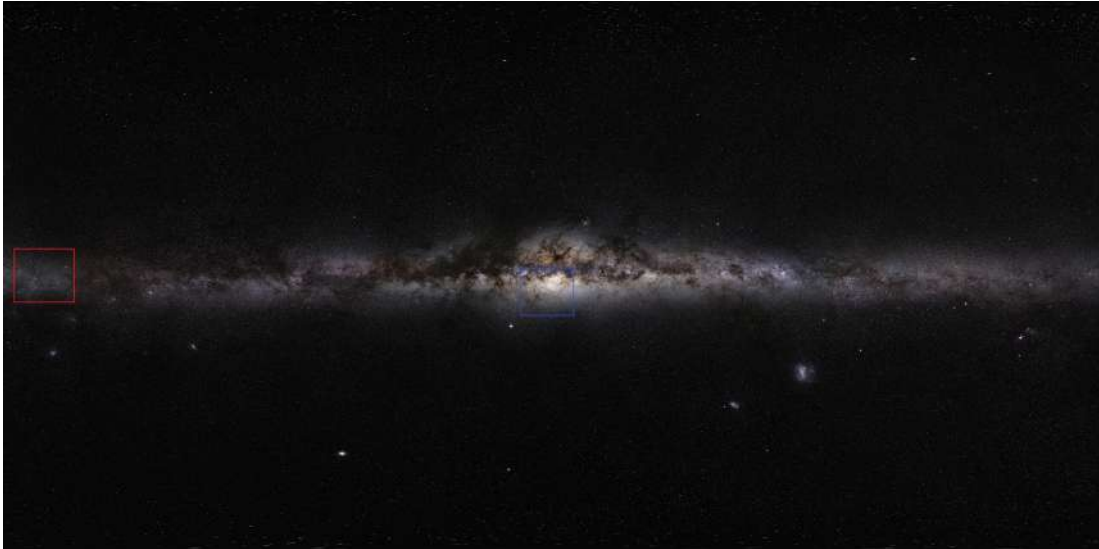


Figura 2.1: Composición de la Vía Láctea a través del proyecto GigaGalaxy Zoom de la ESO.
Créditos: ESO/ S. Brunier.

2.1.3. Luz Zodiacal

La luz zodiacal es una banda débil y difusa de brillo de color blanco que se produce por la dispersión de la luz solar con las partículas de polvo que se encuentran en el medio interplanetario (Figura 2.2). Este brillo se centra en la eclíptica y se puede apreciar antes del amanecer o después del atardecer, teniendo así dos máximos de luminancia, uno en dirección al Sol y el otro en la dirección contraria (Levasseur-Regourd & Dumont, 1980). El brillo en la dirección contraria se conoce como Gegenschein. La luz zodiacal tiene variaciones desde $22.4 \text{ mag/arcsec}^2$ hasta $24.7 \text{ mag/arcsec}^2$ (Toller et al. 1987; O'Connell 1987).



Figura 2.2: Luz Zodiacal, se observa un resplandor de apariencia triangular, mirando hacia el oeste unos minutos después de la puesta del Sol. Imagen obtenida desde el Observatorio ESO La Silla de ESO en septiembre de 2009. Créditos: ESO/ Y. Beletsky.

2.1.4. Airglow

El airglow es un fenómeno producido en las capas altas de la atmósfera a aproximadamente 85 km de altitud (mesósfera, ver Figura 2.3) por moléculas principalmente de oxígeno molecular O_2 , oxígeno atómico O , sodio Na e hidróxilo OH . El Sol envía constantemente fotones UV a la atmósfera terrestre (Ingham, 1972), que fotodisocia O_2 en átomos individuales durante el día y desencadena una cadena de complejas reacciones químicas tras la puesta de sol. El oxígeno no puede recombinarse eficazmente, provocando un exceso de energía que se almacena por varias horas, incluso durante la noche. Finalmente, el oxígeno se recombina, produciendo nuevamente O_2 . El O_2 luego libera energía, nuevamente en forma de luz e interactúa con otras reacciones y colisiones, generando una radiación por quimioluminiscencia (Roach & Gordon, 1973).



Figura 2.3: Capas de la atmósfera. Ilustración disponible en:
<https://aflly.co/1715>

El airglow se observa como un matiz de color sobre el horizonte, pero también puede aparecer como una mezcla de formas cambiantes de colores (Christensen et al., 2016). La extensión, el color y el brillo del airglow está influenciado por muchos factores, incluyendo la hora y la ubicación de la observación (Roach & Gordon 1973; Patat 2003). El resplandor rojo del oxígeno por ejemplo, tiende a ser más brillante al comienzo de la noche, pero después de la medianoche, puede ser muy débil. Sin embargo, las ráfagas esporádicas de emisión de airglow pueden ocurrir en cualquier momento (Christensen et al., 2016). Adicionalmente, Patat (2008) realizó observaciones sistemáticas del brillo del cielo durante 6 años en Cerro Paranal, identificando así algunas conclusiones acerca del NSB del airglow:

1. Existe una variación estacional en el brillo del cielo, que se presume coincide con las oscilaciones semestrales observadas en el doblete [Na I] del brillo atmosférico, pero que también existe en la banda [O I].
2. En la banda V, la variación estacional entre picos es de aproximadamente 0.5 mag/arcsec^2 .
3. Los máximos y mínimos de estas variaciones están desfasados con los equinoccios y solsticios.
4. Existe una débil correlación lineal entre el brillo del cielo en la banda V y la actividad solar.



Figura 2.4: Imagen tomada desde el Observatorio ESO La Silla: sobre la cúpula la Vía Láctea y sobre el horizonte se distingue el airglow con las tonalidades de rojos y verdes.
Créditos: P. Horálek/ ESO

Finalmente, como se ha mencionado anteriormente el airglow es una contribución que depende del sitio, el tiempo y la actividad solar. Existen algunos modelos que representan esta contribución. Estos modelos serán detallados más adelante.

2.1.5. Auroras Polares

Las auroras polares son un resplandor tenue (luces danzantes) de diferentes colores que se puede ver en los alrededores del polo norte y polo sur de la Tierra. Estas luces son creadas por la colisión de electrones en las capas más externas de la atmósfera terrestre. De acuerdo al polo en el que se pueden

observar las auroras, obtienen su nombre, las que se generan en el polo norte se llama Auroras Boreales, y las que se generan en el sur son Auroras Australes, pero en sí mismas son el mismo fenómeno. Para generar una aurora se requieren principalmente tres agentes: una atmósfera, un campo magnético y partículas cargadas.

Las auroras se deben a que en las zonas más altas de la atmósfera (termosfera/exosfera, Figura 2.5), los átomos y moléculas de Oxígeno y Nitrógeno son energizados y/o ionizados por partículas cargadas provenientes del Sol. En esta región de transición entre la atmósfera terrestre y el espacio cercano a la Tierra, abundan los electrones libres que son acelerados por los campos eléctricos de la magnetosfera, una estructura en forma de cometa alrededor de la Tierra. Las partículas cargadas son guiadas a lo largo de las líneas del campo geomagnético hasta que chocan y se excitan con átomos y moléculas. La luz auroral es el resultado de la desexcitación de estas partículas (Hosokawa et al., 2020).

El color, la forma y la intensidad dependen de las fuerzas electromagnéticas que disparan los electrones hacia abajo en la atmósfera superior. El color más común es el verde, este es producido por moléculas de oxígeno localizadas arriba de los 95 km, mientras que el color rojo es producido también por el oxígeno, pero aparecen a partir de los 200 km de altitud. Alrededor de los 120 km aparecen los colores azules y violetas producidos por el nitrógeno molecular (Chamberlain, 1958).

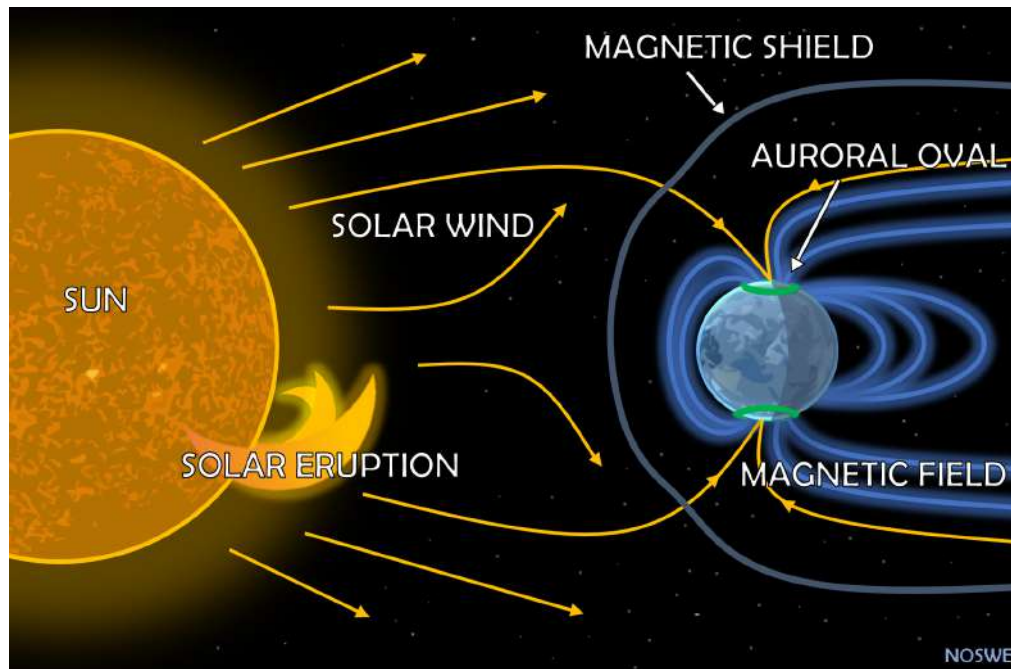


Figura 2.5: Esquema de cómo se producen las Auroras. Créditos: Norwegian Centre of Space Weather (Noswe)

2.2. Contribuciones Artificiales

El desarrollo de la tecnología ha permitido a la humanidad tener luz eléctrica en la noche, logrando así la realización de las actividades cotidianas. Sin embargo, el uso inadecuado y desproporcionado de la luz artificial ha causado que tengamos un exceso de energía que en muchos casos se dirija al cielo. Por esta razón, cada vez más organizaciones se han dedicado a comprender los efectos del ALAN y definir este fenómeno producido por los humanos. Por ejemplo, la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del norte de Chile¹ (OPCC), la define como:

“La introducción por parte de la actividad humana de luz artificial en el medio ambiente, directa o indirectamente. La contaminación que podemos evitar es la emisión del flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados e innecesarios para la

¹<http://www.opcc.cl/>

función a la que está destinada, o también cuando nos referimos al empleo de iluminación en ámbitos no recomendables como observatorios astronómicos, espacios naturales y paisajes sensibles.”

La Asociación Internacional de Cielos Oscuros² (IDA, por sus siglas en inglés), la define como:

“El efecto secundario de la civilización industrial. Sus fuentes incluyen iluminación exterior e interior de edificios, publicidad, propiedades comerciales, oficinas, fábricas, farolas y lugares deportivos iluminados, el hecho es que gran parte de la iluminación exterior que se usa por la noche es ineficiente, demasiado brillante, mal orientada, mal protegida y, en muchos casos, completamente innecesaria. Esta luz, y la electricidad utilizada para crearla, se desperdicia al derramarla hacia el cielo, en lugar de enfocarla en los objetos y áreas reales que la gente quiere iluminar.”

El Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile³, la define como:

“Luminosidad Artificial que, por su color, distribución o niveles, genera impactos en el cielo nocturno, en la biodiversidad y en la salud de las personas.”

En el 2007, la Unión Astronómica Internacional⁴ (IAU) en la conferencia de contaminación lumínica realizada en La Palma, plantea la posibilidad de postular los sitios astronómicos como Patrimonio de la Humanidad. Esto con el fin de reconocer los cielos oscuros como patrimonio.

Posteriormente, el Comité del Patrimonio Mundial de la UNESCO⁵, en su 34^o reunión celebrada en Brasilia (Brasil 2010), aprobó el estudio sobre los Sitios

²<https://www.darksky.org/>

³<https://mma.gob.cl/>

⁴https://www.iau.org/public/themes/light_pollution/

⁵<https://es.unesco.org/>

Patrimonio de la Astronomía y arqueoastronomía ⁶, elaborado en el marco del Año Internacional de la Astronomía en 2009. Dicho estudio identifica ciertos lugares del mundo como patrimonio astronómico, entre los cuales se encuentra el Norte de Chile, Canarias, Hawaii y Namibia, denominados como “Ventanas del Universo”.

2.2.1. Manifestación de la Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica se manifiesta principalmente de diferentes formas: la dispersión hacia el cielo (Skyglow), el deslumbramiento y la intrusión lumínica.

2.2.1.1. Skyglow

El skyglow se produce tanto de fuentes naturales como artificiales. Se origina cuando la luz interactúa con las partículas del aire y se dispersa en todas direcciones (halo luminoso) hacia el cielo. Este fenómeno se hace más intenso si hay partículas contaminantes en la atmósfera (partículas sólidas o aerosoles, humos), como suele ser frecuente en la atmósfera de las ciudades, donde encontramos precisamente una gran cantidad de ellas. Asimismo, puede suceder que la luz utilizada emita en un espectro no útil para el ojo humano, pero que afecta a otros seres vivos. Hay dos tipos de dispersión de luz que conducen al resplandor del cielo: la dispersión de moléculas como N_2 y O_2 (llamada dispersión de Rayleigh) y la de aerosoles.

⁶<https://www3.astronomicalheritage.net/index.php/resources/dark-skies-info>

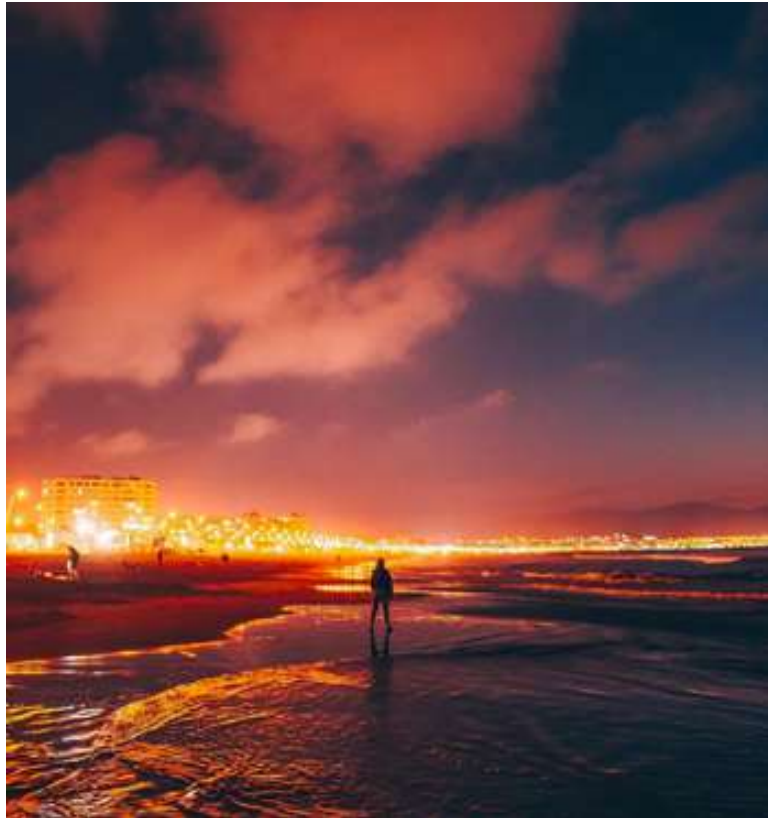


Figura 2.6: Skyglow en las playas de La Serena. Créditos: Sebastián Ojeda S.

Dispersión de Rayleigh: se refiere a la dispersión de la luz o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados. La dispersión se puede aproximar hasta una décima parte de la longitud de onda de la luz. La dispersión de Rayleigh es el resultado de la polarización eléctrica de las partículas. El campo eléctrico oscilatorio de una onda luminosa actúa sobre las cargas de las partículas provocando que oscilen en la misma frecuencia. La partícula se convierte en un pequeño dipolo radiante cuya radiación visible es la luz dispersada. Rayleigh calculó la intensidad de dispersión de las moléculas del aire como:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2(\gamma))$$

donde R es la distancia de la partícula, γ es el ángulo de dispersión (Ver Figura 2.7), N el número de dispersiones y α la polaridad. A pesar de la fuerte

dependencia de la longitud de onda de la dispersión de Rayleigh, su efecto sobre el resplandor del cielo para las fuentes de luz reales es pequeño. Aunque las longitudes de onda más cortas sufren una mayor dispersión, esta mayor dispersión también da lugar a una mayor extinción, los efectos se equilibran aproximadamente cuando el punto de observación está cerca de la fuente de luz (Luginbuhl et al., 2014).

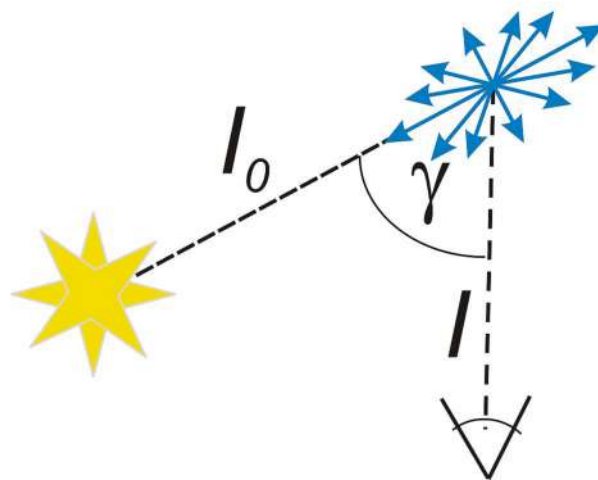


Figura 2.7: Esquema dispersión de Rayleigh para moléculas en el aire.

Aerosol: se define como un sistema de suspensión de partículas sólidas o líquidas en un gas, cuyo tamaño va desde $0,002 \mu\text{m}$ (algunas moléculas) hasta $100 \mu\text{m}$, esto significa que pueden permanecer en suspensión por un tiempo de al menos 1 hora. Para Hinds (1999), es necesario incluir en la definición, la condición de que los aerosoles deben ser capaces de observarse o medirse. En la práctica el término aerosol usualmente se refiere a los componentes semivolátiles y no volátiles que forman parte de las partículas, pero no a los compuestos volátiles que residen exclusivamente en la fase gaseosa (Pöschl, 2005).

2.2.1.2. Intrusión Lumínica

Intrusión Lumínica es cuando la luz artificial procedente de la calle o de otras edificaciones, entra por las ventanas invadiendo el interior de las viviendas o edificios, alterando de esta forma el interior del hogar o del espacio. No se puede minimizar la importancia de esta forma de contaminación lumínica, dados los efectos perjudiciales que puede causar en el bienestar y salud (ciclos de sueño) de las personas que habitan en áreas urbanas (Rajkhowa, 2014).

2.2.1.3. Deslumbramiento

Deslumbramiento es cuando la luz de una fuente artificial incide directamente sobre el ojo, producto de una sobre iluminación o de una luz muy blanca. Este tipo de contaminación tiene una relación más directa con el tema de la seguridad vial y puede producirse tanto por un exceso de luz, como por una mala orientación de las luminarias, que la proyectarían directamente a los ojos (Rajkhowa, 2014).

2.2.2. Tipos de Lámparas

Todas las luces que utilizamos convierten la energía eléctrica en luz, y se pueden dividir en tres categorías según el proceso de realización de la conversión:

- **Lámparas Termoradiación:** En este tipo de lámparas se encuentran dos tipos: las incandescentes que emiten luz por la incandescencia que alcanza un filamento de material conductor, al pasar una corriente eléctrica a través de él. El segundo tipo son las Halógenas incandescentes, la ampolla se rellena de un compuesto gaseoso con halógenos que se encarga de regenerar el filamento conforme se va evaporando, evitando al mismo tiempo el ennegrecimiento de la bombilla y la descomposición del filamento.
- **Lámparas Luminiscencia:** Son aquellas que a través de la excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos emite

la luz. Según el tipo de gas contenido en la lámpara y la presión a la que esté sometido, tendremos diferentes lámparas, cada una de ellas con sus propias características luminosas. Las lámparas más comunes de descarga son: Mercurio a alta presión, Halogenuros metálicos, Sodio baja presión y alta presión.

- **Lámparas Electroluminiscencia:** Son lámparas de estado sólido construidas a base de semiconductores, por lo que no requieren ni filamentos, ni gases para descarga. El semiconductor está unido a dos terminales cátodo y ánodo, y recubierto por una resina epoxy transparente. Al circular corriente por los terminales se produce luz. Estas lámparas son las que conocemos como LED.

En la Figura 2.8, se puede apreciar una comparación entre el color y los tipos de luz que emiten las lámparas. Es fundamental usar lámparas cuya distribución espectral tenga la máxima intensidad en las longitudes de onda a las que el ojo tiene la mayor sensibilidad en las condiciones típicas de las áreas a iluminar (normalmente visión fotópica), evitando aquellas las lámparas de amplio espectro. Así, además de favorecer el aprovechamiento máximo de la luz para la función visual, también se evita en parte invadir la región del espectro correspondiente a la visión escotópica, que es la predominante cuando se observa el cielo oscuro natural lejos de la zona donde están situadas las luminarias (García & Moreno, 2016). En las figuras siguientes se presentan la variación de los espectros de emisión según el tipo de fuente, La Figura 2.9 tiene la información correspondiente a las lámparas tradicionales, es decir, lámparas de mercurio y sodio. Mientras que la Figura 2.10 representa la información de las nuevas tecnologías LED.

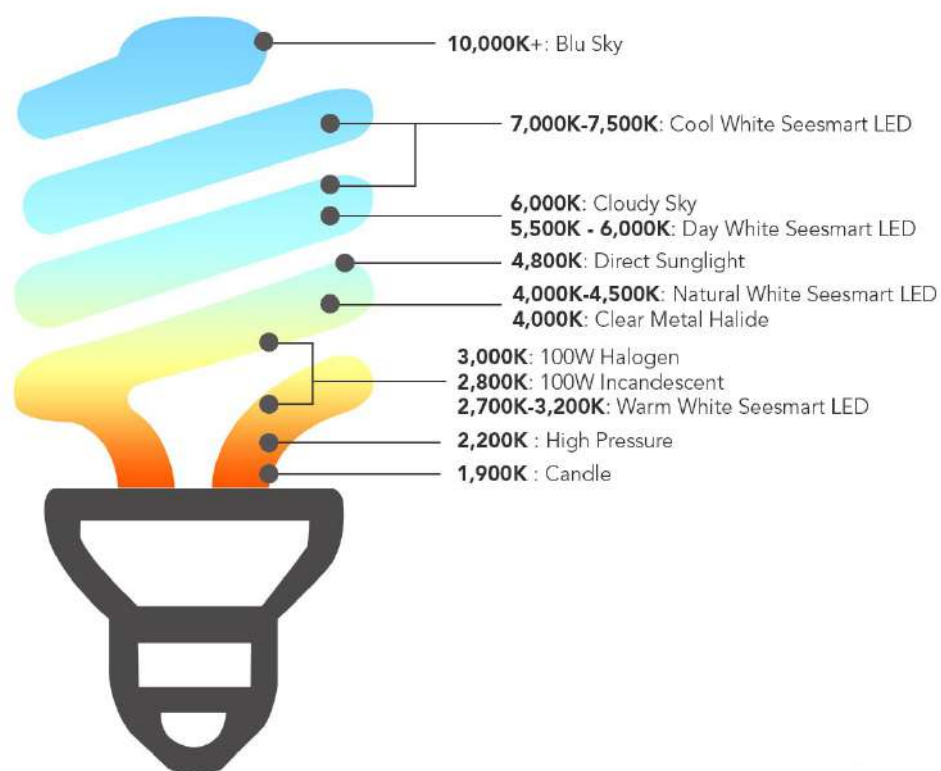


Figura 2.8: CCT de los tipos de lámparas. Créditos: Lumens light and living.

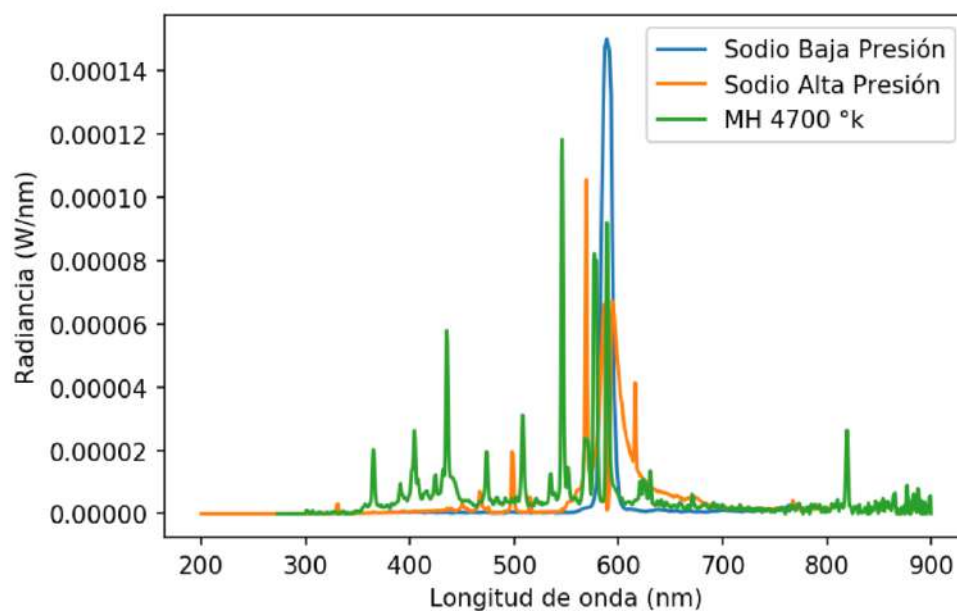


Figura 2.9: Espectros de los diferentes tipos de lámparas tradicionales. Créditos: OPCC

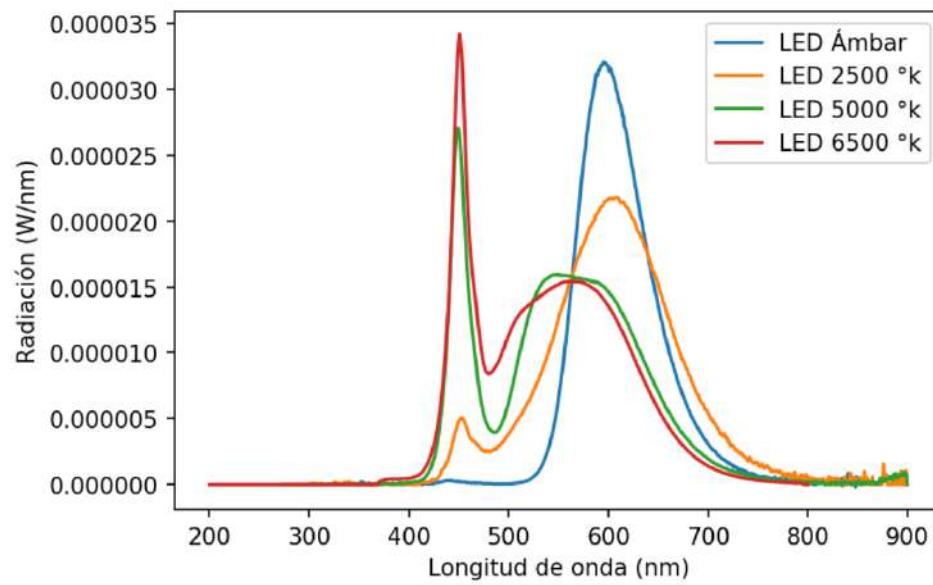


Figura 2.10: Espectros de los diferentes tipos de lámparas LED. Créditos: OPCC

Capítulo 3

ALAN como Área de Investigación Científica Interdisciplinaria

La contaminación lumínica es un problema del cual se viene discutiendo desde la década de los 70 y al cual se le ha intentado comprender desde las diferentes áreas del conocimiento, ya que la interacción de este fenómeno en la atmósfera conduce a un resplandor celeste que es el resultado de la dispersión de la luz artificial por las nubes, aerosoles y contaminantes como las partículas suspendidas en la atmósfera. La dispersión propaga los efectos de la contaminación lumínica a distancias más allá de la posición de la fuente de iluminación y forma un domo de luz si se ve desde la distancia, o incluso ilumina todo el cielo nocturno.

Como se menciono anteriormente, se hace necesario describir ALAN, para esto se debe comprender el comportamiento de la luz en diferentes condiciones y variaciones que cambian con el tiempo (tipo de fuente). En esta sección se describen algunos de los modelos que existen de ALAN, así como los instrumentos para llevar a cabo mediciones.

3.1. Modelamiento del ALAN

Construir un modelo de la contaminación lumínica requiere estudiar a profundidad el skyglow (Sección 2.2.1.1), debido a que la luz viaja hacia arriba (el cielo) en la atmósfera directamente desde la fuente que la emite, o por reflejo del suelo u otras superficies que dispersan parcialmente la luz. Posteriormente, se produce un resplandor difuso que es visible desde grandes distancias. Por esta razón, describimos algunos conceptos de dispersión de la luz.

En la sección 2.2.1.1, se describe la dispersión de Rayleigh. Sin embargo, existen algunas aproximaciones para mejorar el modelo. Como por ejemplo, si la dispersión de Rayleigh es descrita por la dispersión elástica de la luz en forma de esferas que son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz. La intensidad I de la radiación dispersa viene dada por:

$$I = I_0 \left(\frac{1 + \cos^2 \gamma}{2R^2} \right) \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6 \quad (3.1)$$

donde I_0 es la energía por unidad de área por unidad de tiempo por ángulo sólido antes de la interacción con la partícula, R es la distancia entre la partícula y el observador, γ es el ángulo de dispersión, λ es la longitud de onda de la luz en consideración, n es el índice de refracción de la partícula y d es el diámetro de la partícula.

Puede verse en la ecuación anterior que la dispersión de Rayleigh depende en gran medida del tamaño de la partícula y las longitudes de onda. La intensidad de la radiación dispersada de Rayleigh aumenta en λ^{-4} . Además, la intensidad de la radiación dispersa de Rayleigh es idéntica en las direcciones de avance y retroceso (Landau & Lifshitz, 2013).

La teoría que describe la dispersión de una onda plana electromagnética por una esfera homogénea de tamaño arbitrario fue presentada originalmente por

Mie (1908). Las partículas con un tamaño comparables a la longitud de onda de la luz visible son relativamente comunes en la naturaleza. En la atmósfera, por ejemplo, las partículas están limitadas por el tamaño y a su vez son del mismo orden magnitud que la longitud de onda de la luz en el rango óptico, de 0,1 a 1,0 μm de diámetro. En este rango, la teoría de Rayleigh ya no es aplicable porque el campo no es uniforme en todo el volumen de la partícula (Louedec, 2011).

Anteriormente se ha descrito el comportamiento de la luz solo como dispersión donde con mejoras o aproximaciones se detalla lo que sucede en la atmósfera. Sin embargo, Garstang (1986) construye un modelo que permite calcular el NSB causado por una ciudad. Este modelo es el primero en describir la propagación de la luminosidad producida por los centros de población mediante consideraciones geométricas y físicas.

El modelo de Garstang plantea que todo el NSB de una ciudad se puede aproximar como un área circular de brillo uniforme con un centro y un radio definido. Además, la ciudad se debe encontrar en un plano horizontal y debe tener un observador situado de tal forma que tenga línea de visión hacia el plano de la ciudad. Luego, supone que existe una fracción de luz que es producida por la ciudad y otra que se irradia directamente hacia el cielo en ángulos superiores al horizonte y el resto se irradia hacia el suelo.

Posteriormente, la luz que llega a la atmósfera y se dispersa con el polvo y las moléculas, lo cual es descrito por una ley de potencia decreciente, en función de la altura sobre el nivel del mar y de la densidad relativa del aire a nivel del mar que supone una dispersión Rayleigh a una longitud de onda de 5500 Å. Seguidamente, se introducen el parámetro K que es un indicador de la transparencia de la atmósfera correspondiente a los aerosoles que se difunden por el aire limpio a nivel del mar, es decir, sin factores contaminantes como contaminación. Finalmente, se añade la contribución natural del cielo nocturno para

obtener la estimación de la luminosidad del cielo nocturno. Garstang supone que el brillo del cielo natural de fondo es $V = 21,9 \text{ mag/arcsec}^2$.

Kocifaj (2007), desarrolló un modelo teórico escalable de contaminación lumínica para fuentes terrestres. Este modelo es una mejora al modelo de Garstang debido a que podemos tener más de una fuente de luz y esta integra el flujo de la fuente, no se asume que todo radie de la misma forma que Garstang. El modelo se emplea para la simulación del comportamiento angular de la radiancia y la luminancia espectral e integral del cielo durante la noche, tiene la característica de que no hay ninguna restricción en el número de fuentes luminosas terrestres ni en la distribución espacial de estas fuentes en las proximidades del punto de medición (es decir, tanto las distancias como los ángulos acimutales de las fuentes de luz son configurables).

El modelo se aplica para fuentes reales de superficie finita con propiedades espectrales y angulares de radiación definidas, a diferencia de las aproximaciones de fuentes puntuales utilizadas con frecuencia. La influencia de la atmósfera en la radiación transmitida se formula en términos de propiedades ópticas de los aerosoles y las propiedades ópticas moleculares. La altitud y la reflectancia espectral de una capa de nubes son los principales factores introducidos para la simulación de las condiciones de nubosidad. Las ecuaciones derivadas se traducen en un código numéricamente rápido y que permite repetir todo el conjunto de cálculos en tiempo real.

ILLUMINA es un modelo de transferencia radiativa basado en una simulación de Monte Carlo para estudiar la propagación nocturna de la luz artificial en el medio ambiente desarrollado por Aubé et al. (2005). El modelo comprende el cálculo de los dos primeros órdenes de dispersión en la atmósfera y las reflexiones sobre las superficies terrestres. ILLUMINA puede simular tanto el resplandor del cielo (condiciones despejadas y nubladas) como el resplandor proveniente de una vista directa a los dispositivos de iluminación y las super-

ficies iluminadas. Los cálculos de ILLUMINA se realizan sobre una cuadrícula de resolución multiescala. ILLUMINA tiene en cuenta varias propiedades ópticas de aerosoles, humedad relativa, presión atmosférica a nivel del suelo, espectro de reflectancias del suelo, topografía, espectros de lámparas, funciones de emisión angular de lámparas, altura de la base de la nube, tipo de nube, y obstáculos de subcuadrícula. El resplandor se puede calcular hacia cualquier ángulo de visión, incluso hacia abajo. De esta manera, se puede simular el resplandor del cielo nocturno y además se puede simular la vista satelital de la superficie terrestre.

Hasta ahora solo hemos hablado de modelos de dispersión o modelos que se centra en comprender el comportamiento de la luz artificial. Como se mencionó en el capítulo anterior existen contribuciones artificiales y naturales. El brillo natural del cielo nocturno es un dato relevante para controlar y entender la evolución de la contaminación lumínica, ya que si tenemos mediciones directas en un sitio y conocemos las contribuciones naturales, podemos hacer una sustracción del brillo global del cielo y determinar las fuentes artificiales.

Un modelo que permite reproducir las contribuciones naturales es GAMBONS (GAia Map of the Brightness Of Natural Sky, por sus siglas en inglés). GAMBONS es un modelo del brillo nocturno natural del cielo en noches sin nubes y sin Luna que se basa en la radiancia estelar extraatmosférica obtenida del catálogo Gaia. El archivo Gaia-DR2 recopila información astrométrica y fotométrica de más de 1.600 millones de estrellas de hasta $G = 21$ mag. En el caso de las estrellas más brillantes, no incluidas en Gaia-DR2 utilizaron el catálogo Hipparcos. Adicionalmente, se tuvieron presente todos los efectos de atenuación y dispersión atmosférica de las contribuciones naturales como la estelar integrada, la luz difusa galáctica, la luz zodiacal y el airglow. Finalmente, el modelo entrega un valor de NSB en función del tiempo y del lugar observación, ya que la presencia o ausencia de la Vía Láctea y la altura de la eclíptica sobre el horizonte son los dos principales factores que modulan

las contribuciones relativas al brillo del cielo a lo largo del año (Masana et al., 2021).

3.2. Datos de Satélites

Las imágenes del cielo nocturno obtenidas de los satélites que orbitan la Tierra muestran los efectos de una iluminación inadecuada y/o excesiva. Al inicio de la década de los 60's los satélites eran lanzados con el objetivo de monitorear el clima y algunos podían ver las luces nocturnas de la Tierra. Sin embargo, las cámaras no eran lo suficientemente potentes para realizar mediciones científicamente útiles. En 1970, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos inició en secreto su Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP, en inglés Defense Meteorological Satellite Program) para recopilar información meteorológica para el apoyo de actividades militares. En los años siguientes, DMSP fue desclasificado y sus imágenes de la Tierra nocturna se pusieron a disposición de los investigadores. Las imágenes DMSP se usaron para verificar modelos teóricos. Al comienzo las pruebas de predicciones se realizaban en imágenes de DMSP individuales, que solo mostraban una pequeña parte de la Tierra a la vez.

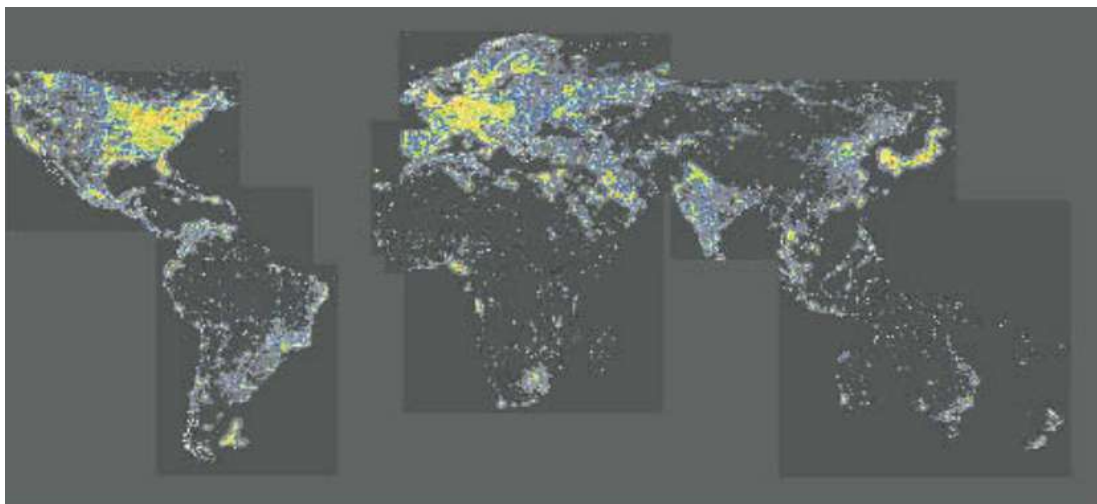


Figura 3.1: Mapa mundial del brillo del cielo nocturno artificial a nivel del mar (Cinzano et al., 2001)

Cinzano et al. (2000) construyeron el primer atlas de contaminación lumínica utilizando los datos de alta resolución que llevan los satélites del DMSP. Los mapas globales son un compuesto “libre de nubes”, lo que implica que solo utilizaron observaciones con las mejores condiciones climáticas. Adicionalmente, eliminaron las luces efímeras producidas por incendios y eventos de ruido aleatorio que se produjeron en el mismo lugar al menos tres veces. La propagación de la contaminación lumínica la calcularon con el modelo Gars-tang. Así obtuvieron la Figura 3.1 que es considerado como el primer mapa de contaminación lumínica.

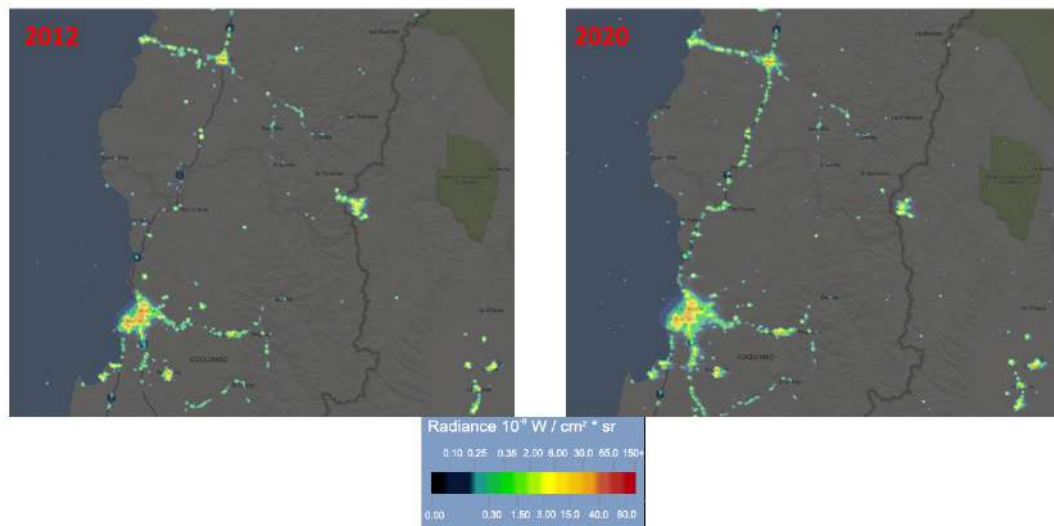


Figura 3.2: La Serena visto desde VIIRS en el 2012 (Izquierda) y 2020 (Derecha).

Debido a que el propósito del DMSP era pronosticar el clima, las cámaras a bordo de los satélites DMSP no tenían la capacidad de ver detalles finos en tierra. Muchas ciudades se veían simplemente como manchas brillantes de luz, sin gran detalle. Por esta razón, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA¹, en inglés National Oceanic and Atmospheric Administration) lanzó en el 2011, el satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) con una cámara llamada Visible Infrared Imaging

¹<https://www.noaa.gov/>

Radiometer Suite (VIIRS). Mientras que las imágenes nocturnas de los satélites DMSP pueden ver objetos tan pequeños como de unos 3 kilómetros de tamaño, VIIRS puede ver objetos de menos de 1 kilómetro. Como resultado, podemos ver detalles finos como carreteras y carreteras de circunvalación alrededor de las ciudades (Elvidge et al., 2017). En la Figura 3.2 presentamos un ejemplo de como esta cámara ha transformado la forma en que vemos la Tierra de noche a lo largo de los años, es decir, se puede observar la evolución de las luces con el pasar del tiempo (Kyba et al., 2015).

Jurij Stare, de Eslovenia, creó un sitio web (<https://www2.lightpollutionmap.info/>) que permite a los usuarios hacer comparaciones simples (pero cuantitativas) de la cantidad de luz dirigida hacia arriba en diferentes partes del mundo. Su sitio web superpone imágenes DMSP y VIIRS con los datos de superposición del Nuevo Atlas mundial de Falchi et al. (2016), logrando obtener un un mapa interactivo de contaminación lumínica. En la Figura 3.3, se muestra el mapa mundial de contaminación lumínica, junto con una escala (derecha) que muestra el significado de los colores en una escala de unidades físicas.

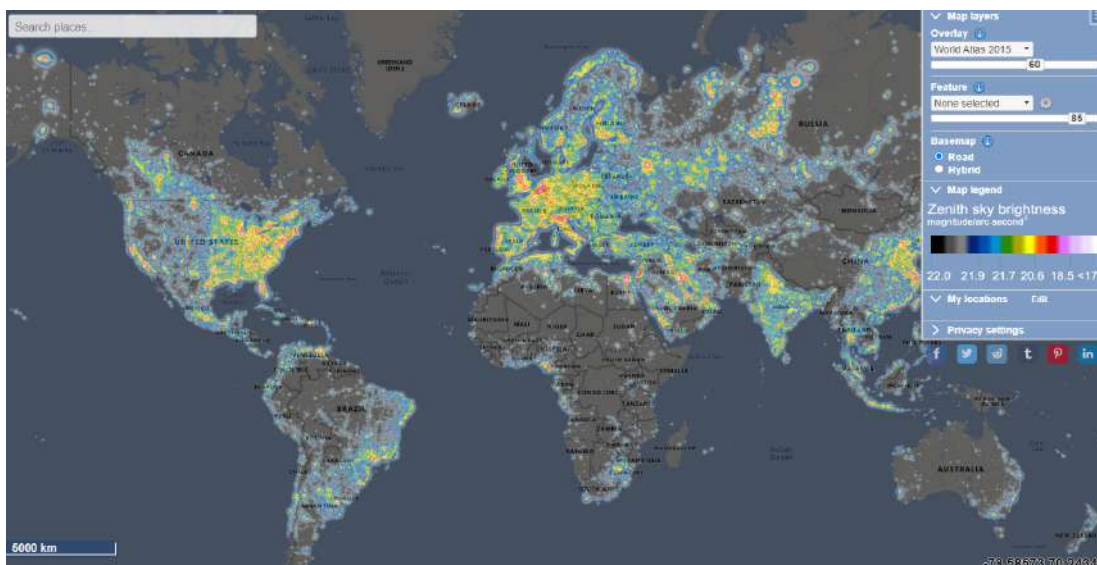


Figura 3.3: Mapa mundial del brillo del cielo nocturno artificial.

Actualmente, los datos satélites brindan la posibilidad de conocer el estado del ALAN a nivel global, detectar fuentes de contaminación lumínica y comparar los resultados de los modelos teóricos con observaciones, pero tienen una poca resolución y en el caso VIIRS solo tenemos el valor de la contribución de ALAN por ciudad una vez al año, lo que implica que para tener un monitoreo constante en el tiempo y evaluar la evolución del ALAN a se hace necesario tomar datos con instrumentos en tierra o desde un avión. Las observaciones aéreas debido a su resolución y la precisión de las imágenes se han convertido en un gran activo para cualquier proyecto que requiera imágenes en color natural o incluso IR. Un ejemplo es el desarrollado por Kuechly et al. (2012), donde utilizaron una aeronave Cessna T207A y un ASTMON (Ver Sección 3.3.2.2) para analizar espacialmente las principales fuentes de contaminación lumínica en la ciudad de Berlín a partir de los datos de uso del suelo urbano. En la Figura 3.4 podemos apreciar una comparación entre datos DMSP y las imágenes áreas de la ciudad de Berlín.

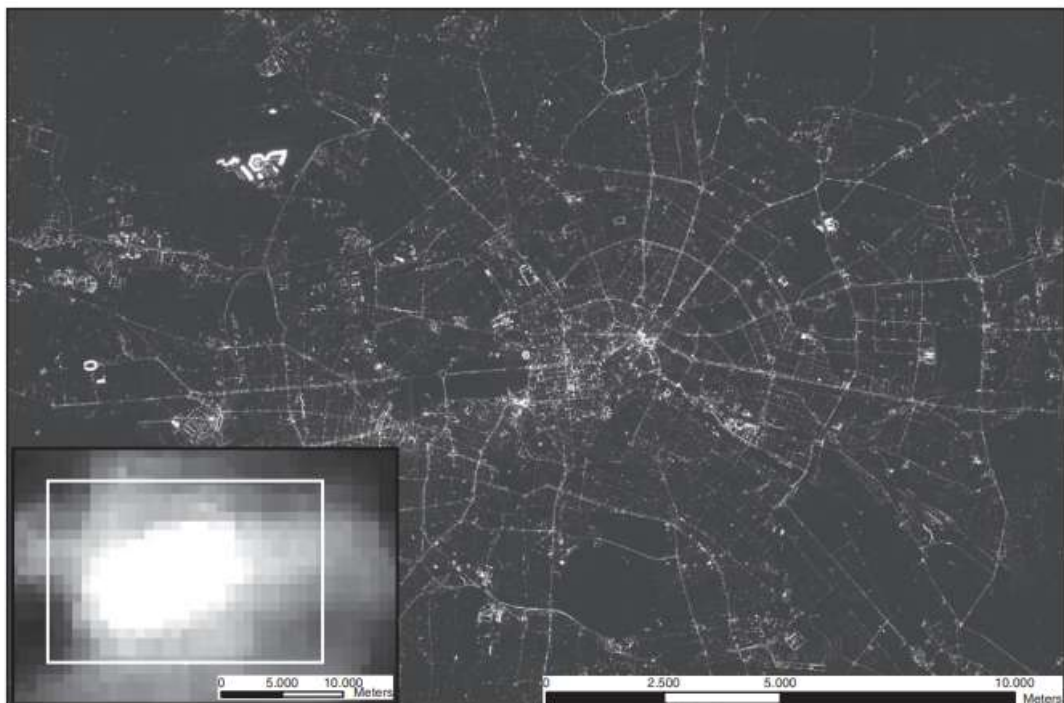


Figura 3.4: Imagen en mosaico de la zona central de estudio de Berlín (escala 1:100.000). En comparación, la pequeña ventana en la esquina inferior izquierda posiciona la misma vista en los datos del DMSP (Kuechly et al., 2012).

Por último, hay una fuente adicional de imágenes de las luces nocturnas de la Tierra que son las capturadas por los astronautas a bordo de la Estación Espacial Internacional, usando cámaras DSLR y una montura de seguimiento de la Tierra. Ellos han fotografiado la Tierra y han acumulado miles de imágenes de este tipo. Sin embargo, muchas de las imágenes se desconoce de qué ciudad son, esto debido a que las imágenes son tomadas en cualquier dirección y la información registrada de la posición hace referencia al punto de la Tierra exactamente debajo de su trayectoria de vuelo. Para identificar las ciudades, ellos han desarrollado un proyecto de ciencia ciudadana cuyo objetivo es crear un mapa como los de Google maps usando las fotografías, este proyecto se denomina: Cities At Night² (Schroer et al., 2018). En la Figura 3.5 se puede apreciar un ejemplo de las imágenes registradas por los astronautas.



Figura 3.5: Vista de Santiago, Chile. Desde el proyecto Cities at Night.

²<https://citiesatnight.org/>

3.3. Datos de Terreno

Los datos de terreno son aquellos datos que obtenemos por medio de un equipo en lugar determinado con el cual se mide el brillo del cielo nocturno. Dependiendo del número de variables que puede medir se clasifican en:

- Datos Monodimensionales (1D).
- Datos Bidimensionales (2D).

3.3.1. Datos Monodimensionales (1D)

Los siguientes instrumentos sirven para medir NSB utilizando un solo canal espectral. Estos instrumentos integran toda la luz que cae sobre un cono de visión para entregar un valor. A continuación detallaremos los instrumentos más utilizados.

3.3.1.1. The Sky Quality Meter (SQM)

El Medidor de Calidad del Cielo (SQM, en inglés Sky Quality Meter), es un instrumento que se ha popularizado en el entorno astronómico de la contaminación lumínica. La razón fundamental de esta popularización es su bajo costo. Fabricado por la casa Unihedron, se presenta como un medidor portátil de NSB. El SQM utiliza un sensor convertidor luz-frecuencia TAOS TSL237 con un filtro Hoya CM filter, proporcionando una sensibilidad que abarca un pasa banda de 400-600 nm (FWHM). La Figura 3.6, presenta las características técnicas declaradas por el fabricante³.

³<http://www.unihedron.com/projects/darksky/>

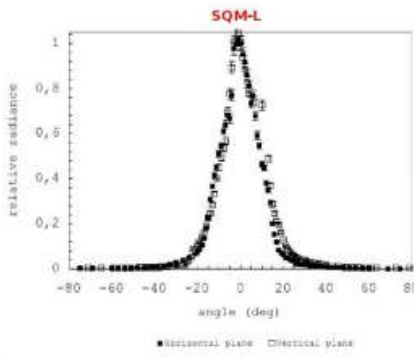
USB connection	USB B connector. 5m USB A to USB B cable supplied. USB FTDI VCP driver, serial port emulator at 115200baud.
Physical Size	3.6" x 2.6" x 1.1"
Meter weight	80g
Meter precision	Each SQM-LU is factory-calibrated. The absolute precision of each meter is believed to be $\pm 10\%$ (± 0.10 mag/arcsec ²). The difference in zero-point between each calibrated meter is typically $\pm 10\%$ (± 0.10 mag/arcsec ²).
Field of View	The Half Width Half Maximum (HWHM) of the angular sensitivity is $\approx 10^\circ$. The Full Width Half Maximum (FWHM) is then $\approx 20^\circ$. The sensitivity to a point source $\approx 19^\circ$ off-axis is a factor of 10 lower than on-axis. A point source $\approx 20^\circ$ and $\approx 40^\circ$ off-axis would register 3.0 and 5.0 magnitudes fainter, respectively. 
Power requirement	18mA (from the 5V USB connection).
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Temperature sensor	Accuracy: $\pm 2^\circ\text{C}$ maximum at 25°C Location: Internal near light sensor, measures internal meter temperature for light sensor value compensation.
Temperature update rate	4.3 seconds, 256 samples taken at 60Hz then averaged.

Figura 3.6: Características técnicas de un SQM-LU. créditos: Unihedron

El dispositivo es muy fácil de usar (apuntar el fotómetro hacia la dirección celeste de interés, pulsar el botón y leer los datos en la pantalla), es lo suficientemente preciso como para realizar investigación científica (Cinzano, 2005). Los SQM tienen una incertidumbre sistemática citada del 10 %. Su uso se ha hecho muy popular entre los investigadores y los astrónomos aficionados, así como los interesados en la lucha contra la contaminación lumínica (Sánchez de Miguel et al., 2017). Actualmente, existen diferentes versiones del SQM. La Figura 3.7 compara las mejoras que se le han realizado al SQM en la interfase, en el campo de visión, el alcance y el tipo de lectura con el que instrumento almacena los datos.

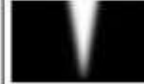
Model	SQM	SQM-L	SQM-LE	SQM-LU	SQM-LU-DL	SQM-LR
Interface	 Equipo de Mano	 Equipo de Mano	 Ethernet	 USB	 USB	 RS232
Campo de Visión	 Amplio	 Angosto	 Angosto	 Angosto	 Angosto	 Angosto
Alcance	 De mano	 De mano	 Global	 5m	 Autónomo	 100m
Lecturas	 Individuales	 Individuales	 Individuales y continuas	 Individuales y continuas	 Individuales y continuas	 Individuales y continuas

Figura 3.7: Comparación de las versiones SQM. Créditos: Kosmos

Debido a su fiabilidad, versatilidad y bajo costo con respecto a otros medidores NSB. Los dispositivos SQM tienen una gran difusión y son muy adecuados para implementar redes de monitoreo. Algunos ejemplos son las estaciones establecidas en Italia (Bertolo et al., 2019), España (Zamorano et al., 2016), Austria (Posch et al., 2018), entre otros.

3.3.1.2. The Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS)

The Telescope Encoder and Sky Sensor (TESS) emplea el mismo fotómetro de la SQM para cuantificar el brillo del cielo nocturno, TESS fue creado durante el Proyecto Europeo STARS4ALL⁴ H2020 con un diseño Open Source (Zamorano et al., 2016). Los datos se visualizan en tiempo real y se pueden compartir en la página del proyecto si el usuario lo desea. En la Figura 3.8 se

⁴<https://tess.stars4all.eu/>

presenta la estructura de un TESS disponibles en el mercado y en la Tabla 3.1 se destacan los detalles técnicos.



(a) TESS-P



(b) TESS-W

Figura 3.8: Comparación de las versiones de TESS.

El fotómetro está encerrado en una caja resistente a la intemperie que contiene los componentes electrónicos y ópticos hechos a medida. TESS tiene una placa de circuito impreso hecha a medida con un chip WIFI de bajo costo y capacidad de microcontrolador. También cuenta con el módulo del termómetro infrarrojo para información de cobertura de nubes. En la Figura 3.9 se presenta la respuesta espectral de SQM, TESS, los filtros Johnson (B, V y R) y algunas lámparas.

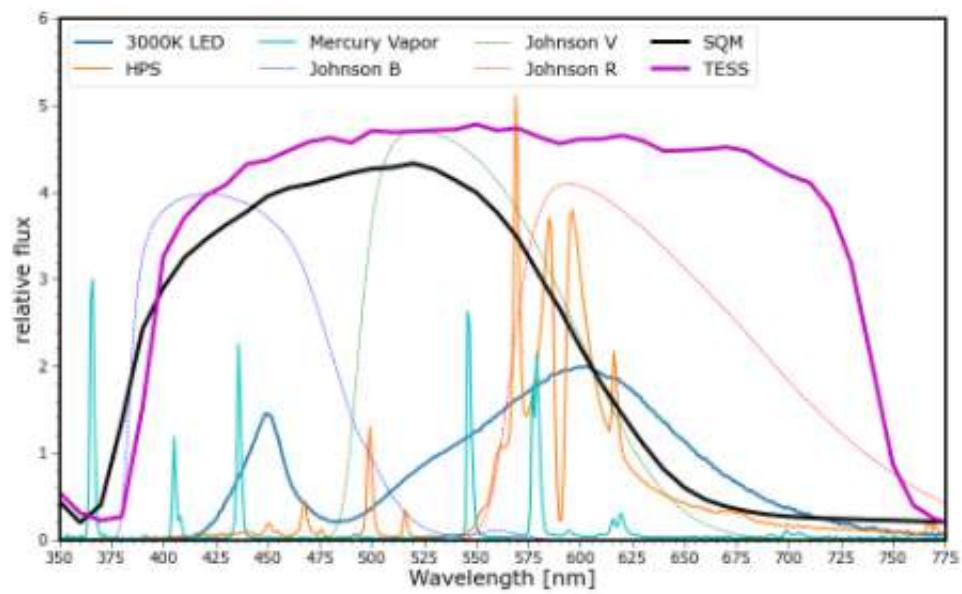


Figura 3.9: Comparación de la respuesta espectral TESS, SQM, los filtros Johnson, lámpara de vapor mercurio a alta presión, HPS (lámpara de vapor de sodio a alta presión) y LED.

Fuente: <https://tess.stars4all.eu/faqs/>

Característica	TESS-P	TESS-W
Alimentación	Batería de Litio recargable 750 mAh Tipo C USB 5v 1A.	Batería de Litio recargable 1200 mAh Tipo C USB 5v 1A.
Consumo	750 mA en carga y 100 mA con batería cargada.	750 mA en carga y 200 mA con batería cargada.
Duración de la batería	3 horas.	1 hora de barridos.
Comunicación	Bluetooth. Opcional USB tipo C para lectura de largo periodo.	Bluetooth. Opcional USB para lectura estáticas.
Temperatura de trabajo	-30 °C a 70 °C	-30 °C a 70 °C
Dimensiones	8 x 7 x 3 cm	11 x 7 x 9 cm
Peso	200 gr	250 gr
Puntos de medida de barrido	No aplica	145, empezando en 10° de altura.
Precisión apuntado de barrido	No aplica	± 5°
Duración del barrido	No aplica	Variable en función del brillo, 5 minutos para brillos sobre magnitud 20
Tipo de sensor de Brillo	Fotodiodo de silicio TSL237	Fotodiodo de silicio TSL237
FOV medida de Brillo	17°	17°
Rango espectral de Brillo	400 a 750 nm	400 a 750 nm
Precisión Brillo	±0.1 mag/arcsec ²	±0.1 mag/arcsec ²
Rango de Brillo	8 a 23 mag/arcsec ²	8 a 23 mag/arcsec ²
Tipo de sensor IR	Termopila MLX90614ESF	Termopila MLX90614-BAC
FOV sensor IR	35°	35°
Resolución Temperatura IR	± 0.02 °C	± 0.02 °C
Rango Temperatura IR	-70 °C a 380°	-70 °C a 380°
Rango sensor Temperatura	-40 °C a 125 °C	-40 °C a 125 °C
Precisión Temperatura	± 0.5 °C	± 0.5 °C
Calibración de Brillo	Laboratorio LIGA UCM	Laboratorio LIGA UCM

Tabla 3.1: Comparación entre las características técnicas del TESS-P y el TESS-W. Créditos: tess.stars4all

3.3.2. Datos Bidimensionales (2D)

Los siguientes instrumentos ofrecen una visión general de los dispositivos y técnicas para mapear y medir el brillo del cielo mediante el análisis de imágenes. Algunos de estos dispositivos se basan en cámaras CCD (Charge Coupled Device), otras en sensores CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) de cámaras DSLR (Digital Single lens reflex) disponibles en el mercado. Dependiendo del método de reducción, las observaciones basadas en instrumentos bidimensionales pueden informar del brillo del fondo del cielo.

3.3.2.1. TESS Auto Scan (TAS)



Figura 3.10: Dimensiones de los fotómetros TAS.

TAS (TESS Auto Scan) es un fotómetro motorizado, con óptica TESS-W, destinado al estudio de la contaminación lumínica. Incorpora dos motores de pasos para realizar barridos automáticos de 145 medidas de brillo y temperatura IR aparente del cielo. Las medidas se reciben en una aplicación móvil (TESS-P⁵) que los guarda en ficheros de texto para su posterior consulta y tratamiento. La app genera mapas (Ver Figura 3.10) que pueden ser de brillo o de temperatura IR del cielo. Las lecturas de temperatura del cielo complementan a la

⁵https://play.google.com/store/apps/details?id=b4a.tessp&hl=en_US&gl=US

medida de brillo (Bará et al., 2019). En la Figura 3.11 se presenta la estructura de un TAS.

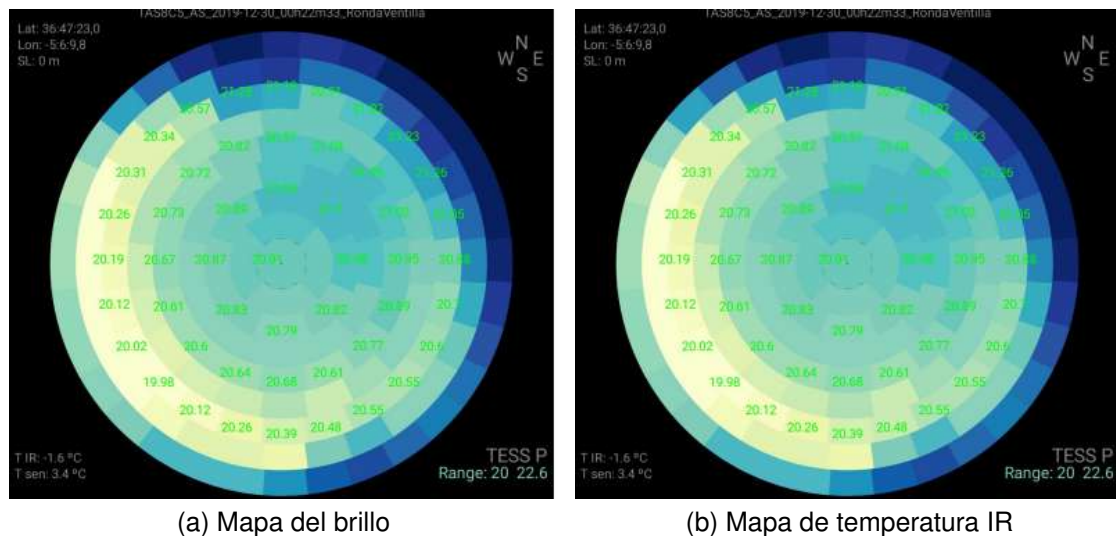


Figura 3.11: Visualización de los datos TAS sobre el oeste de la ciudad de Madrid, España.

3.3.2.2. The All Sky Transmission Monitor

El Monitor de Transmisión de todo el cielo (ASTMON, en inglés All Sky Transmission Monitor), es un instrumento científico cuyo objetivo es realizar un monitoreo continuo del cielo nocturno de un cierto lugar. Sus componentes son una lente ojo de pez $f = 4,5mm$ y una cámara astronómica CCD con el cual se mide la luminancia de todo el cielo nocturno. El sistema está diseñado para realizar un seguimiento continuo del brillo de la superficie del fondo cielo nocturno en un modo totalmente robótico. Además, ASTMON puede proporcionar estimaciones de la extinción atmosférica y la cobertura de nubes para toda la superficie del cielo al mismo tiempo. El rango espectral del instrumento está directamente relacionado con la sensibilidad espectral del detector y el uso de la rueda de filtros, que puede contener uno, tres o cinco filtros dependiendo de la versión. La configuración más común es con filtros astronómicos Johnson B, V y R, pero pueden añadirse otros filtros con un diámetro de 1,25 pulgadas.



Figura 3.12: ASTMON del Observatorio Astronómico de la Universidad Complutense de Madrid (Aceituno et al., 2011).

Como el detector es una cámara CCD astronómica, se pueden utilizar diferentes tiempos de exposición para cubrir una amplia gama de luminancias del cielo. El procedimiento de calibración se basa en la fotometría astronómica y la precisión de la medición del brillo del cielo está relacionada con este procedimiento. (Aceituno et al., 2011)

3.3.2.3. DSLR con Lente Ojo de Pez

Las cámaras comerciales con lente de ojo de pez pueden proporcionar información cuantitativa sobre la luminancia del todo el hemisferio superior con una sola exposición. En comparación con las cámaras CCD, estos sistemas son más accesibles y altamente transportables. La precisión de las mediciones depende del procedimiento de calibración y de la propia cámara. Los sensores CMOS y la conversión analógica-digital de las cámaras modernas con una digitalización de 14 bits proporcionan una posibilidad de medición lineal en un rango dinámico de 1-16384 con una sola exposición. Esto suele ser suficiente

para la monitorización del cielo nocturno, y se puede obtener un rango dinámico mayor con imágenes HDR (High Dynamic Range), (Kolláth et al., 2020). Se recomienda ver el Apéndice B.

3.3.2.4. Sky Quality Camera

La Sky Quality Camara (SQC, por sus siglas en inglés) Figura 3.13 consiste en una cámara comercial DSLR Canon EOS 6D, que tiene una velocidad de cuadro completo de 20.2 Megapíxeles (5496 x 3670), un sensor CMOS acoplado con un lente ojo de pez (Sigma EX DG con una distancia focal de 8 mm) siempre a una apertura completa de f/3.5. Adicionalmente, la SQC cuenta con un software propio que le ha permitido convertirse en una herramienta muy útil para medir la contaminación lumínica diseñada y calibrada por Andrej Mohar de Euromix, ya que genera mapas de brillo y mapas CCT.



Figura 3.13: Sky Quality Camara.

Las configuraciones son establecidas por Andrej Mojar, al igual que todas las

calibraciones particulares para tener un análisis sistemático de la contaminación lumínica. La cámara se debe montar sobre un trípode y el plano focal de la cámara se pone paralelo al plan del horizonte para obtener imágenes de todo el cielo. La Tabla 3.2 presenta las configuraciones técnicas estándar de operabilidad de la SQC.

Modo de Programa	Manual.
Formato	RAW ON
Apertura	Completamente abierta (f/3.5 en el Sigma de 8 mm)
Sustracción del dark	ON
Reducción de ruido de alta velocidad	Estándar
Balance de Blancos	AWB (Balance de Blancos Automático).
GPS	ON
Fecha/Hora/Zona	Verificar que los datos sean los correctos

Tabla 3.2: Configuraciones técnicas SQC.

El primer paso para que la SQC opere de forma correcta es la alineación del equipo. Para ello, primero se debe apuntar la cámara con el objetivo orientado hacia el horizonte norte. A continuación, la cámara se inclina 90° hacia atrás para apuntar el objetivo hacia el zenit. Ahora, para una alineación fina con el plano horizontal, se puede utilizar la tapa del objetivo plana y un nivel de burbuja en el plano horizontal, es muy importante que se haga una buena alineación. Sin embargo, el lente registra 186° de la bóveda celeste, esto fue una consideración del fabricante para tener un margen error en alineación. Finalmente, cabe resaltar que se debe buscar una buena posición para la cámara, ya que en ocasiones se encuentran objetos que limiten la visión de las fuentes de interés.

Encontrar los tiempos de exposición y el ajuste de velocidad ISO adecuados es importante para minimizar el ruido y evitar la saturación. Generalmente, un ISO bajo es menos ruidoso, pero requiere tiempos de exposición más largos. Los tiempos de exposición largos son poco prácticos para las series temporales y los objetos en movimiento, como las nubes, y provocan la difuminación

de objetos celestes debido a la rotación de la Tierra. Si se encuentra en un lugar nuevo y no dispone de información acerca de la calidad del cielo, se recomienda que se compruebe el histograma de la primera imagen y se decida si puede prolongar el tiempo de exposición hasta un valor tal que la señal más grande (el canal G-verde suele tener la señal más grande) no supere el 60 % del valor máximo del píxel en el lugar más brillante del horizonte. Se puede ver el histograma inmediatamente después de tomar la imagen. Por esta razón, el fabricante sugiere que el ISO con el que debe operar la cámara es ISO 1600, pero si nos encontramos en un cielo prístino podemos usar ISO 3200 y con respecto al tiempo de exposición en la Tabla 3.3 presenta las recomendaciones operación.

Sky Brightness at zenith (<i>mag/arcsec²</i>)	Tiempo de exposición (s)
Superior a 22	180
20-22	120
19-20	60
19	30
18	15

Tabla 3.3: Valores recomendados por el fabricante para los tiempos de exposición según la magnitud.

Finalmente, la SQC es un instrumento que está logrando posicionarse como uno de los más completos para la caracterización del ALAN. Esto debido a los 3 canales RGB y sus calibraciones que brindan información de toda la bóveda celeste en mapas de NSB y CCT, permitiendo caracterizar las fuentes de contaminación lumínica en sitio de interés. Además, para nuestro proyecto se eligió como el instrumento óptimo debido a las razones aquí mencionadas en esta subsección y por ser fácil de transportar.

Parte II

Caracterización del ALAN en la Región Estrella

Capítulo 4

Sitios de Estudio

Chile puede considerarse la capital mundial de la astronomía. Actualmente, posee el 40 % de la infraestructura astronómica del mundo. Sin embargo, se espera que los próximos años contenga alrededor del 70 % de la infraestructura mundial. Este proceso comenzó cuando científicos de Europa y Estados Unidos llegaron a Chile en los años 60 para construir observatorios con mejores condiciones atmosféricas y alejados de centro poblados (Silva, 2020).

Hasta principios de la década de 1990, la contaminación lumínica alrededor de los observatorios astronómicos más importantes en Chile era mínima. La mayoría de los sitios, incluso los cercanos a grandes ciudades, como el Cerro Tololo, cerca de La Serena, mostraban una valores NSB consistente con los niveles naturales (Cinzano et al., 2001). En la década de 1990, Chile experimentó un enorme crecimiento económico y poblacional, con un aumento anual sostenido del PIB que oscilaba entre el 5 y el 10 %. Este desarrollo se debe en gran parte a la actividad minera que se realiza en la región norte (Blanc, 2016).

Hoy en día, el nivel de contaminación lumínica afecta a zonas cada vez más amplias y con mayor intensidad, alcanzando grandes distancias, perjudicando las observaciones astronómicas y plantea importantes problemas medioambientales, ecológicos y de salud humana (Kolláth et al., 2020). Si el aumento sostenido del brillo del cielo no se controla adecuadamente, podríamos per-

der las “ventanas al universo” del desierto de Atacama. Actualmente, existen algunos registros del NSB desde los diferentes observatorios como los presentes en: el Cerro Tololo (Krisciunas et al., 2007), Cerro La Silla (Mattila & Väisänen, 1996) y Cerro Paranal (Patat, 2003), pero estas mediciones suelen realizarse al cenit. Por lo tanto, no cuentan con una buena resolución espacial para cuantificar o detallar la contribución NSB de las ciudades cercanas. Esto mismo ocurre para los datos satelitales (Hänel et al., 2018). Es por esta razón que buscamos generar el primer mapa cuantitativo de brillo superficial ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) desde sitios de interés astronómico, naturalístico y turísticos en la Región de Coquimbo.

Para este trabajo se seleccionaron dos observatorios astronómicos: el Observatorio Las Campanas y el Observatorio ESO La Silla. Debido a que ambos se encuentran afectados por la Ruta 5; el sitio naturalístico que se seleccionó fue Parque Nacional Bosque Fray Jorge, un sitio que se caracteriza por cuidar y preservar la fauna y la flora en la región de Coquimbo. Además, el parque es la única reserva Latinoamérica en contar con la certificación de la fundación Starlight de reserva Starlight, esto quiere decir que aparte preservar especies animales y vegetales, cuida los cielos oscuros dentro de su territorio. Finalmente, el último sitio fue Cerro Grande dentro de la ciudad de la Serena, este sitio lo utilizaremos como referencia para un cielo contaminado. A continuación describiremos cada uno de los sitios con mayor detalle:

4.1. Observatorio Las Campanas

El Observatorio Las Campanas (LCO, en inglés Las Campanas Observatory¹) es un observatorio astronómico propiedad de Carnegie Institution for Science² (CIS) y operado por la misma institución. Se encuentra en el Cerro Las

¹<http://www.lco.cl/>

²<https://carnegiescience.edu/>

Campanas, cerca del extremo sur del desierto del Atacama (III Región) aproximadamente a 100 kilómetros al noreste de la ciudad de La Serena y a más de 2400 m de altura.



Figura 4.1: Panorámica del cielo nocturno sobre el observatorio de Las Campanas. En el primer plano se pueden ver los telescopios Magallanes. En el lado derecho, el resplandor rojo es airglow. Créditos: Yuri Beletsky.

El LCO fue construido con el propósito de observar el hemisferio sur. Sin embargo, desde 1986 se convirtió en el principal sitio de observación del CIS debido a que los observatorios (Monte Wilson y Monte Palomar) del hemisferio norte fueron clausurados por la contaminación lumínica de la ciudad de los Ángeles. Actualmente, el LCO cuenta con cuatro telescopios, el Swope de 1 m, du Pont 2.5 m y los Magallanes que son dos telescopios gemelos 6.5 m de diámetro del espejo principal. Además, dentro del cerro se encuentran otros telescopios de otras instituciones como: telescopio de Varsovia 1.3 m y Birmingham Solar Oscillations Network (BiSON). En el 2025 se espera que terminé la construcción del Telescopio Gigante de Magallenes (GMT). Este telescopio hace parte de la nueva generación de telescopios extremadamente grande.

4.2. Observatorio ESO La Silla



Figura 4.2: Panorámica del Observatorio ESO La Silla. Créditos: ESO/H. Zodet.

El observatorio La Silla es un complejo astronómico en Chile que cuenta con 14 telescopios ópticos de diferente tamaño hasta 3.6 m de diámetro, todos operados por el Observatorio Europeo Austral³ (ESO). El observatorio es uno de los más grandes del hemisferio sur y fue el primero en Chile en ser utilizado por la ESO, se encuentra ubicado en una montaña en la parte sur del desierto de Atacama (IV Región) aproximadamente a 80 kilómetros al noreste de la ciudad de La Serena y a una altitud de 2400 m.

³<https://www.eso.org/>

4.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge

El Parque Nacional Bosque Fray Jorge⁴ (BFJ) es un parque nacional chileno que pertenece al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE) y es administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Este Parque Nacional de 9.989 hectáreas es además Reserva de la Biosfera de la UNESCO desde 1977 y en el 2013 se ha convertido en Reserva Starlight⁵ siendo el único de Suramérica hasta la fecha. Este sitio, ubicado en la IV región de Chile, presenta un fenómeno natural extraordinario: un bosque, tipo valdiviano, en una zona desértica costera. La existencia de este bosque depende de la condensación de la neblina costera, llamada *camanchaca*, ya que la pluviosidad del área no supera los 113 mm. anuales. Canelos, olivillos, tepas y gran variedad de helechos, sobreviven a más de 1.250 km de su hábitat normal, en una superficie de 400 hectáreas aproximadamente (Cook-Mena et al., 2019).

El BFJ es un sitio de estudio del Centro Regional de Estudios Avanzados en Zonas Áridas⁶ (CEAZA) y diferentes universidades de Chile que realizan investigaciones en ecología (Meserve et al., 2016), fauna (Kelt et al., 2016) y flora (Squeo et al., 2016). Incluso, se han desarrollado investigaciones genética basada en metazoos donde se sugiere que el Bosque Fray Jorge es una reliquia de los bosques que ocuparon este paisaje durante el Paleógeno / Neógeno, el cual se retrajo debido a la aridificación de la región, con una edad aproximada de divergencia de más de 20 millones de años (Villagrán, 2018). Por todas estas razones, BJJ es uno de los sitios referentes a nivel naturalístico de Chile.

⁴<https://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-bosque-fray-jorge/>

⁵Apéndice C

⁶<http://www.ceaza.cl/>



Figura 4.3: Panorámica del Parque Nacional Bosque Fray Jorge en dirección oeste. Créditos: Alvaro Vivanco.

4.4. Conurbación La Serena-Coquimbo

La conurbación La Serena-Coquimbo se ubica en la región IV de Chile. En la Figura 4.4, encontramos en la parte de la izquierda, la ubicación de la región dentro de Chile. En la imagen central, se puede observar la división de la región en tres provincias: Elqui, Limarí y Choapa. La provincia más poblada es la Provincia de Elqui, está dividida en seis comunas. Las comunas de La Serena con 249.656 habitantes, y Coquimbo con 256.735 habitantes, concentran el 74,4% de la población regional. Las áreas urbanas de estas dos comunas conforman el Gran La Serena, siendo así la cuarta área metropolitana más densamente poblada de Chile, después de Santiago, Valparaíso y Concepción. Representa el 2,6% de la población total de Chile. En la parte derecha de la imagen, se aprecia el mapa de densidad poblacional del Gran La Serena según último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas de Chi-

le. Finalmente, la Tabla 4.1 contiene los datos del crecimiento de población y área urbana del Gran La Serena.

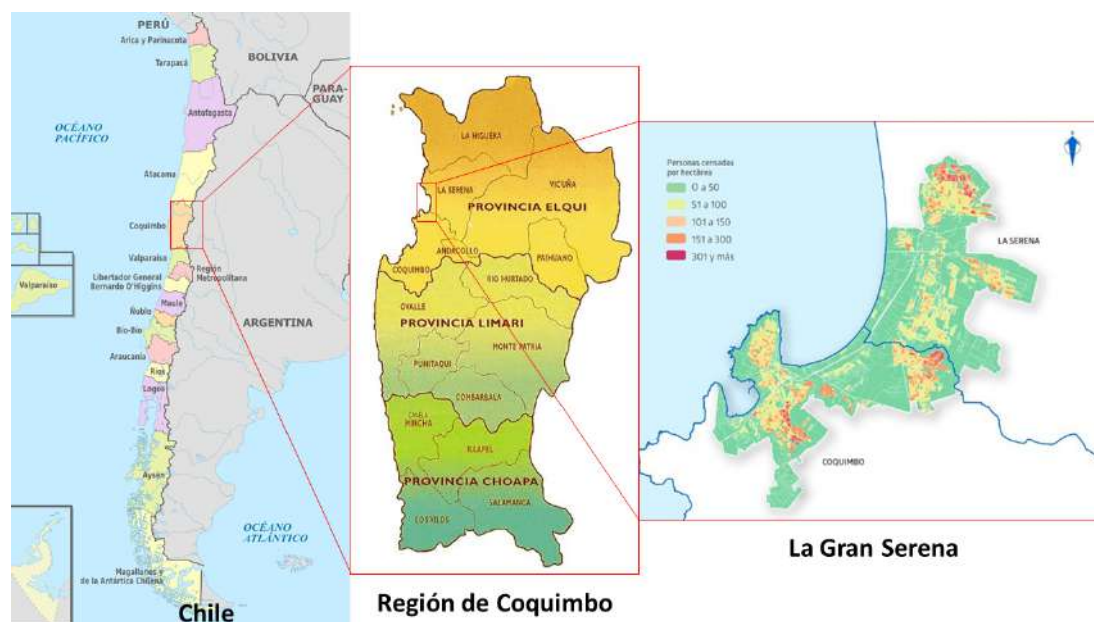


Figura 4.4: Mapa del Gran La Serena visualizado desde el mapa de Chile (izquierda), mapa de la región de Coquimbo con sus provincias (centro) y mapa de la densidad poblacional de la conurbación La Serena-Coquimbo (derecha).

Año	Población	Tasa de Crecimiento Anual (%)	Área (Ha)	Tasa de Crecimiento Anual (%)	Densidad (Hab/Ha)
1940	40605		298.659		135.96
1952	62580	3.7	542.179	5.1	115.42
1960	74603	2.2	777.859	4.6	95.91
1970	115606	4.5	1126.230	3.8	102.65
1982	145469	1.9	1922.890	4.6	75.65
1992	220172	4.2	2799.182	3.8	78.66
2002	302131	3.2	4030.495	3.7	74.96
2012	417357	3.3	5452.650	3.1	76.54

Tabla 4.1: Crecimiento de población y área urbana de la conurbación La Serena-Coquimbo (Orellana Mc Bride, 2020).

Capítulo 5

Proceso de Adquisición y Reducción de los Datos

En este capítulo se detallan los pasos para adquirir de forma correcta los datos con la SQC (por sus siglas en inglés, Sky Quality Camera), así como el procesamiento a través del software SQC (Versión 1.9.4), generado por Andrej Mohar de Euromix (Ljubljana, Eslovenia), para el procesamiento de las imágenes. Este software de procesamiento permite reducir y calcular mapas de NSB y mapas de CCT en diferentes proyecciones como: proyección azimutal, proyección cilíndrica y proyección Hammer-Aitoff. En la Figura 5.1, se observan las proyecciones que el software tiene disponible.

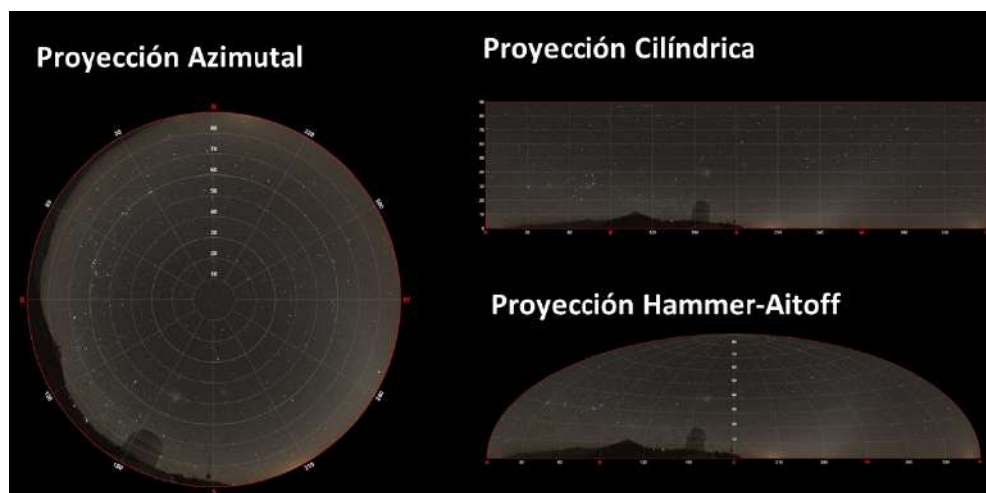


Figura 5.1: Proyecciones del software SQC. El sitio de la imagen RGB es el LCO.

Hay que recordar que las proyecciones son unas técnicas utilizadas en la geografía que se utilizan para mostrar un objeto tridimensional (3D) en una superficie bidimensional (2D). Las proyecciones se basan en la perspectiva visual y el análisis de aspecto para proyectar un objeto complejo en un plano más simple. La proyección azimutal es una proyección que preserva tanto la distancia como la dirección (azimut) respecto del punto central, es decir, tenemos un mapa de toda la bóveda celeste donde el punto central es el Cenit. La proyección cilíndrica es una proyección de una esfera sobre un cilindro. Esta proyección consta de meridianos verticales igualmente espaciados perpendiculares a paralelos horizontales espaciados. Finalmente, la proyección Hammer Aitoff es una proyección azimutal modificada. Esta proyección consiste en reducir a la mitad las coordenadas verticales del aspecto ecuatorial de un hemisferio y duplicar los valores de los meridianos desde el centro. Conserva la igualdad de superficie, pero ya no es azimutal (Snyder, 1987).

5.1. Adquisición de los Datos

Para iniciar con la adquisición de los datos, se recomienda siempre revisar los parámetros de configuración de la cámara, los cuales el fabricante ha resumido en la Tabla 3.2. Estos parámetros permiten un uso adecuado de la SQC, así como la información necesaria para que el software pueda realizar el procesamiento de las imágenes. La mayoría de estas configuraciones se hacen una sola vez y quedan guardadas. Sin embargo, es muy importante verificar el parámetro de GPS y fecha cada vez que se usa la SQC, ya que es un parámetro de inicio para el procesamiento de las imágenes.

Una vez listas las configuraciones de la cámara, podemos llevar nuestra cámara al terreno como se ve en la Figura 5.2 a modo de ejemplo. El siguiente paso es buscar un sitio donde el horizonte tenga la menor cantidad de objetos posibles. Una vez encontrado el lugar para la observación debemos realizar la alineación con respecto al horizonte y ubicar la cámara hacia el norte. La co-

recta alineación de la cámara nos permite tener los datos de toda la bóveda celeste, de lo contrario podemos perder parte del cielo. Esta pérdida del cielo se traduce en una falta de datos en los mapas de NSB y CCT.



Figura 5.2: Preparación de una jornada de observación con SQC.

Para finalizar el proceso de configuración de la SQC es necesario ajustar los parámetros de ISO y tiempo de exposición, para esto el fabricante sugiere unos valores dependiendo de las condiciones de NSB del sitio de observación (Tabla 3.3). Sin embargo, cuando se desconocen los valores del NSB, lo que se sugiere es hacer una serie de prueba con variaciones pequeñas en tiempo (e.g, 10s, 30s, 60s) hasta encontrar un tiempo donde los datos no se saturan y la Señal a Ruido (S/N) sea considerada buena ($S/N > 20$). En la Figura 5.3

presentamos la ubicación de la SQC en todos los sitios de interés para este proyecto.

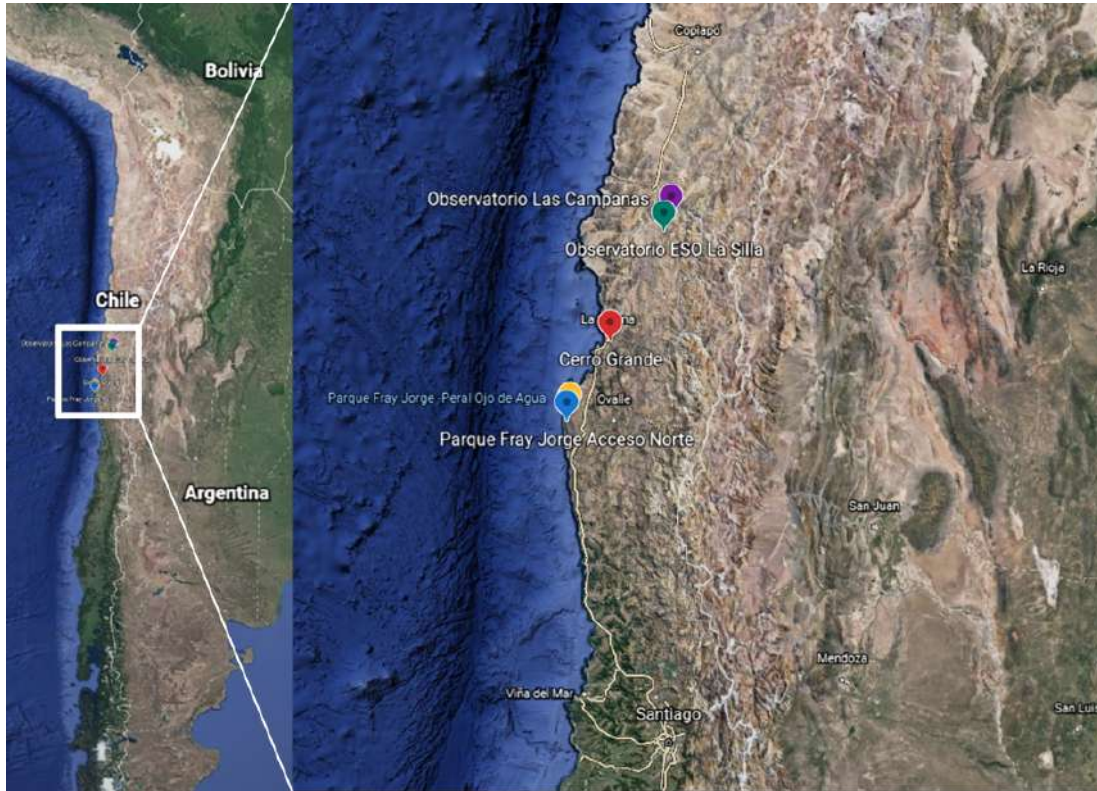


Figura 5.3: Posiciones de la SQC en los sitios de estudio. A la izquierda el mapa de la parte sur del continente, mientras que a la derecha un zoom en dirección a la zona donde se encuentra el equipo, las etiquetas corresponden: morado LCO, verde La Silla, rojo Cerro Grande, Amarillo BFJ Camping y azul BFJ acceso norte.

A continuación describiremos los datos que ocupamos para el desarrollo del proyecto:

5.1.1. Observatorio Las Campanas

Las observaciones se realizaron durante la noche del 24 de noviembre del 2019 entre las 22:50:17 h y las 03:46:55 h locales (GTM -3) cerca del telescopio Swope ($29^{\circ} 0' 42''$ S, $70^{\circ} 42' 2''$ W, elevación de 2290 m). Estas imágenes fueron obtenidas por quien escribe con las siguientes configuraciones: ISO 1600 y tiempo de exposición de 120s, se seleccionaron estas configuraciones siguiendo las recomendaciones del fabricante y las condiciones presen-

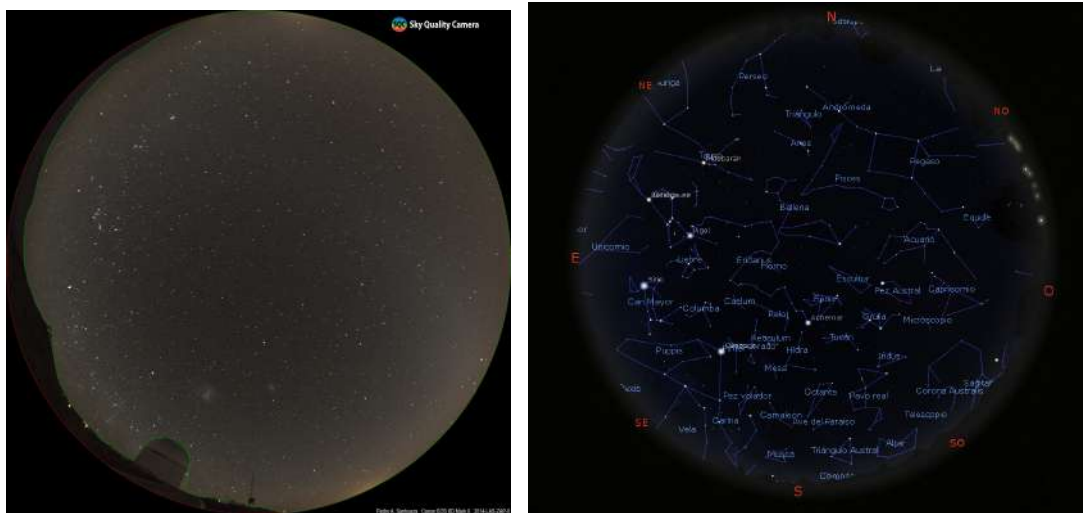
tes esa noche. Al final de la noche se obtuvieron 82 imágenes, 50 de ellas son los que utilizaremos para el análisis de este proyecto y sus características se encuentran descritas en la Tabla A.1. Las otras imágenes se descartaron por lo siguiente: 16 imágenes se encuentran en negro, esto es debido a que la cámara tenía activada una opción de descanso del sensor y las otras 16 no se tuvieron en cuenta debido a que de las 2:00 hasta 3:15 el sitio presento demasiada humedad, lo cual hizo que estas imágenes no sean útiles.



Figura 5.4: Condiciones climáticas de la noche del 24 al 25 de noviembre del 2019 desde el LCO.

En la Figura 5.4 evidencia las condiciones climáticas registradas en el LCO para esa noche. En este panel encontramos diferentes líneas que están asociadas a diferentes variables como: la línea roja representa la temperatura, la línea azul la humedad, la línea morada es el punto de rocío o la temperatura a

la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, la línea verde el viento, la línea negra la presión, las líneas punteadas horizontales cerca de humedad y viento son líneas de referencias para el mal clima, las líneas verticales celestes son el inicio de la noche astronómica y la línea vertical gris es la hora en que Luna se puede divisar. Todas estas variables nos permiten entender bajo que condiciones estuvo la noche durante los instantes en los cuales se tomaron los datos.



(a) Bóveda celeste en formato RGB.

(b) Bóveda celeste a través de Stellarium

Figura 5.5: Mapa de la bóveda celeste desde el LCO con la Vía Láctea cerca al horizonte (primera imagen) para el día 24-11-2019 a las 22:18:48.

Finalmente, para las 50 imágenes con las que trabajamos tuvimos que realizar un ajuste debido a una mala configuración del parámetro GPS. Este error en la configuración inicial de la cámara ocasionó que cuando se iba a realizar el procesamiento de los datos en el programa de la SQC, el programa cortara parte del horizonte. La solución a este problema fue utilizar Stellarium y encontrar la verdadera hora en la que fue tomada las imágenes, encontrando un desfase de 43 minutos en todas las imágenes del LCO. Una vez ajustado las imágenes con la hora, obtenemos el cielo correspondiente a nuestras imágenes. En las Figuras 5.5 y 5.6 se presentan las imágenes RGB de la bóveda celeste para la primera y la última imagen de esa noche con su respectiva simulación a través

de Stellarium¹ para que se pueda realizar una comparación visual con el fin de reconocer las estrellas y objetos celestes presentes en las imágenes RGB.

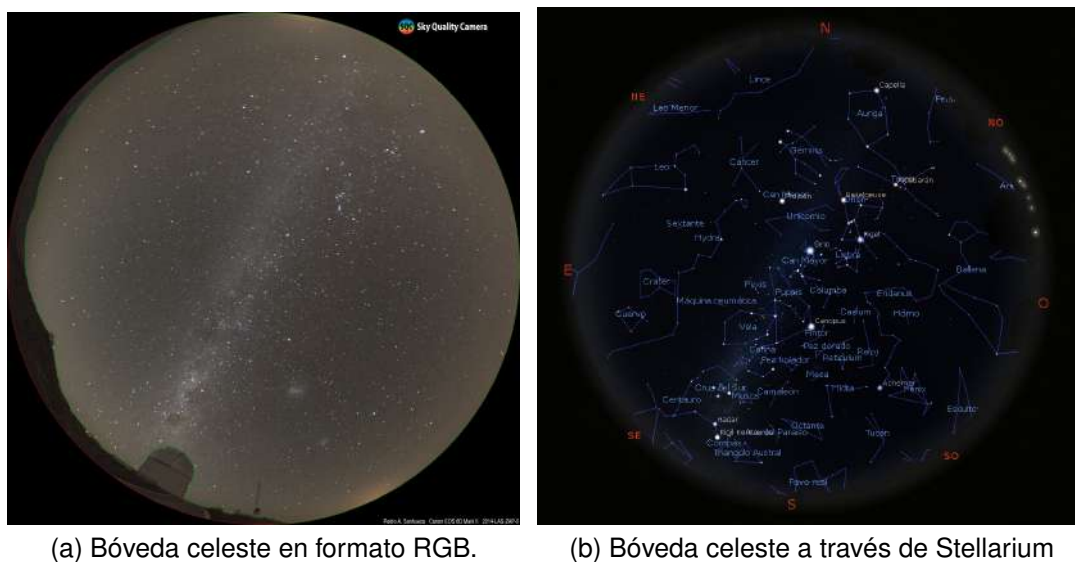


Figura 5.6: Mapa de la bóveda celeste desde el LCO con la Vía Láctea cruzando el zenit (último dato) para el día 25-11-2019 a las 03:46:55.

5.1.2. Observatorio ESO La Silla

Las observaciones se realizaron durante la noche del 24 de mayo de 2019 entre 20:10:01 y las 21:30:35 hora local (GMT -4) cerca del telescopio ESO 1m Schmidt (29° 15' 22"S, 70° 44' 21"W, elevación de 2332 m). Estas imágenes fueron obtenidas por Pedro Sanhueza² y Guillermo Damke³. Durante la noche se obtuvieron 6 imágenes, debido a que durante la noche ingresaron nubes difusas al sitio y para mantener una consistencia decidimos trabajar solo con dos datos que tenían las configuraciones de ISO 1600 y tiempo de exposición de 120s, las características de estos datos se encuentran en la Tabla A.1. Adicionalmente, las imágenes que no utilizamos fueron movidos de la posición inicial, lo cual hace que no podamos tener un estudio en el tiempo de un mismo lugar.

¹<https://stellarium.org/>

²Director de la OPCC

³Astrónomo ULS/AURA

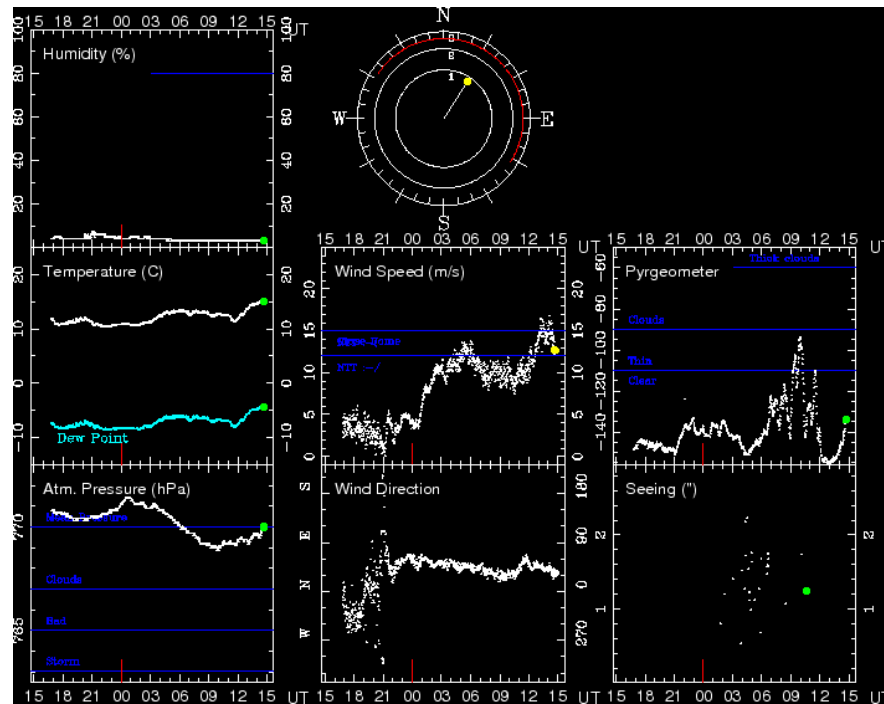


Figura 5.7: Condiciones climáticas la noche del 24-05-2019 desde ESO La Silla.

La Figura 5.7 evidencia la condición climática registrada en el observatorio para esa noche. Cada una de las cajas nos detalla una variable meteorológica como: humedad, temperatura y punto de rocío, presión atmosférica, velocidad y dirección de viento; dentro de algunas cajas encontramos una línea azul horizontal que marca los valores de referencia para diferentes condiciones como: nublado, tormenta y despejado.

Finalmente, los datos presentan el mismo problema de configuración de GPS del sitio anterior. Por lo tanto, se realizó la comparación con Stellarium para encontrar la verdadera hora en la que fue tomada las imágenes, encontrando un desfase de 5 horas en las imágenes de ESO La Silla. En la Figura 5.8 se presenta la imagen RGB de la bóveda celeste para la primera imagen de esa noche y la simulación de la misma a través de Stellarium, para que se pueda realizar una comparación y así poder reconocer las estrellas y objetos celestes presentes.



(a) Bóveda celeste en formato RGB.

(b) Bóveda celeste a través de Stellarium.

Figura 5.8: Mapa de la bóveda celeste desde ESO La Silla para el día 24-05-2019 a las 20:10:01.

5.1.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge

Las observaciones se realizaron en la noche del 9 de enero del 2021 desde las 22:56:06 hasta 23:25:50 hora local (GMT -3) cerca del el acceso norte del parque ($30^{\circ} 37' 36''\text{S}$, $71^{\circ} 39' 43''\text{W}$, elevación de 440 m), permitiendo una visual bastante amplia hacia el sur y evitando el manto de nubes que cubre la zona del bosque relicto. Luego, se midió también en el sector del camping Viento Sur ($30^{\circ} 34' 11''\text{S}$, $71^{\circ} 38' 22''\text{W}$, elevación de 290 m) en las cercanías de la pequeña localidad de Peral Ojo de Agua. Este último lugar no cuenta con alumbrado público, por propia decisión de la comunidad, por lo que no fue necesario alejarse de la misma para obtener un cielo oscuro.

Los dos sitios se encuentran distanciados por aproximadamente 8 km. De ahora en adelante llamaremos los datos del Bosque Fray Jorge como BFJ y tendrán un guion con E, si es la entrada norte o una C si es el camping. Las imágenes que se obtuvieron están registrados en la Tabla A.1, pero en resumen fueron: 3 imágenes en el acceso norte y 5 imágenes desde el camping todos con las configuraciones de ISO 1600 y tiempos 120s, se seleccionaron estas configuraciones siguiendo las recomendaciones del fabricante y las con-

diciones presentes esa noche. En la Figura 5.9 señala la ubicación de la SQC con respecto a las ciudades cercanas.

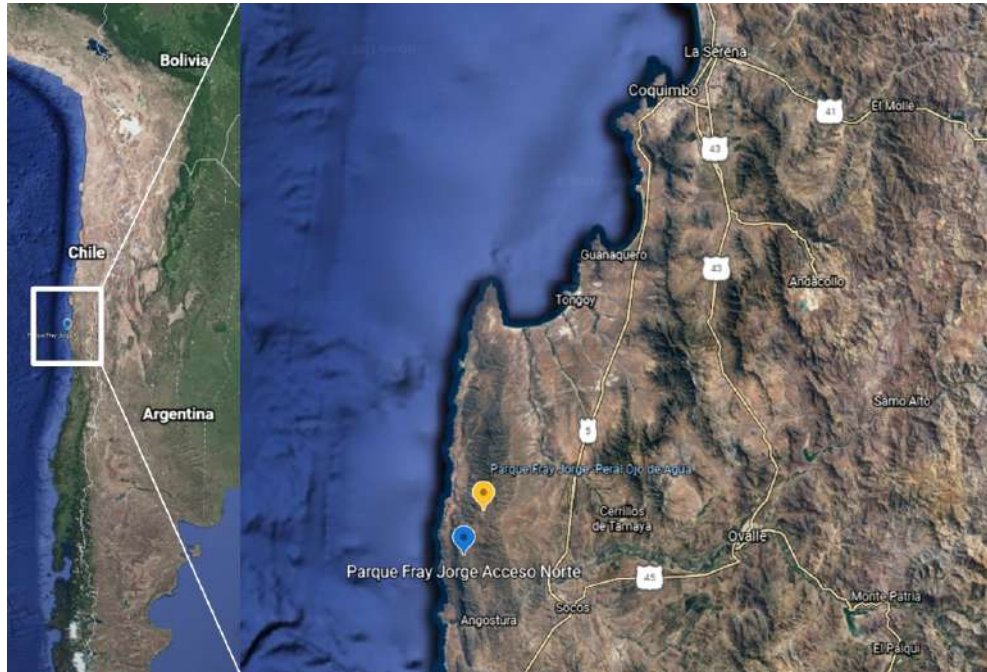


Figura 5.9: Posición de la SQC en el Parque Fray Jorge. A la izquierda el mapa de la parte sur del continente, mientras que a la derecha un zoom en dirección a la zona donde se encuentra el equipo. La etiqueta amarilla corresponde a la posición en la localidad de Peral, mientras que la etiqueta azul a la posición en el acceso norte.



(a) Bóveda celeste en formato RGB.



(b) Bóveda celeste a través de Stellarium.

Figura 5.10: Mapa de la bóveda celeste desde BFJ-E para el día 9-01-2021 a las 22:52:06.

Para la imagen de Cerro grande solo se le realizó la corrección por el horario de verano. En la Figura 5.12 se presenta la imagen RGB de la bóveda celeste de esa noche y la simulación de la misma a través de Stellarium para que se pueda realizar una comparación y así poder reconocer las estrellas y objetos celestes. Hay que recordar que los datos de Cerro Grande se incluyen con fines de comparar los sitios anteriores con un cielo contaminado.

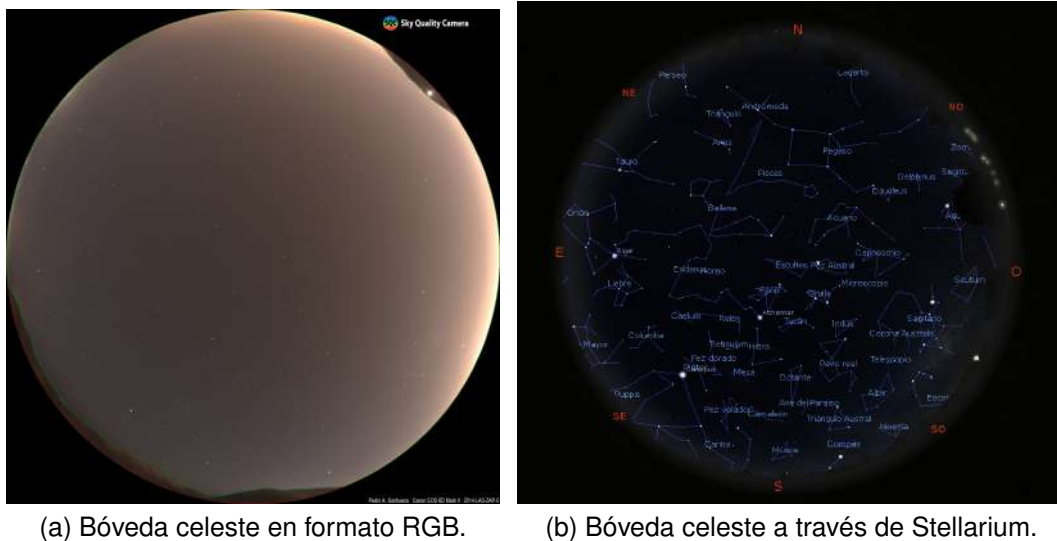


Figura 5.12: Mapa de la bóveda celeste desde Cerro Grande, La Serena para el día 29-09-2019 a las 22:01:35. La simulación de la bóveda celeste en Stellarium cuenta con el parámetro de contaminación lumínica de cielos urbanos.

Debido a la pandemia COVID-19 y los riesgos que esta implica, no se pudo volver a obtener nuevos datos, ya que la ciudad de La Serena se encontraba en cuarentena, medida tomada por el Gobierno Nacional y Local para enfrentar la emergencia sanitaria⁴. Finalmente, la ULS desarrolló un protocolo de contingencia para enfrentar la situación y una de las consideraciones a tener en cuenta fue suspender salidas académicas, prácticas o cualquier actividad donde los estudiantes se vieran expuesto a contraer el virus. Por estas razones no hay un monitoreo constante del brillo del cielo para los sitios de interés.

⁴Para mayor información sobre medidas del gobierno de Chile: <https://www.gob.cl/coronavirus/pasoapaso/>

5.2. Procesamientos de los datos

Una vez hemos adquirido nuestros datos, procedemos a seguir los pasos descritos a continuación para realizar un correcto procesamiento de las imágenes. La Figura 5.13 muestra los pasos utilizados para configurar los parámetros en el software SQC.

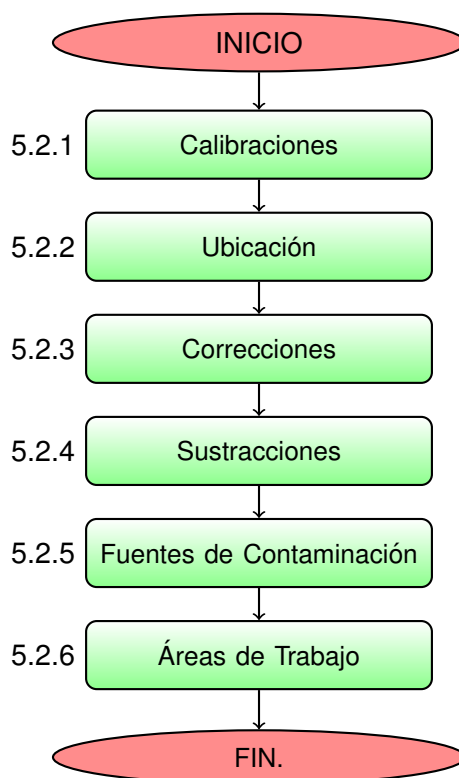
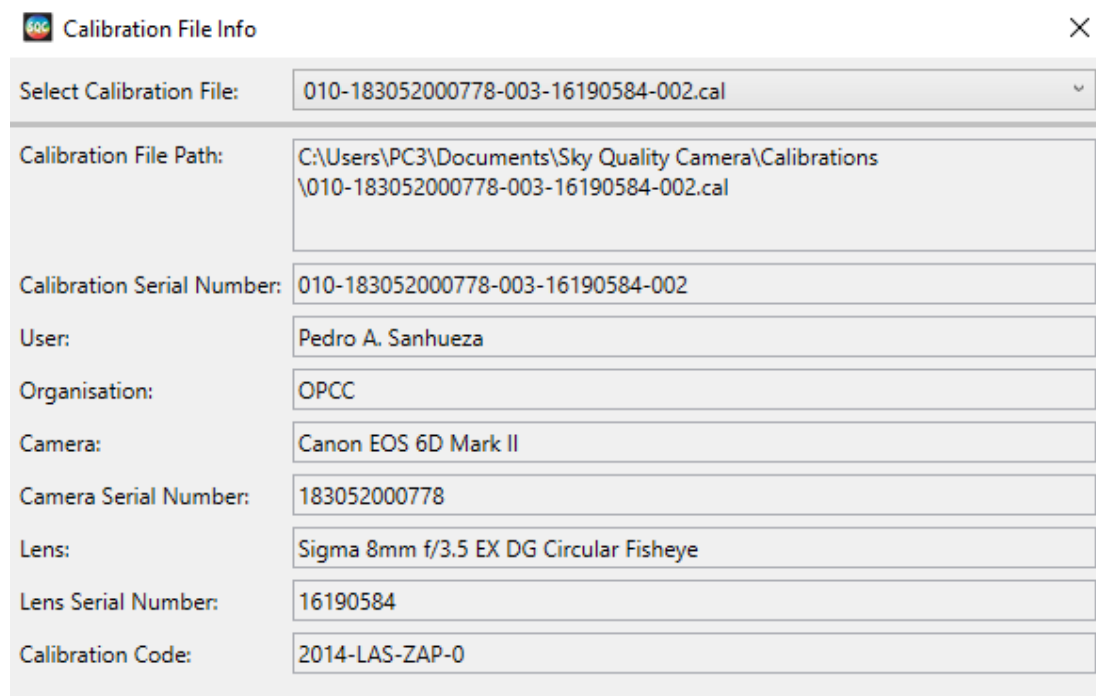


Figura 5.13: Diagrama de la metodología de la configuración de los parámetros de la SQC.

5.2.1. Calibraciones

Cuando compramos nuestro SQC, el fabricante nos entrega un archivo con calibraciones que coinciden con nuestros dispositivos. Este archivo es único por cámara y debe cargarse en el software para que reconozca los parámetros con los que fue configurado el equipo. Este paso solo se realiza una vez, ya que en el software queda guardado por defecto. Además, si el software realiza una actualización, es necesario volver a cargarlos. En la Figura 5.14 presentamos la información de la calibración vista desde el software, en el primer

cuadro ingresamos el archivo y los demás cajones serán llenados automáticamente por el programa.



Calibration File Info	
Select Calibration File:	010-183052000778-003-16190584-002.cal
Calibration File Path:	C:\Users\PC3\Documents\Sky Quality Camera\Calibrations\010-183052000778-003-16190584-002.cal
Calibration Serial Number:	010-183052000778-003-16190584-002
User:	Pedro A. Sanhueza
Organisation:	OPCC
Camera:	Canon EOS 6D Mark II
Camera Serial Number:	183052000778
Lens:	Sigma 8mm f/3.5 EX DG Circular Fisheye
Lens Serial Number:	16190584
Calibration Code:	2014-LAS-ZAP-0

Figura 5.14: Calibraciones de la SQC.

5.2.2. Ubicación

Antes de comenzar, se recomienda revisar que todos los datos estén en formato RAW, para nuestro caso particular al ser una cámara Canon, esto archivos vienen en formato **.cr2**. El software solo reconoce y funciona con datos en este formato. En caso de tener otro tipo de extensión (e.g, .JPG, .PNG) el software solo dejará visualizar la imagen. Una vez cargada la imagen lucirá como la Figura 5.15. En la parte izquierda se encuentra señalado un cuadro rojo, este cuadro corresponde a las configuraciones que se ajustan desde la cámara. Si la adquisición se realizó de forma exitosa, es decir, teniendo en cuenta todos los pasos de la Sección 3.3.2.4, el software completará automáticamente los datos de casillas Location e Image Data. De lo contrario deberá ingresarlos de forma manual.

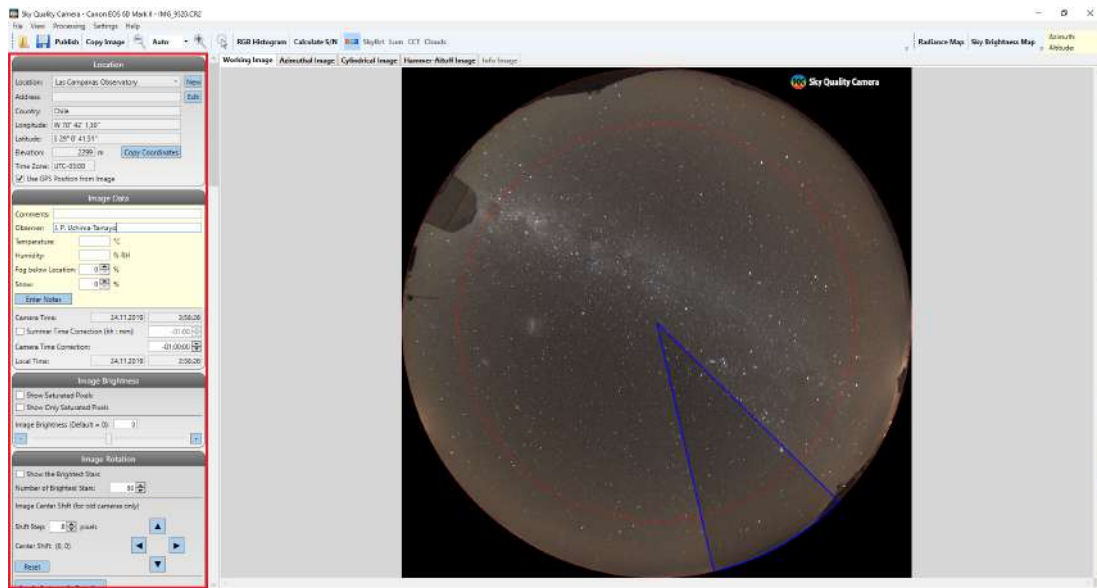


Figura 5.15: Visualización de los datos desde el software SQC.

La casilla de Location es la encargada de todo lo referente a la ubicación. Adicionalmente, la casilla permite guardar sitios de estudio para futuras comparaciones, mientras que la casilla Image Data es la encargada de la información de las condiciones climatológicas como: temperatura, humedad, porcentaje de nieve y niebla, también se emplea para las correcciones por el cambio de huso horario por el verano.

5.2.3. Correcciones

Uno de los pasos más importante en la toma de los datos es la alineación de la cámara con el eje horizontal. Sin embargo, el software permite hacer correcciones mucho más finas con la casilla Image Rotation, esta casilla utiliza la información de la ubicación, tiempo y las estrellas visibles en la imagen, para rotar la imagen de forma que el norte corresponda a la parte superior de la imagen.

La casilla SkyBorder define el contorno del horizonte para que el programa sepa desde qué parte de la imagen debe realizar la reducción. En el contorno se recomienda que todos los objetos queden dentro de la línea amarilla del

horizonte. No obstante, hay algunos objetos que se pueden dejar por fuera del contorno como por ejemplo, ramas delgadas, algunas antenas o cualquier objeto que sea pequeño y delgado, ya al sustraerlos puede provocar pérdidas de la información debido a que el programa opera creando áreas bajo la curva de los objetos. En la Figura 5.16, se puede observar en la parte sur de la imagen una cúpula y una antena, la cúpula crea un área que la cubre casi por completo, mientras que la antena crea un área donde es más la porción del cielo que del objeto.

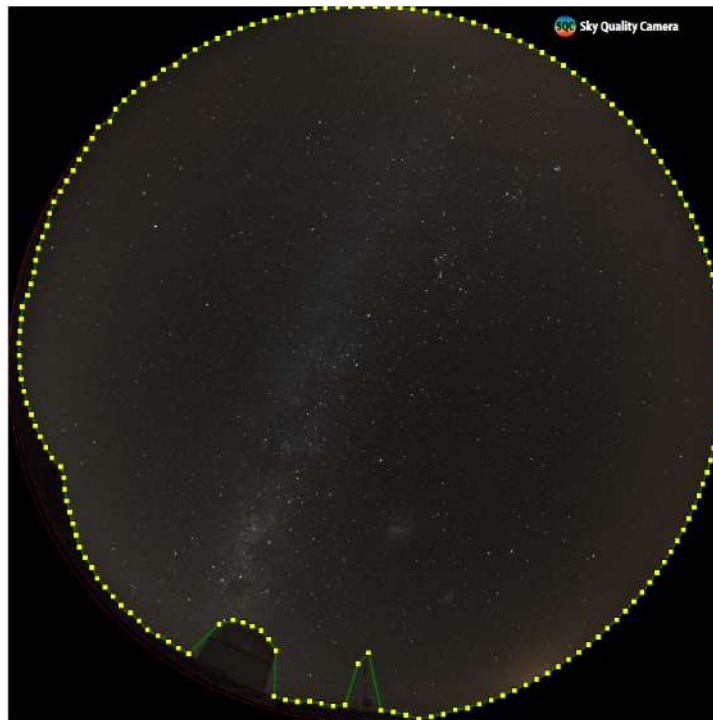


Figura 5.16: Ejemplo de la definición del parámetro de contorno del software de procesamiento de la SQC. En dirección sur (parte inferior de la imagen) una antena y la cúpula del telescopio Swope de 1m en LCO.

5.2.4. Sustracciones

La casilla Sky Brightness, calcula el brillo superficial del cielo utilizando el canal verde de la cámara. La calibración hecha por el fabricante se realiza basándose en la fotometría astronómica clásica utilizando mediciones del brillo de las estrellas y de la extinción durante una noche fotométrica.

El software procesa el brillo del cielo ($L_{v,sky}$) para cada píxel de la cámara. Además, calcula la NSB y la corrige por el ángulo θ del plano de la imagen $E_{v,cos}$:

$$E_{v,cos} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L_{v,sky}(\theta, \phi) \sin(\theta) \cos(\theta) d\phi d\theta \quad (5.1)$$

y el brillo superficial para el hemisferio de la imagen $E_{v,scal,hem}$ sin corrección del coseno (Duriscoe, 2016):

$$E_{v,scal,hem} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L_{v,sky}(\theta, \phi) \sin(\theta) d\phi d\theta \quad (5.2)$$

En las ecuaciones, $L_{v,sky}$ es el brillo del cielo, θ es el ángulo cenital y ψ es el ángulo azimutal. Para las imágenes de todo el cielo, es decir, cuando se toma la imagen en el plano horizontal, $E_{v,cos}$ se suele denominar luminancia horizontal.

El primer parámetro a definir es el coeficiente de extinción, hay que recordar que el coeficiente de extinción es la atenuación de la luz de las estrellas por la atmósfera terrestre. La extinción en una determinada banda se relaciona con la extinción en otra banda por medio de las curvas de extinción. En nuestro caso particular decidimos trabajar con el valor de extinción para la banda V del LCO ($0.15 \text{ mag airmass}^{-1}$), descritos por (Krisciunas et al., 2017), ya que se realizaron pruebas variando el valor y no se encontró una variación significativa, las pruebas realizadas se encuentran en la sección de resultados.

Una de las opciones del programa es hacer una remoción de las estrellas brillantes y la Vía Láctea. Sin embargo, para nuestro trabajo preferimos no usar estas opciones con el fin de conservar todas las fuentes naturales que tienen nuestros datos. La última opción es aplicar sobre todos los datos un suavizado (smoothing) para eliminar ruido dentro de las distribuciones de NSB y mapas CCT. Esta opción fue ocupada para nuestro trabajo.

El software calcula el smoothing usando una media aritmética de cada píxel en el mapa de brillo del cielo proporcionando una medida más completa de la calidad del cielo que la medición del zenit por sí sola. Cada zona del cielo se pondera por igual, cada píxel en la imagen representa un área igual del cielo nocturno. Para un sistema de imágenes de todo el cielo, esto significa que la imagen debe convertirse a una proyección de igual área. Algunas partes del cielo pueden estar cubiertas por árboles o montañas; estas zonas se tratan como datos que faltan para no sesgar la media. En la siguiente ecuación se muestra el cálculo de este indicador; n es el número de píxeles de brillo del cielo, b_i es el brillo a través de todo el hemisferio en coordenadas azimutales y (Φ, θ) es el ángulo zenital (Duriscoe, 2016).

$$b_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n b_{i(\Phi, \theta)}}{n} \quad (5.3)$$

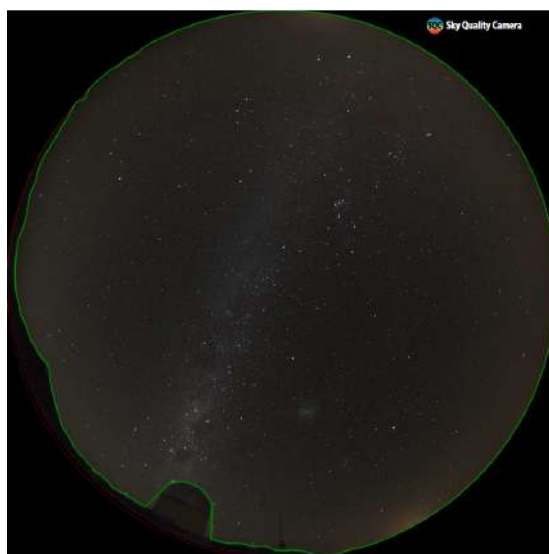
Para la casilla CCT Image las opciones disponibles son la remoción de estrellas brillantes y el suavizado de los datos, las cuales ya mencionamos anteriormente como el software los calcula. Los mapas CCT se calculan a partir de los tres canales espectrales.

5.2.5. Fuentes de Contaminación

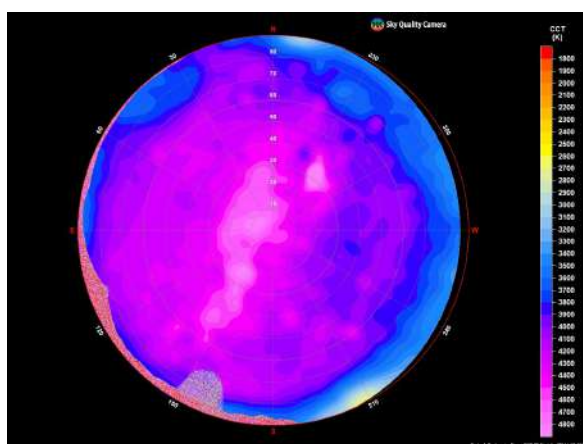
Las fuentes de contaminación son difíciles de observar en el formato RGB, para facilitar una mejor visualización usamos las diferentes proyecciones y formatos que tiene el software.

Para encontrar las áreas de contaminación lumínica utilizamos los mapas de NSB y CCT con las diferentes proyecciones. En la Figura 5.17, se puede apreciar que es mucho más sencillo identificar las fuentes de ALAN en mapas NSB y CCT que en el formato RGB, es decir, a través de los mapas podemos identificar zonas donde la CCT sea menor. Estas zonas las ubicamos en el mapa de NSB y podemos tener un lugar de referencia presente en los dos mapas. Finalmente, el software brinda la posibilidad de conectarse con el World Atlas

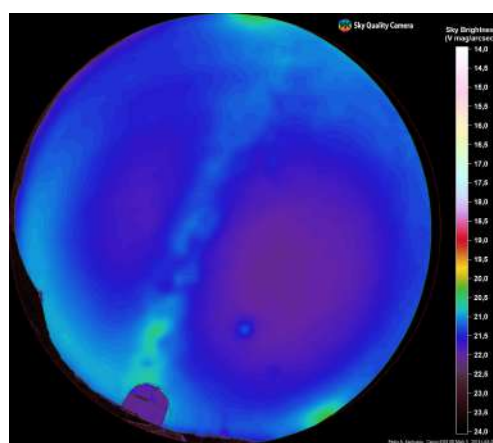
de contaminación lumínica (Sección 3.2), esto es bastante útil, ya que completa nuestra definición de área. En el atlas podemos buscar la direcciones de las principales ciudades, cuando se identifican tendremos un valor de azimuth, este intervalo de azimuth es el que se compara con los valores de las áreas, previamente identificadas en los mapas NSB y CCT. A continuación realizamos un ejemplo del paso de delimitación de una fuente de ALAN.



(a) Visualización RGB



(b) Visualización CCT



(c) Visualización NSB

Figura 5.17: Bóveda celeste desde el LCO en visualizaciones RGB, NSB y CCT del software SQC.

5.2.5.1. Identificación de las Fuentes de Contaminación Lumínica

Una vez se haya realizado todo el procesamiento de los datos y antes de exportar los archivos, revisamos la delimitación de las fuentes de contaminación lumínica. En este proyecto para definir los límites se plantea lo siguiente:

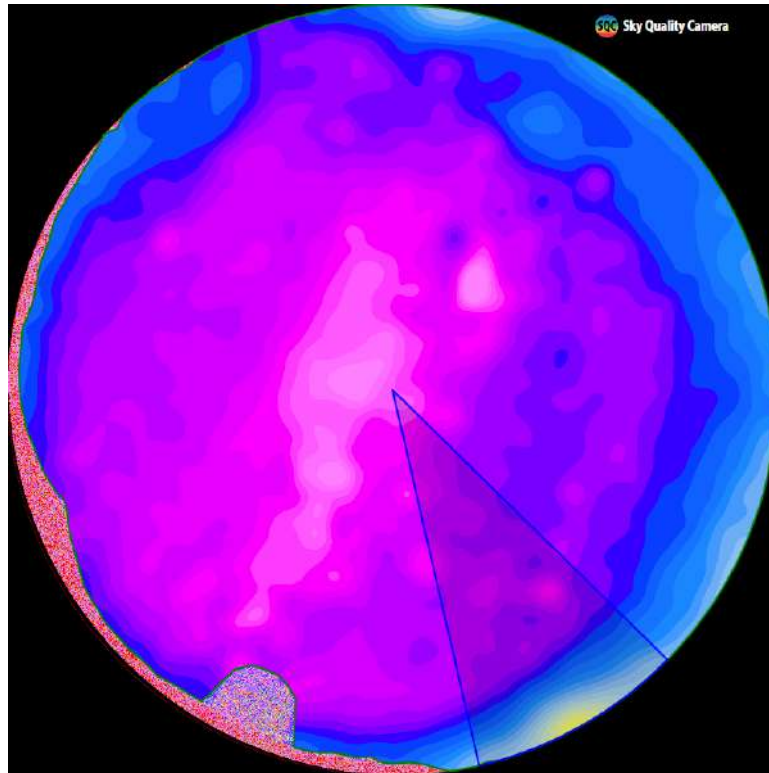


Figura 5.18: Delimitación de la región I en el LCO desde el software SQC.

El primer paso es cambiarnos a la proyección en CCT y aplicar la opción de smoothing. Los mapas CCT permiten identificar las fuentes por medio de los diferentes perfiles de nivel. Para este trabajo decidimos llamar estos perfiles de nivel como isofotas. Las isofotas son áreas con los mismos valores de CCT, cada color de las isofotas corresponde a una misma temperatura. Luego, se debe buscar regiones donde la CCT sea cálida, una vez identificada la región se hace un zoom para tener mejor detalle de las isofotas que la componen. Estas isofotas serán las que nos brindan la delimitación de nuestras fuentes de contaminación. En este sentido, los dos puntos donde cierta isofota toca el horizonte local serán considerados como una región con propiedades ho-

mogéneas. Por consiguiente, obtendremos los límites para nuestra área de estudio (Figura 5.18).

Después de conocer los límites del azimuth, abrimos el World Atlas de Contaminación lumínica y el software pondrá la ubicación de la SQC en el mapa y desde ese punto hacemos las proyecciones en dirección hacia los valores de azimuth que se habían obtenido anteriormente. La Figura 5.19 presenta los azimuths de la región I de los datos de LCO. El número 1 es la posición de la SQC en el World Atlas. Se puede apreciar a la izquierda la costa del océano y la derecha la frontera Chile-Argentina. Las líneas rojas representan la delimitación hecha por el software de los azimuths de interés, dentro de estas líneas se encuentran las ciudades que contribuyen al brillo en esa dirección.

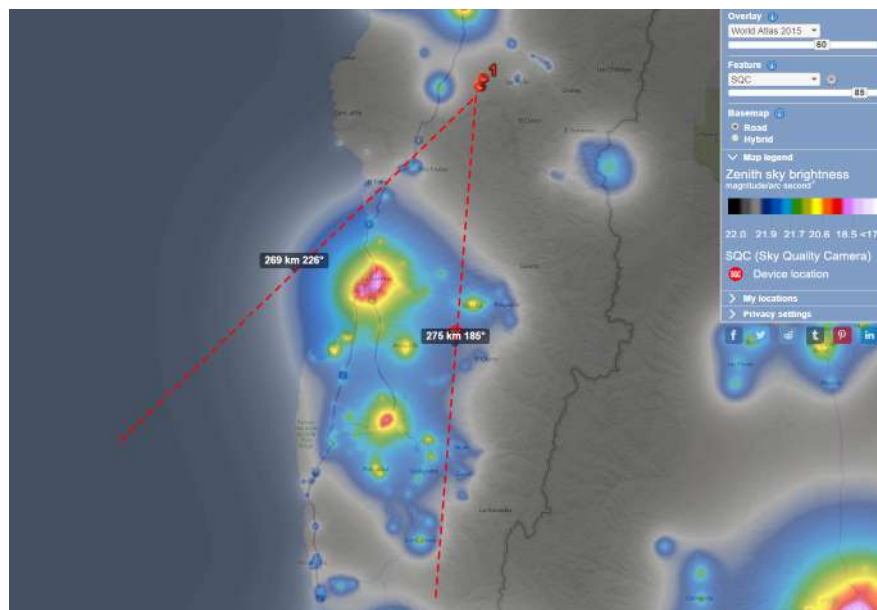


Figura 5.19: Delimitación de la región I en el LCO desde World Atlas.

Adicionalmente, para nuestro trabajo decidimos complementar esta definición de regiones con los perfiles de altimetría para cada una de las fuentes de contaminación desde Google Earth. En la Figura 5.20 presentamos el perfil de altimetría para el área I del LCO. Allí se evidencia cómo desde el lugar donde se tomaron los datos no hay una vista directa hacia las fuentes de

contaminación lumínica en el área I. Finalmente, se repite el proceso para cada zona que sea de interés y para los sitios de estudio. Si se realizó todo el proceso de forma adecuada obtendremos una imagen como la Figura 5.21.



Figura 5.20: Perfil de altimetría de La Serena desde la posición donde se tomaron los datos con SQC en el LCO.

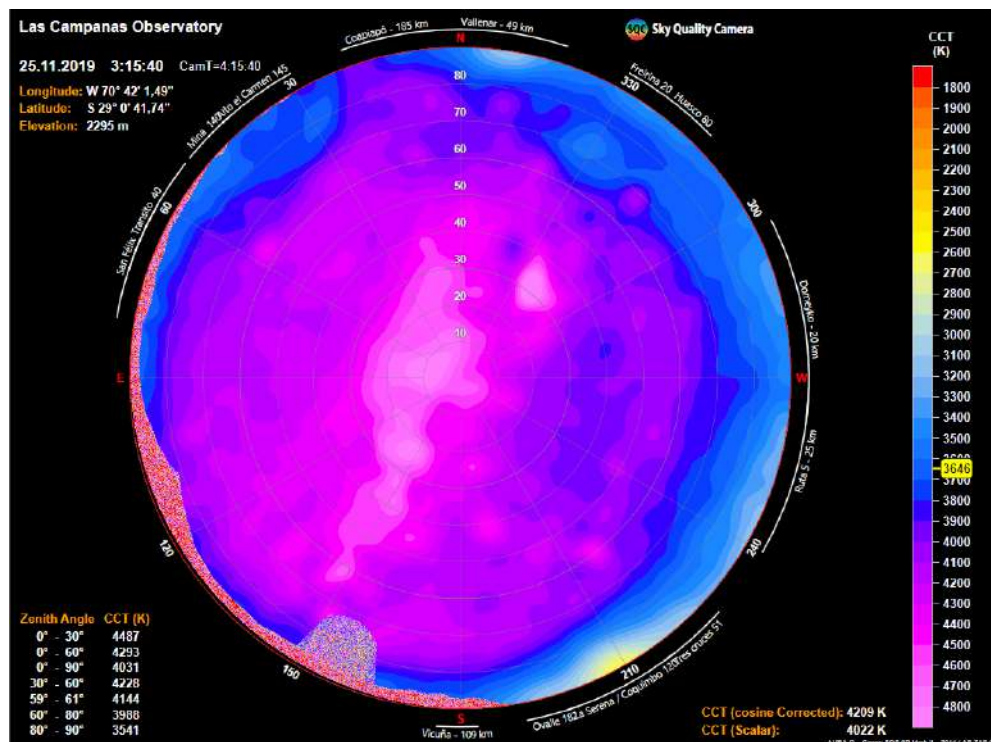


Figura 5.21: Fuentes de contaminación lumínica para el LCO.

5.2.6. Áreas de estudio

El programa nos permite crear sectores, anillos o círculos de análisis, así mismo permite bloquear zonas que no estén dentro de nuestro interés. Estas zonas se pueden ingresar con un cierto valor fijo o podemos hacer un dibujo a mano alzada de la zona para que el programa calcule los valores de azimut y elevación. Por último, se pueden visualizar las diferentes distribuciones de luminosidad o se puede exportar los datos en formato .xlsx. En la Figura 5.22 se presenta un ejemplo de delimitación dentro del software SQC donde arbitrariamente hemos individuado: una región circular (en rojo), un anillo de 10° de elevación con un grosor de 5° (en violeta) y, finalmente, un triángulo (en verde).

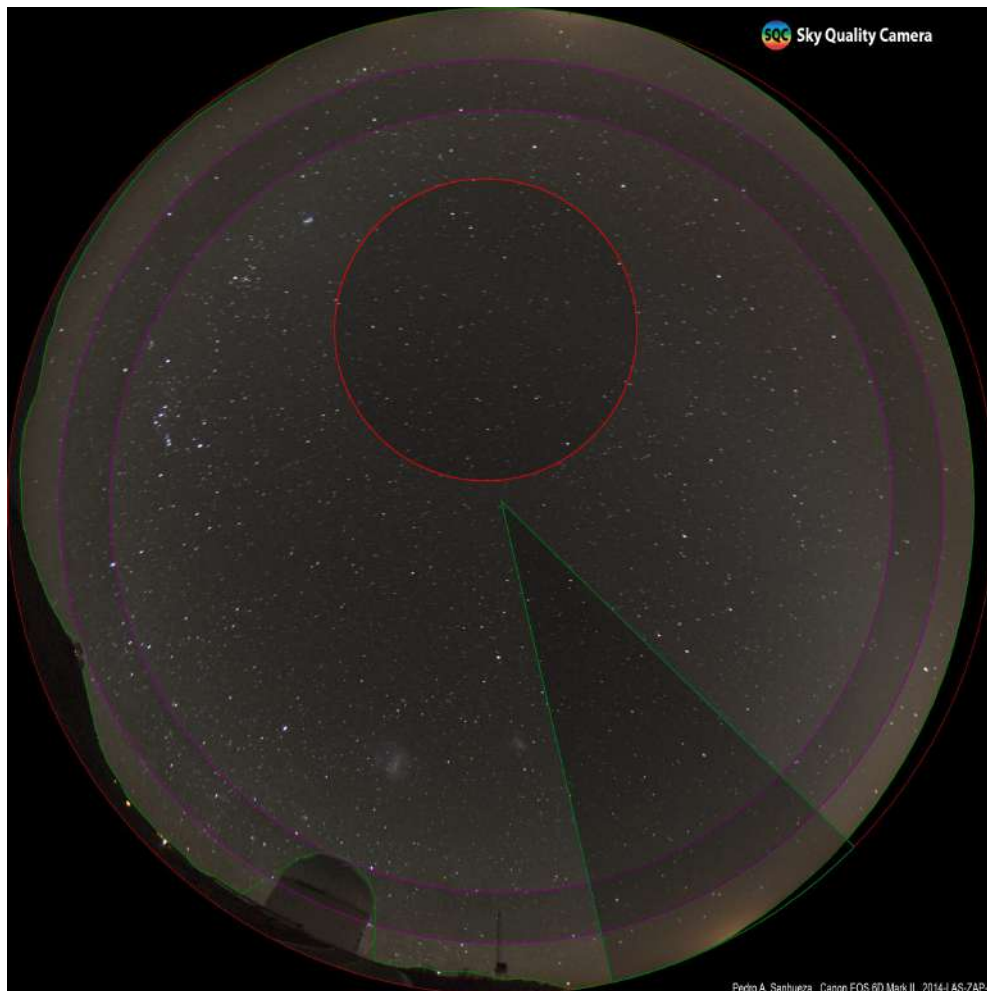


Figura 5.22: Ejemplo de áreas de trabajo del software SQC.

5.2.7. Datos Procesados

Después de realizar todos los pasos descritos anteriormente, podemos seleccionar los mapas y datos que deseamos descargar. La Figura 5.23 presenta el menú de descarga del software SQC. Los archivos como imágenes saldrán en formato que seleccionemos (.jpg, .png, .tiff y .bmp), mientras que los archivos que contienen información sobre las posiciones y valores de NSB y CCT serán en formato csv.

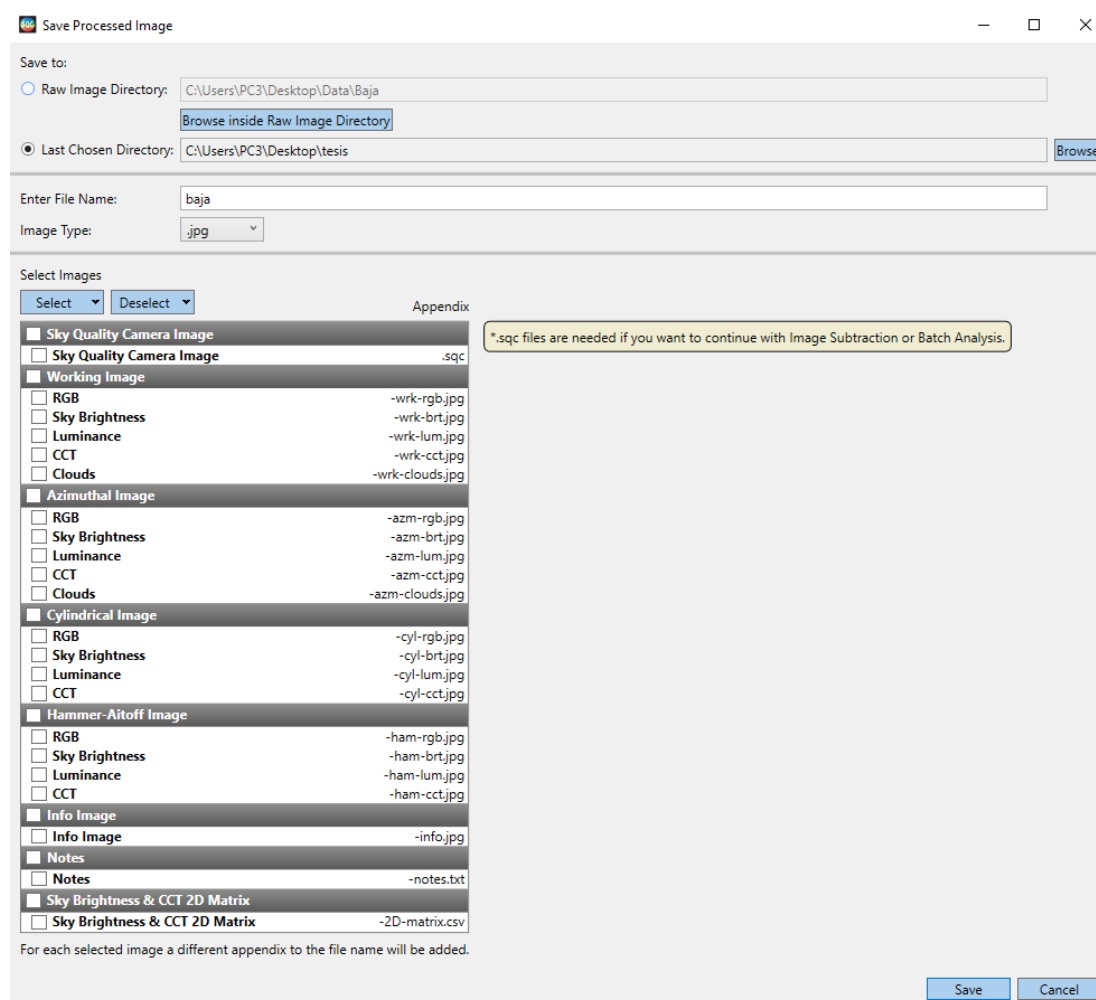


Figura 5.23: Menú de descarga del software SQC.

Capítulo 6

Análisis

6.1. Observatorio Las Campanas

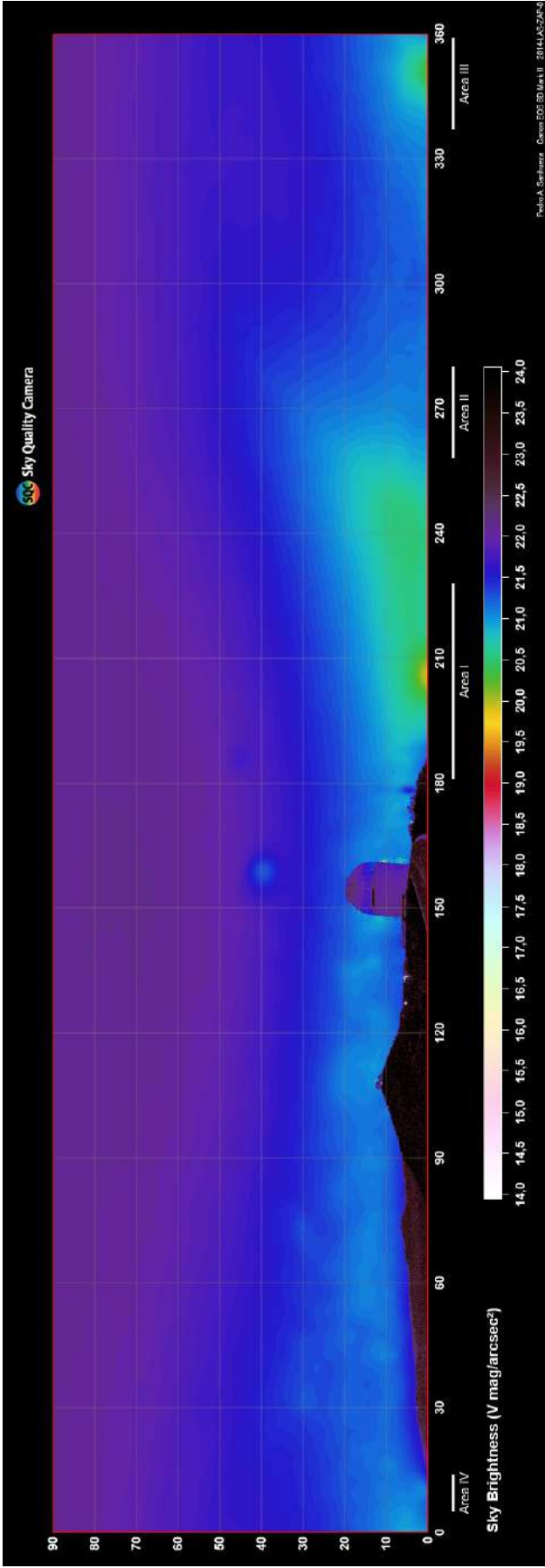
6.1.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT

En esta sección describiremos los pasos que se realizaron para el análisis de las imágenes del LCO, utilizando de ejemplo la primera imagen (LCO1) y la última (LCO50) para este sitio. Este análisis se desarrolla porque existen diferentes variaciones NSB de las contribuciones naturales como airglow, luz zodiacal y Vía Láctea. Partimos examinando los mapas NSB y los mapas CCT. En la Figura 6.1 presentamos los mapas correspondientes a la imagen LCO1 donde se puede detallar la Vía Láctea cerca del horizonte. En ambos mapas podemos observar que tenemos dos zonas que sobresalen con respecto al resto de la imagen, estas áreas tienen un brillo superior 20 mag/arcsec^2 . La primera zona se encuentra entre el horizonte y una elevación de 30° en dirección sur y se extiende hasta el oeste, mientras que la segunda zona está ubicada en el norte desde el horizonte hasta una elevación de 20° . Seguidamente, correlacionamos estas áreas en el mapa CCT y nos damos cuenta de que estos lugares tienen una temperatura mucho más cálida, es decir, la temperatura en estas zonas es inferior a 3000 K.

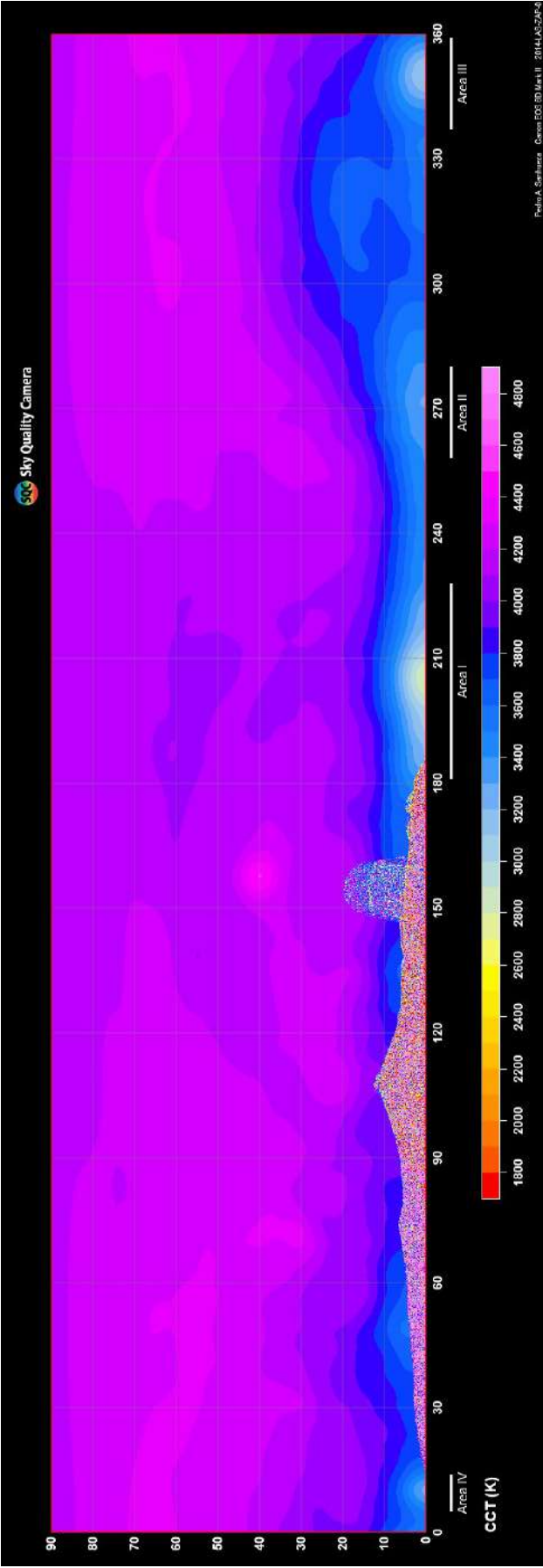
Observando en la imagen CCT podemos identificar 6 áreas que sobresalen

en temperatura. Sin embargo, cuando las correlacionamos con los mapas de brillo evidenciamos que las áreas en los azimuts 50° y 130° no presentan un brillo definido y por esta razón nos las consideramos áreas de estudio del sitio, entonces obtenemos 4 áreas. Posteriormente a las 4 áreas aplicamos los pasos descritos en la sección 5.2.5.1 para obtener los valores de los límites de cada área de estudio. En la Tabla 6.1 presentamos las 4 áreas que se hallaron sobre el horizonte, las ciudades que entran en la dirección visual, los azimuts correspondientes a cada ciudad, la distancia a la que se encuentran las ciudades con respecto al lugar donde estaba ubicada la SQC, la ubicación exacta de las ciudades y el número de habitantes de las ciudades. Para obtener mayor información acerca de las ciudades presentes en cada área de estudio, se sugiere ingresar a los siguientes links:

- Ovalle: <https://municipalidadovalle.cl>
- Andacollo: <https://andacollochile.cl/>
- La Serena: <http://www.laserena.cl/>
- Coquimbo: <https://www.municoquimbo.cl/>
- Ruta 5: <https://laruta5.cl/>
- Vallenar: <https://www.vallenar.cl/>
- Copiapó: <https://copiapo.cl/>
- Alto del Carmen: <https://www.munialtodelcarmen.cl/web/>
- Chiguinto y San Félix: <https://www.munialtodelcarmen.cl/web/comuna/>



(a)



(b)

Figura 6.1: Mapas de todo el cielo desde el LCO con la Vía Láctea cerca al horizonte, el día 24-11-2019 a las 22:18:48. Mapa NSB (arriba) y mapa CCT (abajo).

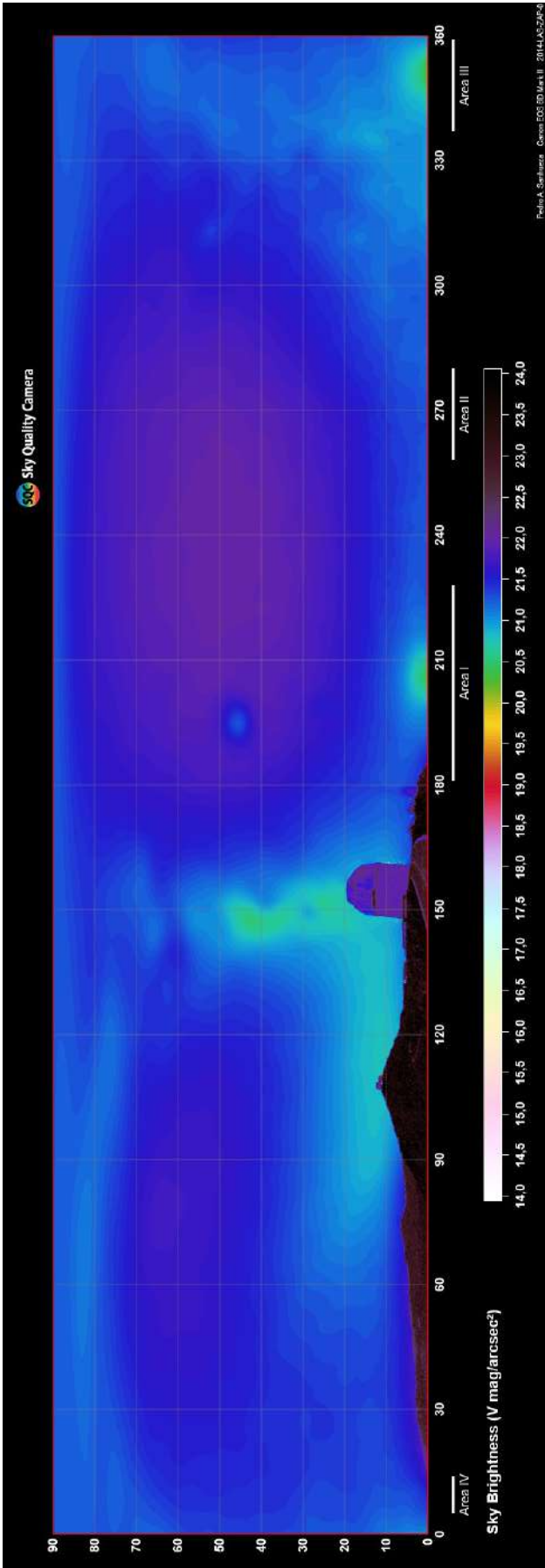
Nombre	Ciudad	Azimut (°)	Distancia (km)	Ubicación	Número de Habitantes (hab)
Area I	Ovalle	191 - 198	180	30° 36' 11" S 71° 12' 11" W	121269
	Andacollo	193 - 197	140	30° 13' 00" S 71° 05' 00" W	11044
	Conurbación La Serena / Coquimbo	203 - 218	111 / 119	29° 54' 10" S 71° 15' 07" W	517435
Area II	Ruta 5	218 - 278	44	Ruta 5 Panamericana Arica-La Serena	No Aplica
	Domeyko	273 - 295	24	28° 57' 17" S 70° 53' 33" W	924
Area III	Vallenar	342 - 2	54	28° 34' 30" S 70° 45' 42" W	51917
Area IV	Copiapó	5 - 19	186	27° 21' 59" S 70° 19' 56" W	153937

Tabla 6.1: Tabla con información sobre las 4 áreas de ALAN desde el LCO.

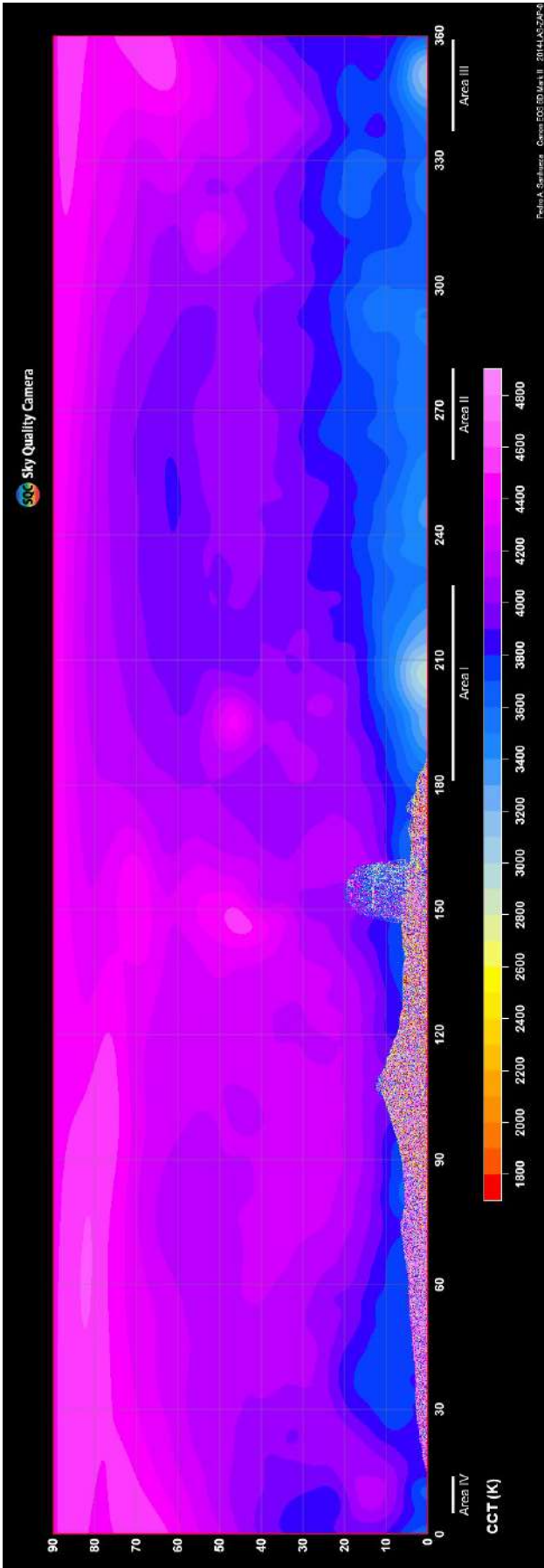
Por otro lado, en la Figura 6.2 presenta el mapa de brillo del cielo y el mapa de CCT correspondientes a la última observación realizada (LCO50), la cual cuenta con la presencia de la Vía Láctea cruzando por el cenit. En el mapa de NSB podemos observar que tenemos las mismas dos áreas de brillantes que los datos de LCO1. Adicionalmente, sobre el azimut 150 (cúpula del telescopio Swope) encontramos una región bastante brillante, la cual corresponde al centro galáctico. Esta afirmación se corrobora viendo la imagen en Stellarium (Figura 5.6). Adicionalmente, se puede observar en el mapa CCT que la dos áreas de temperatura inferior 3000 K siguen presentes. Para mantener una consistencia y poder hacer comparaciones los límites de las áreas permanecieron igual y se registraron en la Tabla 6.2.

Nombre	Límites del Área (°)	Azimut Central (°)	Ancho del Área (°)
Area I	181 - 228	205	47
Area II	258 - 280	269	22
Area III	337 - 359	348	22
Area IV	5 - 14	9	9

Tabla 6.2: Tabla con los límites de las 4 áreas de ALAN desde LCO



(a)



(b)

Figura 6.2: Mapas de todo el cielo desde el LCO con la Vía Láctea cruzando el cenit, el día 25-11-2019 a las 03:46:55. Mapa NSB (arriba) y mapa CCT (abajo).

6.1.2. NSB en función de la elevación

En esta sección estamos interesados en conocer hasta qué elevación con respecto al horizonte las fuentes de ALAN afectan al sitio. Para esto construimos perfiles de distribución angular de brillo, los cuales se calculan desde el zenit hasta el horizonte para cada una de las áreas, utilizando la información de brillo de cada píxel. Estos perfiles nos brindan información acerca de como varía el brillo en función del ángulo zenital. Para el proyecto se decidió realizar una comparación entre azimut central de cada área con un ancho de 1° y dos azimutes de comparación del mismo ancho. Los azimutes de comparación son azimutes donde no hay ninguna fuente de ALAN.

En la Figura 6.3 presentamos el mapa de NSB de la primera observación del LCO dentro del cual se han creado los perfiles de NSB para cada área de estudio y para los azimutes de comparación (líneas amarillas). Las áreas I y III son las áreas que más sobresalen en brillo superficial, observando el perfil de NSB, podemos detallar que se comporta muy similar a las líneas de comparación, pero cuando nos acercamos al horizonte encontramos que el azimut de estudio presenta un aumento, es decir, hay un ángulo zenital desde el cual se presenta una variación considerable de brillo ($\sim 1 \text{ mag/arcsec}^2$). El ángulo zenital en el que se da este cambio de pendiente, será la elevación desde la cual ALAN empezará afectar al sitio.

Las elevaciones en las que ALAN afecta al sitio son: 19° para el área I y 12° para el área II. Sin embargo, hay que tener presente que por la hora en la que fue adquirido el dato, tenemos la presencia de contribuciones naturales, lo cual hace que nuestros datos sean una combinación de las contribuciones naturales y artificiales. El caso de las áreas II y IV no se observa el cambio de pendiente, por el contrario se comporta muy similar a las líneas de comparación. Esto es debido a que las dos áreas se ven afectadas por contribuciones naturales y son muchos más brillantes que las artificiales. Finalmente, dentro de la Figura 6.3 encontramos un círculo rojo, este círculo es el punto mínimo

de NSB ($22,12 \text{ mag/arcsec}^2$).

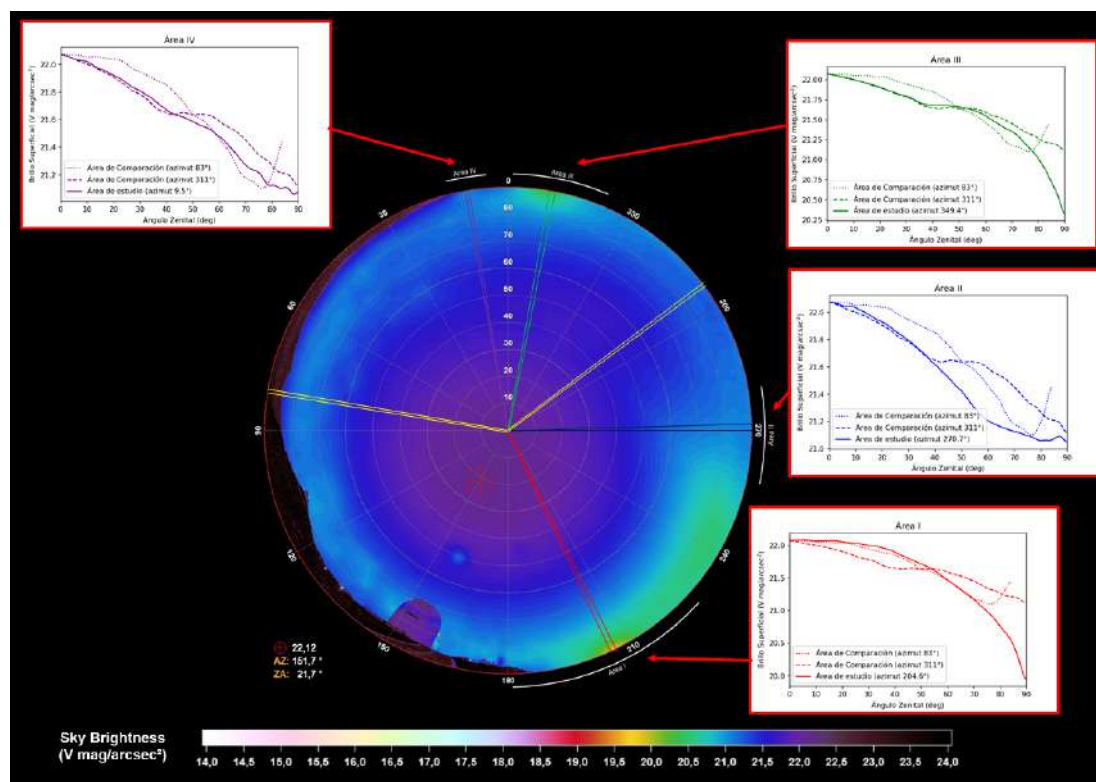


Figura 6.3: Perfiles de elevación de brillo de LCO1: línea Roja área I, línea azul área II, línea verde área III, línea morada IV y las líneas amarillas son los azimutes de comparación. El círculo rojo representa el punto de mínimo NSB

Se utilizaron las últimas observaciones de la noche (LCO50) con el fin de comprender las variaciones en las contribuciones naturales. En la Figura 6.4 presentamos el mismo azimuth central de cada área de estudio con respecto a los dos azimutes de comparación. En este caso los azimutes de comparación tienen diferentes contribuciones naturales a lo largo de su perfil de NSB, lo que implica variaciones en el momento de comparar. Sin embargo, en la Figura se observa que el área I no presenta ninguna contribución natural, por lo tanto podemos determinar la elevación en la que el área I afecta al LCO, hallando el valor donde hay un cambio de pendiente, se determina el valor de su elevación, obteniendo 11° de elevación donde es la contribución artificial. Para el resto de las áreas, no se puede determinar un valor con exactitud debido a la mezcla de las contribuciones naturales con las artificiales. Al igual que el ma-

pa de NSB LCO1, podemos detallar el punto mínimo de NSB, en este caso se presenta un cambio de posición y valor (20 mag/arcsec^2) debido a la presencia de la Vía Láctea.

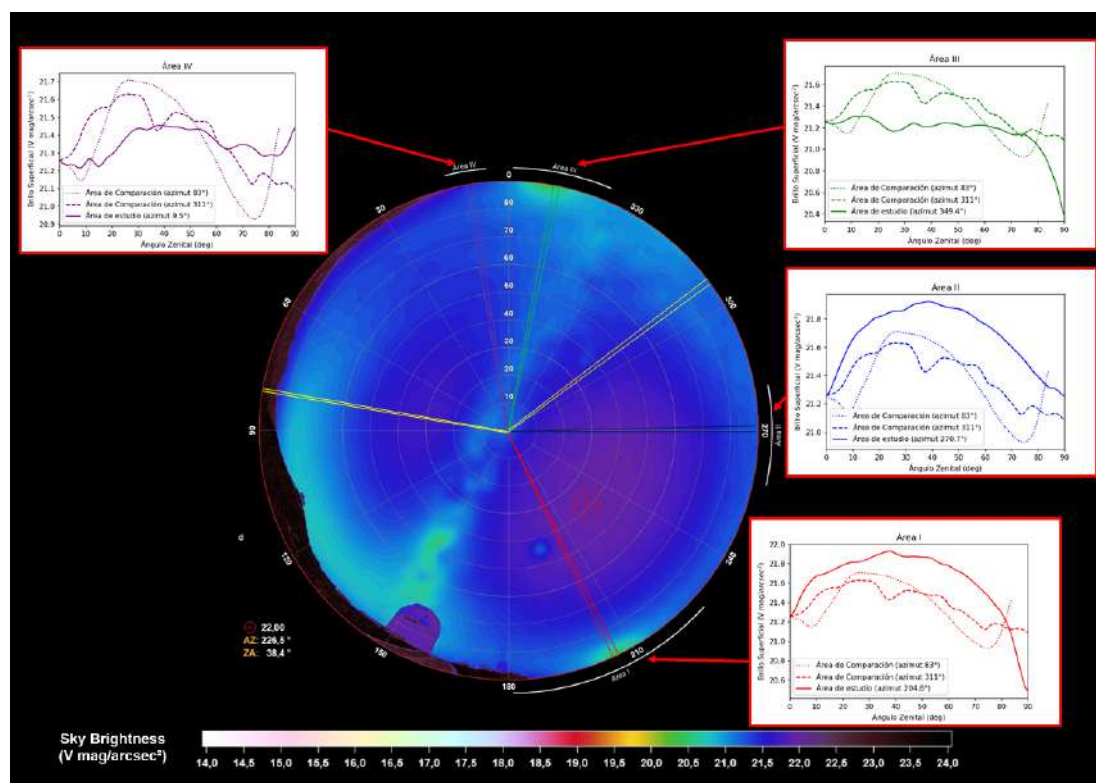


Figura 6.4: Perfiles de elevación de brillo de LCO50: línea Roja área I, línea azul área II, línea verde área III, línea morada área IV y las líneas amarillas son los azimutes de comparación. El círculo rojo representa el punto de mínimo NSB.

Finalmente, con el fin de encontrar una relación entre el NSB y CCT en cada una de las áreas, decidimos construir perfiles azimutales de NSB y de CCT. Estos perfiles fueron contruidos a una elevación fija (1° de elevación). En la figura 6.5 presentamos los mapas de NSB y de CCT con un anillo a una elevación 1° , se puede detallar que en el caso del azimut del área I (azimut 204°) y del III (azimut 349°) se obtiene una relación inversa entre el NSB y CCT, mientras que para el área II está relación no se puede determinar de forma precisa debido a la presencia del airglow. Para el área IV se encuentra centrada en el azimut 9. Sin embargo, para una visualización más sencilla decidimos representarlo sumándole 360° de la esfera completa. Por esta razón, en la Figura

6.5 tenemos el rango de azimut hasta 380° donde el azimut 369° corresponde al centro del área IV y nuevamente encontramos una relación inversa NSB y CCT.

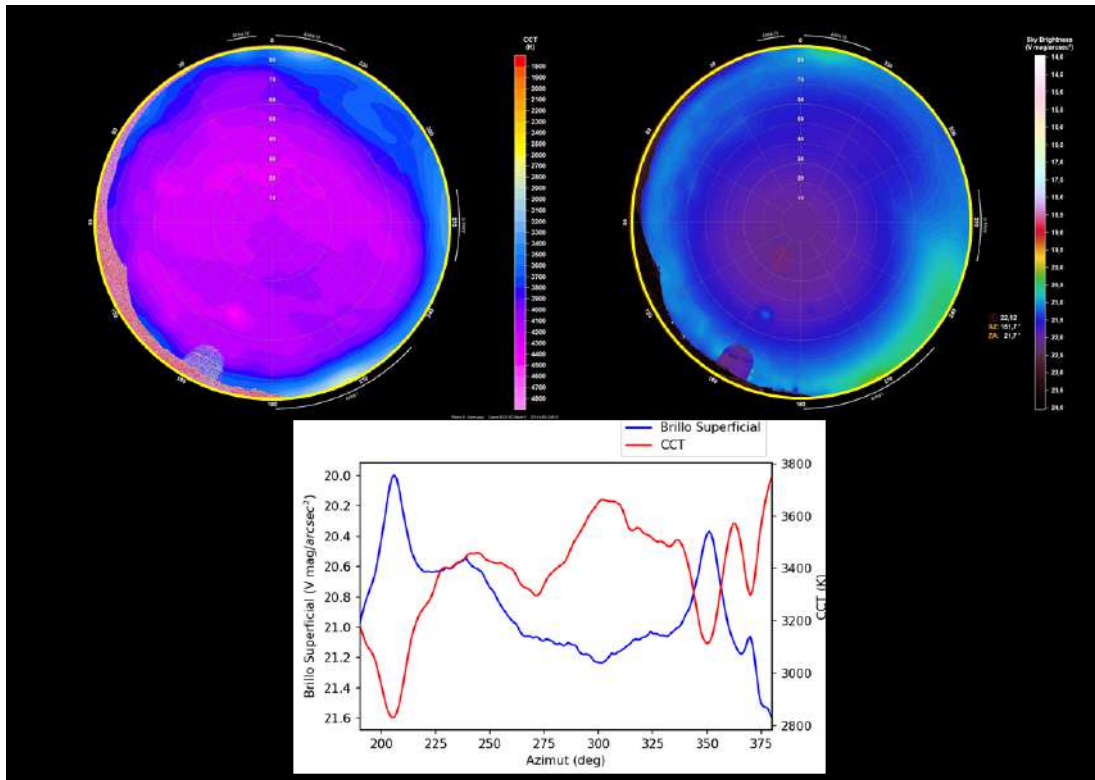


Figura 6.5: Perfiles azimutales NSB y CCT a una elevación fija al inicio de la noche (LCO1). Dentro del mapa de NSB y CCT, encontramos un círculo amarillo a 1° de elevación.

Análogamente, la Figura 6.6 presenta los mapas de NSB y de CCT, pero de la última imagen de la noche (LCO50). En esta imagen podemos observar lo mismo que se detalló para LCO1. El área I y III tienen una relación inversa entre el NSB y el CCT. En el caso del área II, ya no tenemos presencia del airglow, pero el brillo superficial de esta área es mínimo, siendo comparable para el área IV, ya no es tan sencillo determinar la relación NSB y CCT debido a que el airglow se encuentra presente en el área.

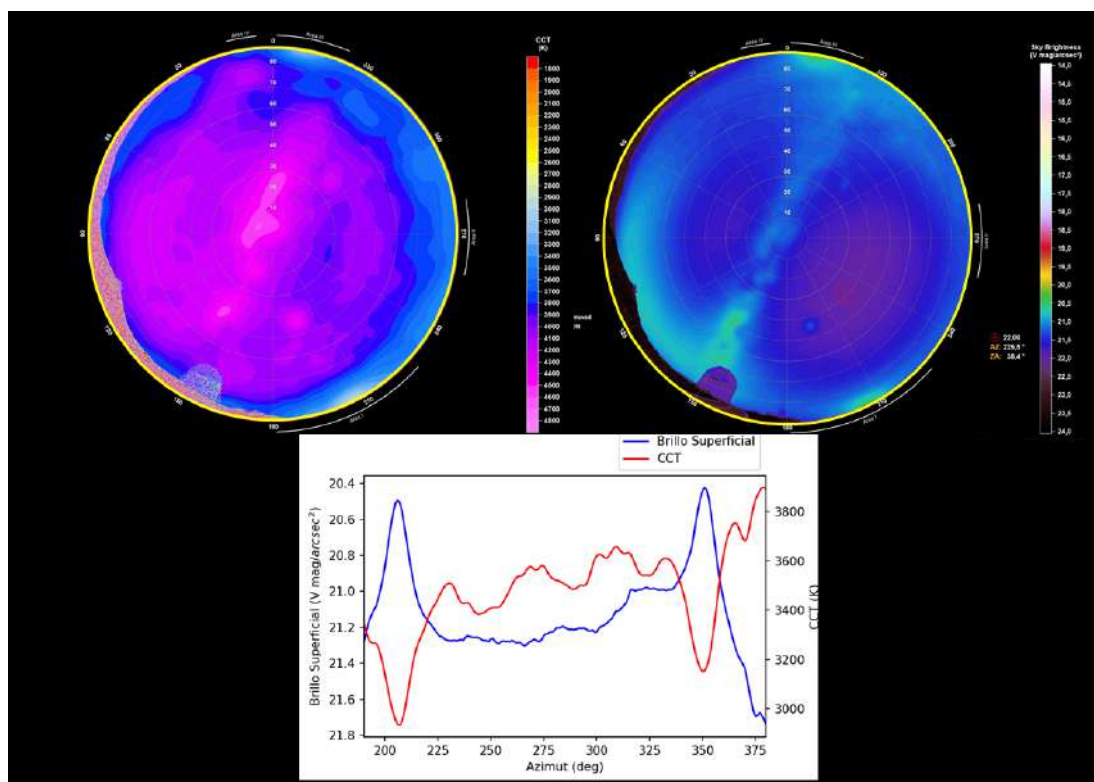


Figura 6.6: Perfiles azimutales NSB y CCT a una elevación fija al final de la noche (LCO50). Dentro del mapa de NSB y de CCT, encontramos un círculo amarillo a 1° de elevación.

6.2. Observatorio ESO La Silla

6.2.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT

Para La Silla utilizamos el primer dato de observación (S1) como ejemplo para describir el análisis para el sitio. En La Figura 6.7 presentamos los mapas correspondientes a la observación realizada en La Silla. En el mapa de NSB podemos observar que tenemos una zona en el horizonte que sobresale con respecto al resto de la imagen, esta zona tiene un brillo superior de 20 mag/arcsec^2 y se encuentra entre el horizonte y una elevación de 10° cerca al suroeste (azimut 210°). Además, se puede apreciar otras dos zonas brillantes una al norte y la otra zona esta al suroeste sobre la cúpula (azimut 120°), esta zona atraviesa toda la bóveda celeste hasta un azimut de 300°, este brillo corresponde a la Vía Láctea. Esta afirmación se corrobora viendo la imagen en Stellarium (Figura 5.8).

Adicionalmente, se puede apreciar en los mapas que tenemos 4 áreas donde la CCT crea isofotas, lo que implica que tenemos 4 áreas de estudio. Las áreas encontradas se les aplican los pasos descritos en la sección 5.2.5.1. Obteniendo así, los valores de los límites de cada área de estudio. En la Tabla 6.3 presentamos las 4 áreas que se hallaron sobre el horizonte, las ciudades que entran en la dirección visual, los azimutes correspondientes a cada ciudad, la distancia a la que se encuentran las áreas con el lugar donde se encontraba la SQC, la ubicación exacta de las ciudades y el número de habitantes de las ciudades.

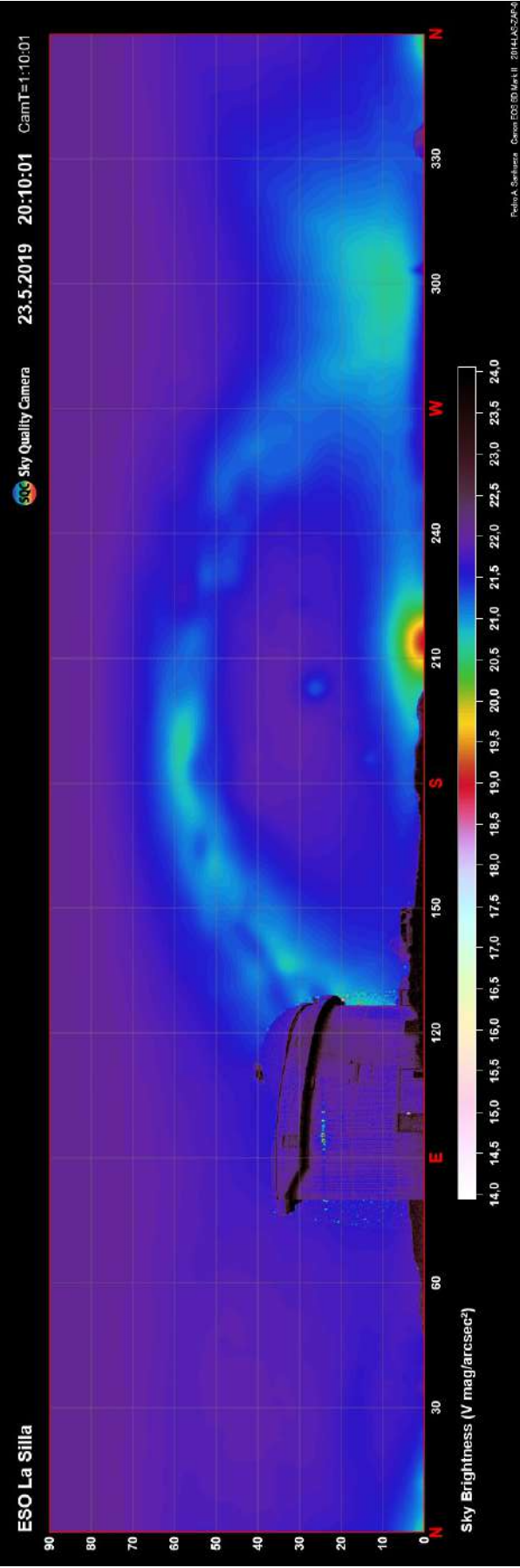
Nombre	Ciudad	Azimut (°)	Distancia (km)	Ubicación	Número de Habitantes (hab)
Area I	Vicuña	171-186	84	30° 01' 00" S 70° 42' 00" W	29741
	Ovalle	191 - 198	180	30° 36' 11" S 71° 12' 11" W	121269
	Andacollo	193 - 197	140	30° 13' 00" S 71° 05' 00" W	11044
	Conurbación La Serena / Coquimbo	203 - 218	111 / 119	29° 54' 10" S 71° 15' 07" W	517435
Area II	Ruta 5	169 - 330	24	Ruta 5 Panamericana Arica-La Serena	No Aplica
Area III	Vallenar	342 - 2	54	28° 34' 30" S 70° 45' 42" W	51917
Area IV	Copiapó	5 - 19	186	27° 21' 59" S 70° 19' 56" W	153937

Tabla 6.3: Tabla con información sobre las 4 Áreas de ALAN desde la Silla

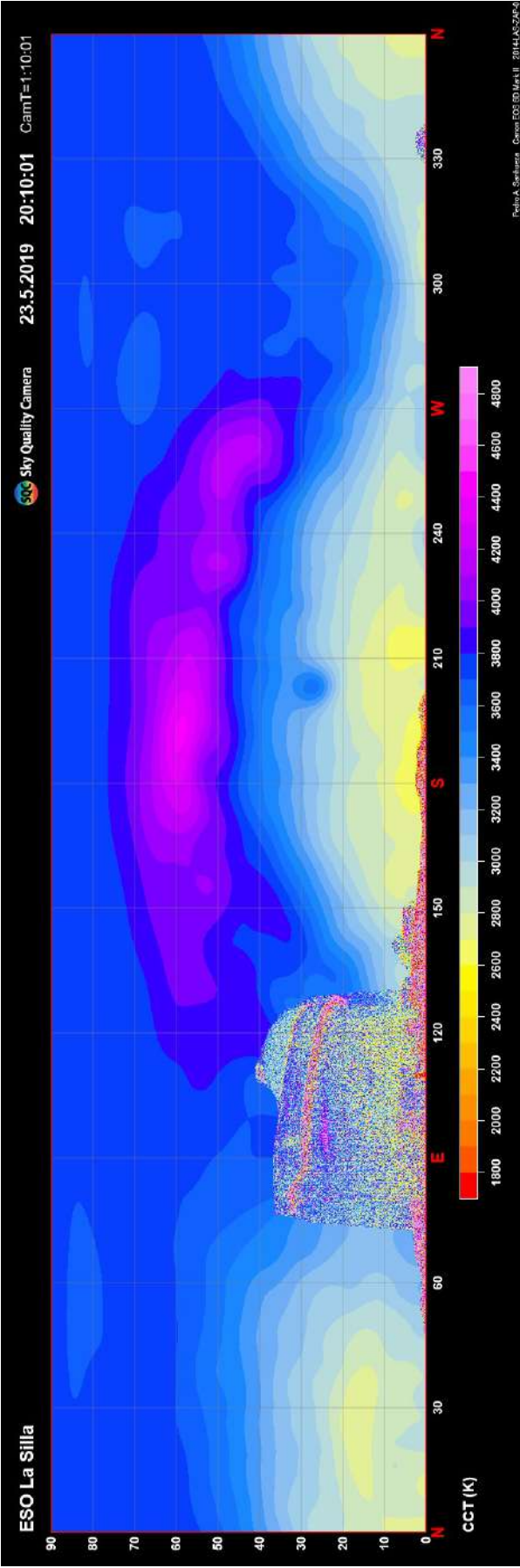
Para resumir la información, presentamos la Tabla 6.4 donde encontramos los valores de los límites para cada una de las áreas.

Nombre	Límites del Área (°)	Azimut central (°)	Ancho del Área (°)
Area I	190 - 237	213	47
Area II	275 - 320	297	45
Area III	351 - 5	358	14
Area IV	8 - 14	11	6

Tabla 6.4: Tabla con los límites de las 4 áreas de ALAN desde la Silla



(a)



(b)

Figura 6.7: Mapas de todo el cielo desde la Silla, el día 24-05-2019 a las 20:10:01. Mapa de NSB (arriba) y mapa CCT (abajo).

6.2.2. NSB en función de la elevación

Al igual que para el LCO estamos interesados en conocer hasta que elevación con respecto al horizonte las fuentes de ALAN afectan al sitio. Se construyeron los perfiles verticales de NSB. Estos perfiles son una comparación entre el azimut central de ancho 1° para cada área de estudio y un azimut de comparación (azimut 63°). El azimut de comparación es un azimut donde no hay presencia de ninguna fuente de ALAN.

En la Figura 6.8 encontramos la comparación de los perfiles de elevación de NSB de cada una de las áreas y el área de comparación (línea amarilla). Para las áreas I, III y IV, se observa que su perfil NSB es muy similar al área de comparación, pero cuando nos acercamos al horizonte encontramos que el azimut de estudio presenta un aumento, es decir, hay un ángulo zenital desde el cual se presenta una variación considerable de brillo. El ángulo zenital en el que se da este cambio de pendiente, será la elevación desde la cual ALAN empezará afectar al sitio. Las elevaciones desde las cuales se ven afectadas las áreas son: 20° , 11° y 12° respectivamente. Adicionalmente, la contribución de NSB presente en cada área es: 3, 1.6, 0.8 mag/arcsec^2 .

Para el área II se presenta un aumento del NSB desde un ángulo zenital de 36° , pero esto no quiere decir que corresponda al ALAN, ya que en esta área tenemos la presencia de dos contribuciones naturales que son las responsables de este aumento. Estas contribuciones son la Vía Láctea y el airglow. Adicionalmente, se observa una disminución en NSB en el ángulo zenital 82° , esto es producto de que en esta área tenemos nubes. No obstante, para esta área no podemos tener un valor de la contribución artificial debido a que esta no se puede diferenciar de las contribuciones naturales. De forma semejante al LCO, calculamos el punto mínimo de NSB ($22,10 \text{ mag/arcsec}^2$.)

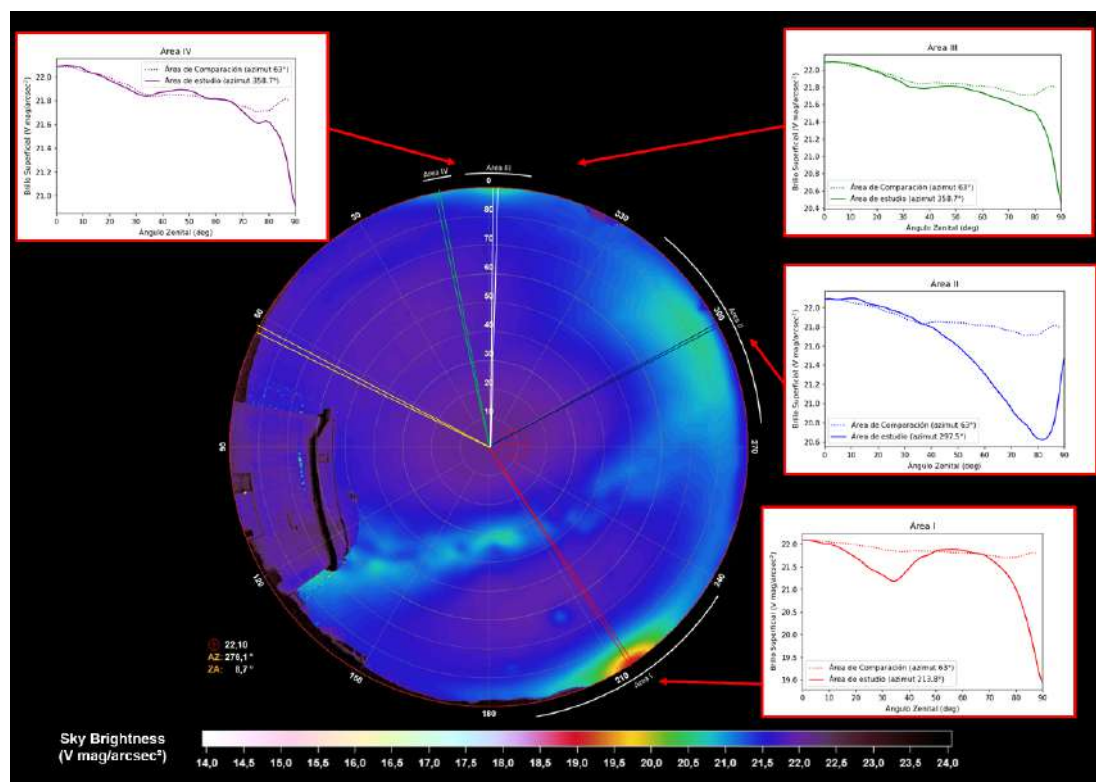


Figura 6.8: Perfiles de elevación de brillo de ESO La Silla: línea Roja área I, línea azul área II, línea verde área III, línea morada IV y la línea amarilla el azimuth de comparación. El círculo rojo representa el punto de mínimo NSB.

Finalmente, con el fin de encontrar una relación entre el NSB y el CCT en cada una de las áreas, decidimos construir perfiles azimutales en NSB y en CCT. Estos perfiles los construimos a una elevación fija (1° de elevación) y verificando que el anillo cruzará por todas las áreas de estudio. En la Figura 6.9 presentamos los mapas de NSB y de CCT con un anillo a una elevación 1° , se puede detallar que en el caso del área I (azimut 214°), III (azimut 359°) y IV (azimut 370°) son las áreas que tienen una relación inversa entre el NSB y el CCT, mientras que para el área II esta relación no se puede determinar muy bien debido a la presencia del airglow. Para el área IV su azimut central es de 10° . Sin embargo, para una visualización más sencilla decidimos representarlo sumándole 360° de la esfera completa. Por esta razón, en la Figura 6.9 tenemos el rango de azimut hasta 380° .

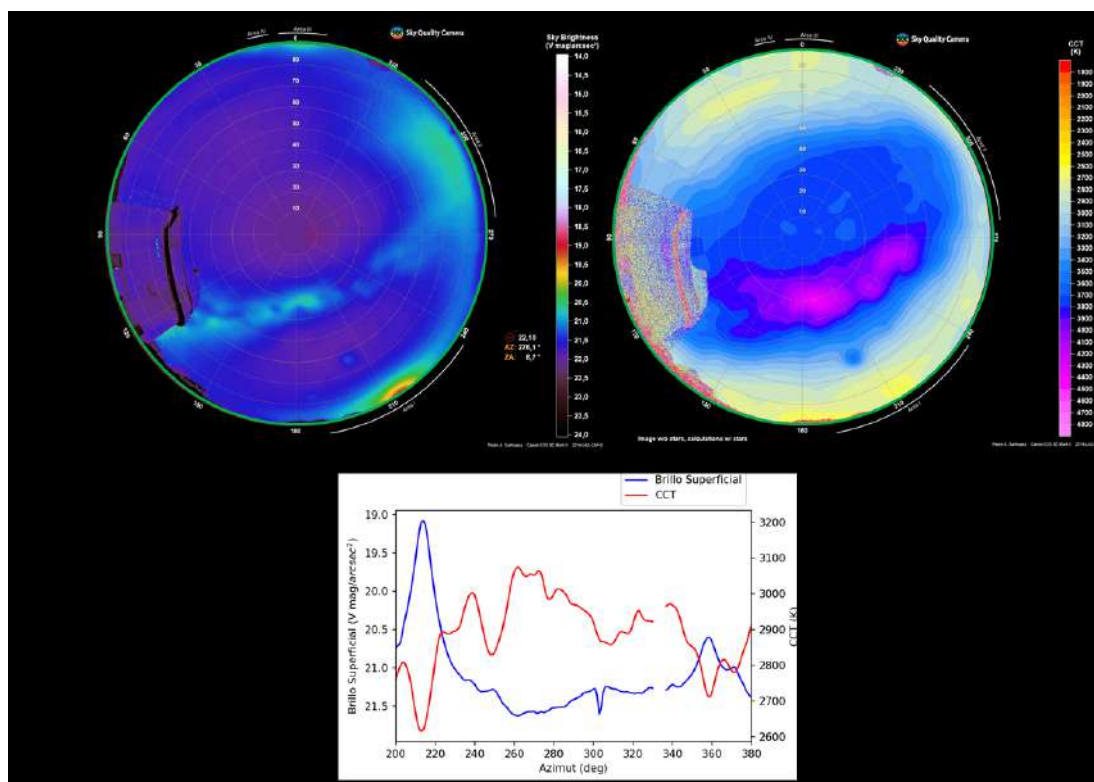


Figura 6.9: Perfiles azimutales NSB y CCT a una elevación fija al final de la noche (S1). Dentro del mapa de NSB y CCT se encuentra un círculo verde a 1° de elevación.

6.3. Parque Nacional Bosque Fray Jorge

6.3.1. Mapas de NSB y de Mapas CCT

Al igual que para los observatorios, presentamos los mapas de NSB y de CCT para el Parque Bosque Fray Jorge. Recordamos que en este sitio tenemos observaciones en dos lugares diferentes, los cuales son: el acceso norte (BFJ-E) y la zona del camping (BFJ-C). En la Figura 6.10 encontramos los mapas correspondientes a la primera observación realizada en BFJ-E. En el mapa de NSB podemos observar tres zonas que sobresalen con respecto al resto de la imagen, estas áreas son más brillante menor a 20 mag/arcsec^2 . La primera zona se encuentra entre el horizonte y una altitud de 10° cerca al noreste, la segunda zona está ubicada en el este en medio de las ramas con una elevación 10° y la última se encuentra al sur y corresponde a la Vía Láctea. Sin embargo, hay que recordar que desde BFJ tenemos datos en otro punto (BFJ-C),

los datos se observan en la Figura 6.11 donde tenemos las mismas fuentes, pero en este caso sin muchas ramas u objetos que obstaculizan las fuentes de ALAN.

Adicionalmente, se puede apreciar que al comparar ambos mapas tenemos 5 isofotas, lo que implica que tenemos 5 áreas de estudio, las cuales se les aplican los pasos descritos en el capítulo 5.2.5.1. En la Tabla 6.5 presentamos las 5 áreas que se hallaron sobre el horizonte, las ciudades que entran en la dirección visual, los azimutes correspondientes a cada ciudad, la distancia a la que se encuentran las áreas con el lugar donde estaba SQC, la ubicación exacta de las ciudades y el número de habitantes de las ciudades.

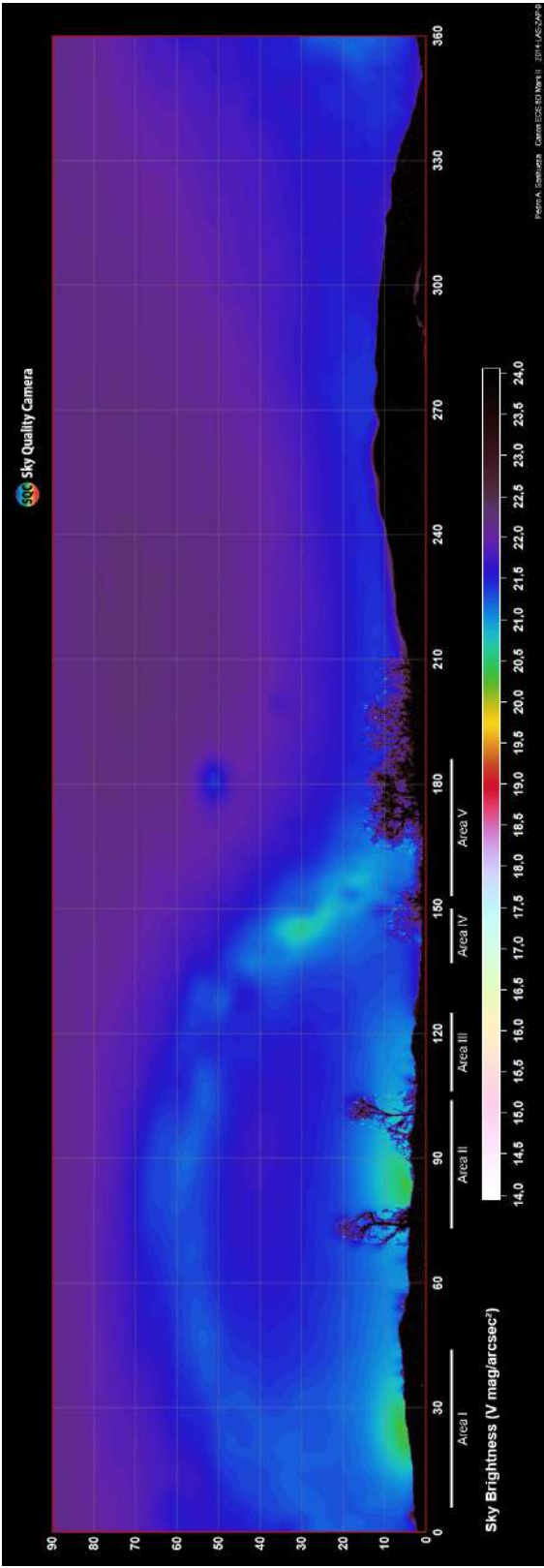
Nombre	Ciudad	Acceso Norte Azimut (°)	Camping Azimut (°)	Distancia (km)	Ubicación	Número de Habitantes (hab)
Area I	Tongoy	15 - 28	15 - 27	43	30° 15' 27" S 71° 29' 33" W	5552
	Guaqueros	22 - 31	21 31	53	30° 11' 50" S 71° 25' 20" W	1762
	Conurbación La Serena / Coquimbo	7 - 45	8 - 48	111 / 119	29° 54' 10" S 71° 15' 07" W	517435
Area II	Ovalle	70 - 98	76 - 99	44	30° 36' 11" S 71° 12' 11" W	121269
Area III	Punitaqui	111 - 130	114 - 131	45	30° 54' 00" S 71° 16' 00" W	10956
Area IV	Combarbalá	132 - 136	131 - 140	87	31° 10' 00" S 71° 03' 00" W	13322
Area V	Área Metropolitana	154 - 171	153 - 170	327	33° 26' 16" S 70° 39' 01" W	7112808
	Conurbanización Valparaíso	164 - 183	169 - 187	267	33° 02' 46" S 71° 37' 20" W	951311

Tabla 6.5: Tabla con información sobre las 5 Áreas de ALAN desde BFJ.

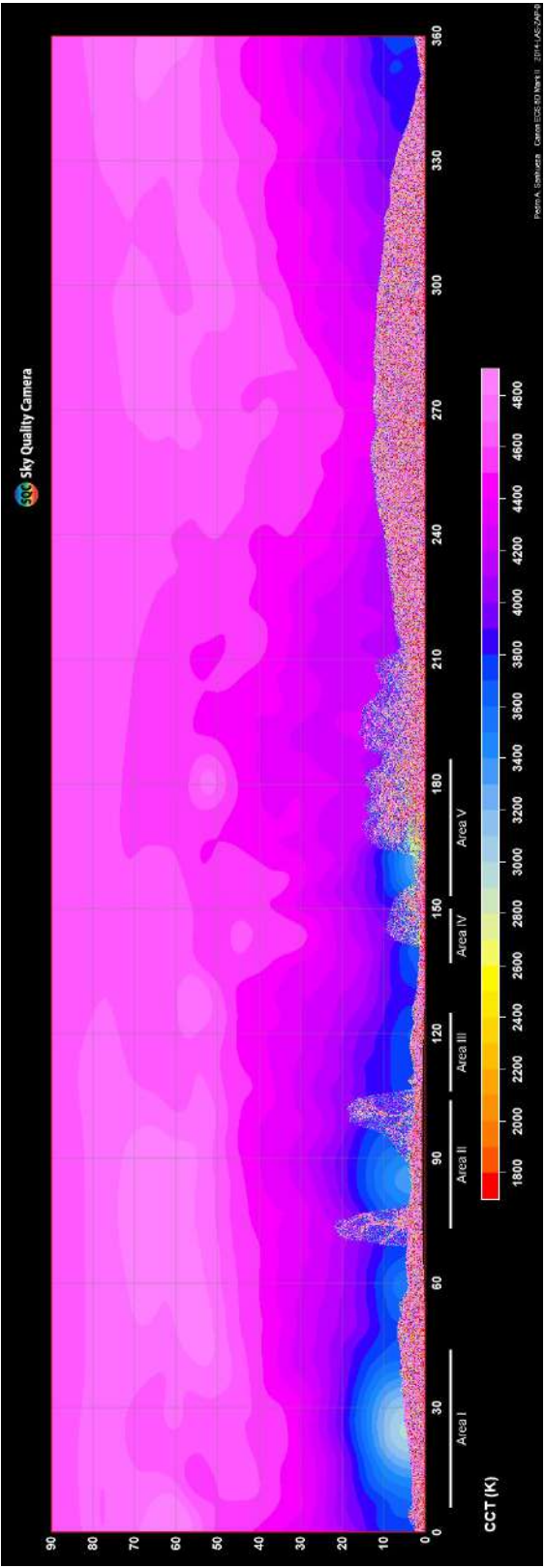
Para resumir la información, presentamos la Tabla 6.6 donde encontramos los valores promedio de los límites de las áreas.

Nombre	Límites del Área (°)	Azimut Central (°)	Ancho del Area (°)
Area I	6 - 44	25	38
Area II	71 - 102	86	31
Area III	103 - 122	112	19
Area IV	137 - 150	143	13
Area V	153 - 186	169	12
Area VI	155 - 182	168	33

Tabla 6.6: Tabla con los límites de las 5 áreas de ALAN desde BFJ

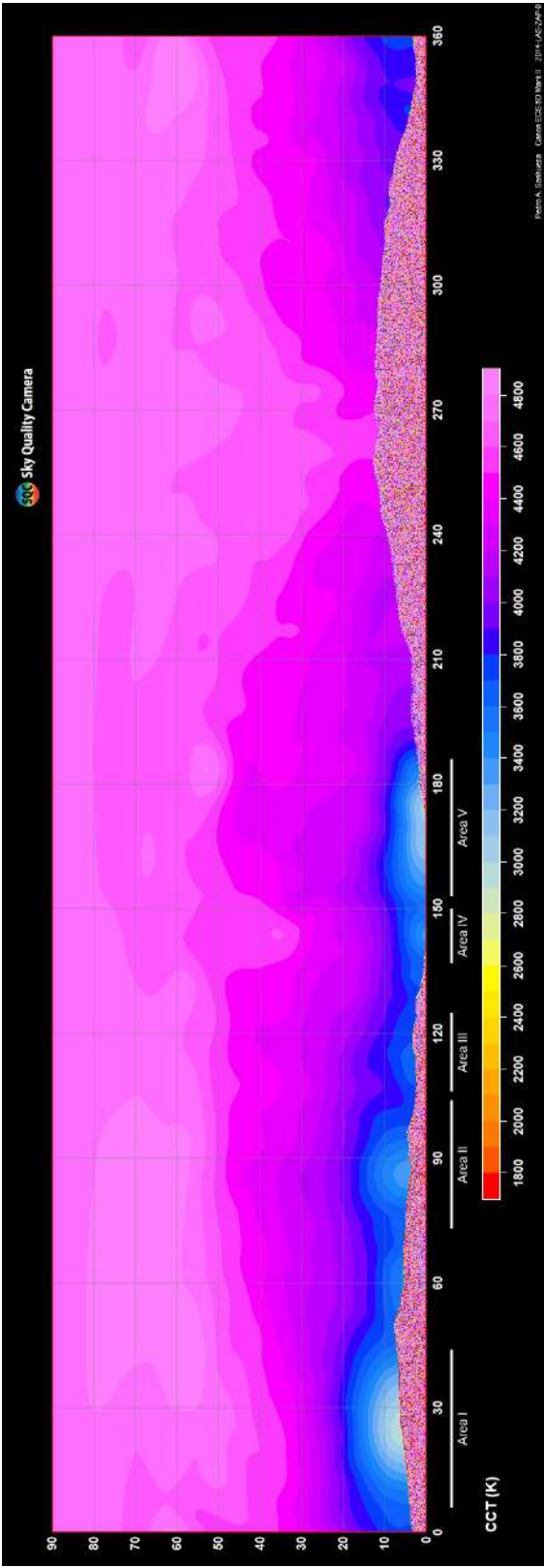


(a)

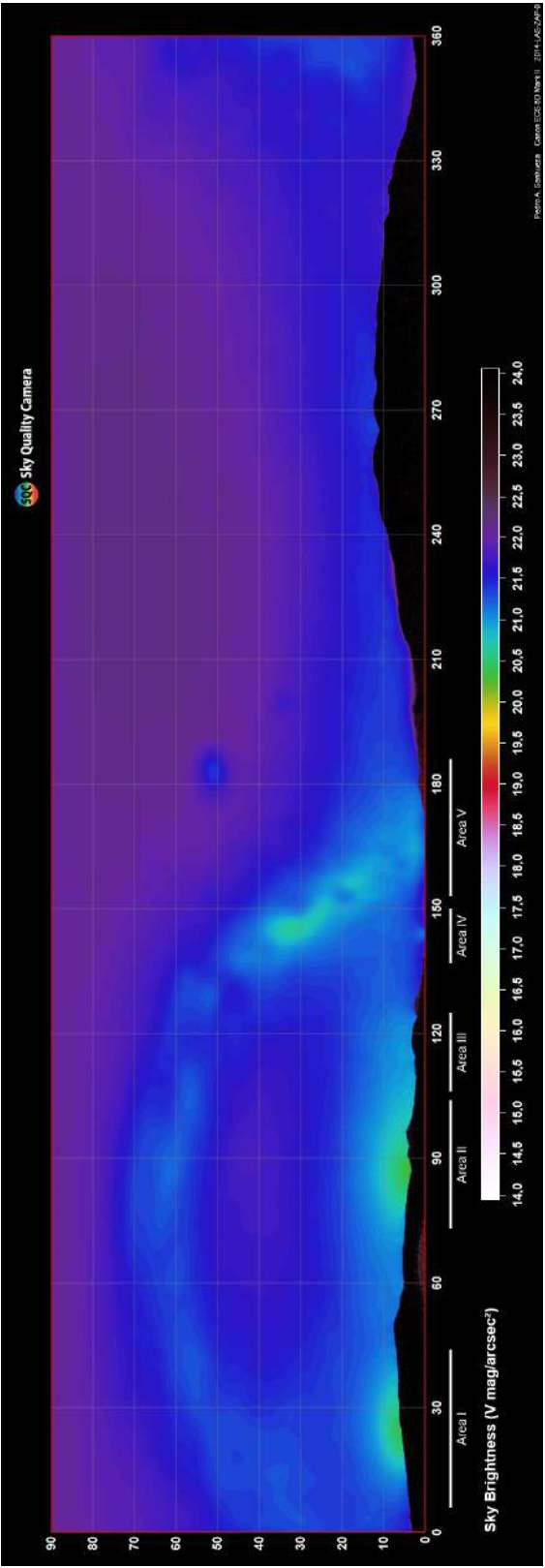


(b)

Figura 6.10: Mapas de todo el cielo desde el acceso norte del BFJ, el día 10-01-2021 a las 22:52:06. Mapa de NSB (arriba) y mapa de CCT (abajo).



(a)



(b)

Figura 6.11: Mapas de todo el cielo desde el camping del BfJ, el día 10-01-2021 a las 23:09:51. Mapa de NSB (arriba) y el mapa de CCT (abajo).

6.3.2. NSB en función de la elevación

Al igual que para los observatorios estamos interesados en conocer hasta que elevación con respecto al horizonte las fuentes de ALAN afectan al sitio. Se construyeron los perfiles verticales de NSB, los cuales presentan un azimut central de cada área con un ancho de 1° y un azimut de comparación del mismo ancho (azimut 283°), pero este azimut no es afectado por ALAN. Adicionalmente es importante resaltar que esto se realizó solo para los datos del camping, ya que era el que tenía menos presencia de objetos sobre el horizonte, es decir, los datos de BFJ-C, no presentan ramas que obstaculizan la línea de visión de las fuentes de ALAN.

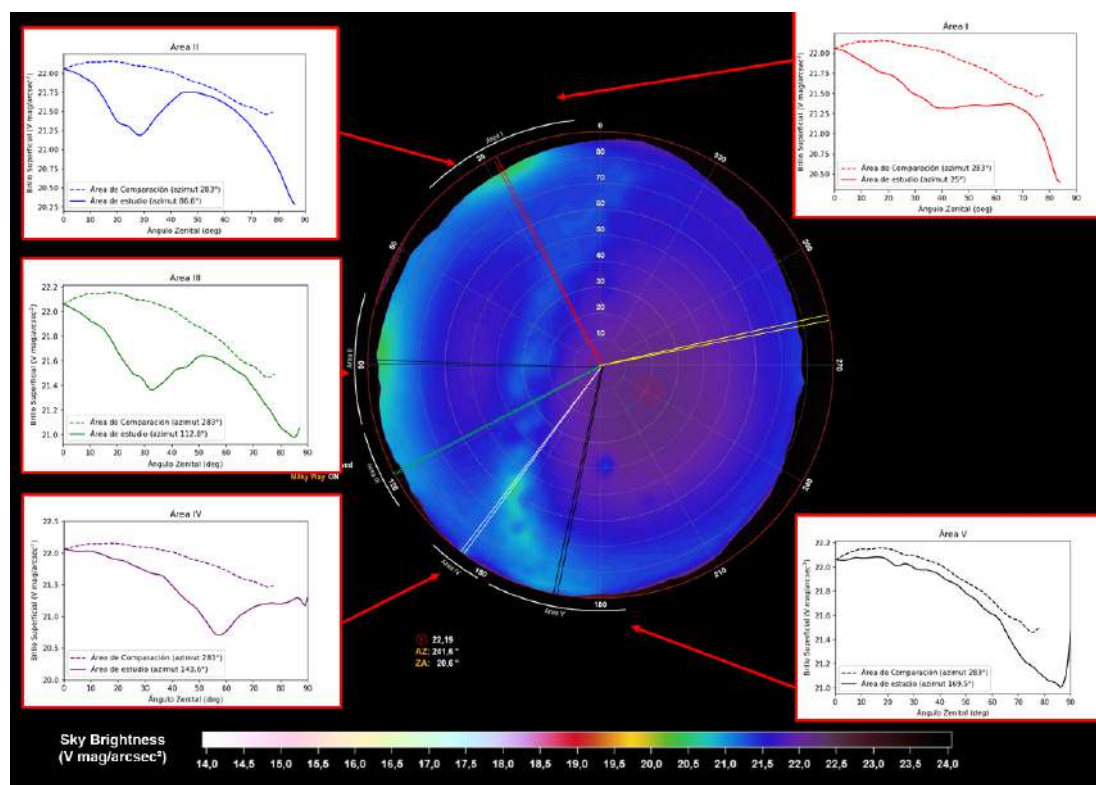


Figura 6.12: Perfiles de elevación de brillo del BFJ-C: línea Roja área I, línea azul área II, línea verde área III, línea blanca área IV, la línea negra área V y la línea amarilla azimut de comparación. El círculo rojo representa el punto de mínimo NSB.

En la Figura 6.12 encontramos la comparación de los perfiles de elevación de NSB de cada una de las áreas y el área de comparación (línea amarilla). Para todas las áreas se observa que su perfil NSB tiene un aumento de brillo

con respecto a el área de comparación. El ángulo zenital en el que se da este cambio de pendiente, será la elevación desde la cual ALAN empezará afectar al sitio. Sin embargo, no podemos asumir que esta disminución corresponde a contribuciones artificiales, ya que se puede observar un aumento de NSB en diferentes elevaciones debido a la Vía Láctea y además en algunas áreas tenemos presencia de airglow. Por esta razón no podemos dar con exactitud un valor a partir del cual ALAN afecta al sitio. Del mismo modo que los observatorios, se calculó el valor de mínimo NSB ($22,19 \text{ mag/arcsec}^2$).

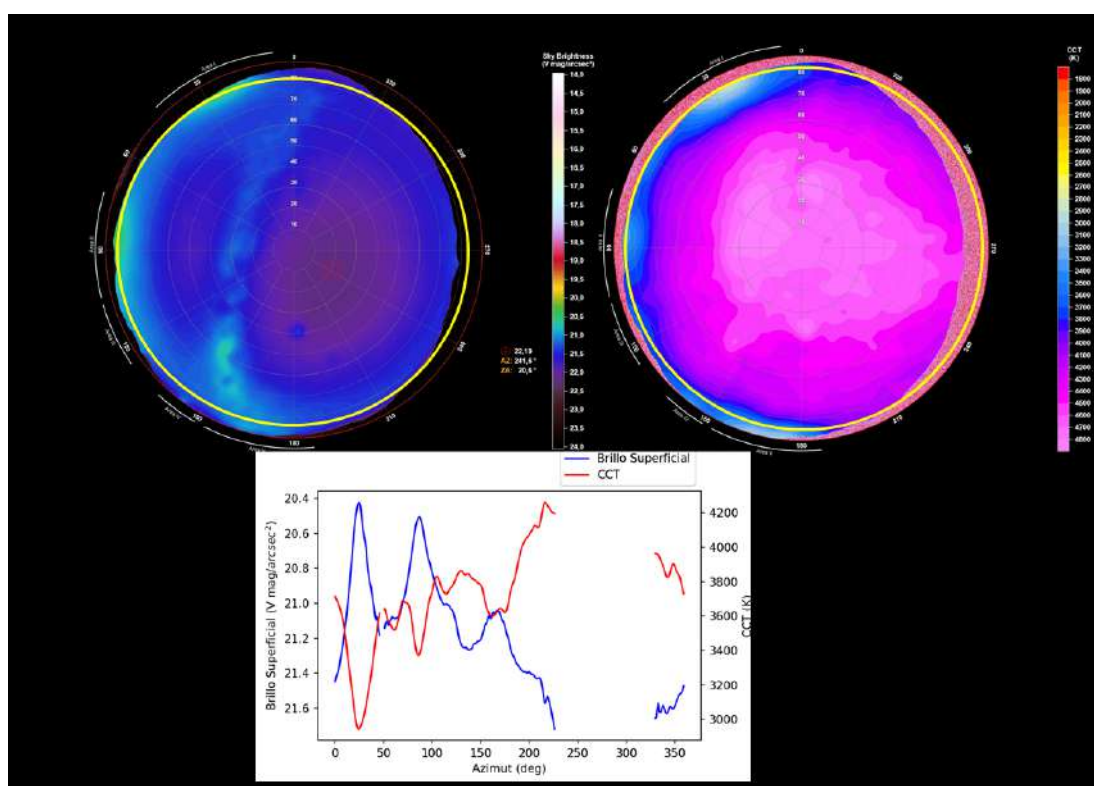


Figura 6.13: Perfiles azimutales NSB y CCT a una elevación fija al final de la noche (BFJ-C1). Dentro del mapa de NSB y CCT se encuentra un círculo amarillo a 7° de elevación.

Finalmente, con el fin de encontrar una relación entre el NSB y el CCT en cada una de las áreas, decidimos construir perfiles azimutales en NSB y en CCT. Estos perfiles los construimos a una elevación fija (1° de elevación) y verificando que el anillo cruzará por todas las áreas de estudio. En la figura 6.13 presentamos los mapas de NSB y de CCT con un anillo a una elevación 7° ; se puede detallar que en el caso del área I (azimut 25°), III (azimut 86°) y

V (azimut 169°) son las áreas que tienen una relación inversa entre el NSB y el CCT, mientras que para el área II y IV esta relación no se puede determinar muy bien debido a la presencia del airglow.

6.4. Cerro Grande

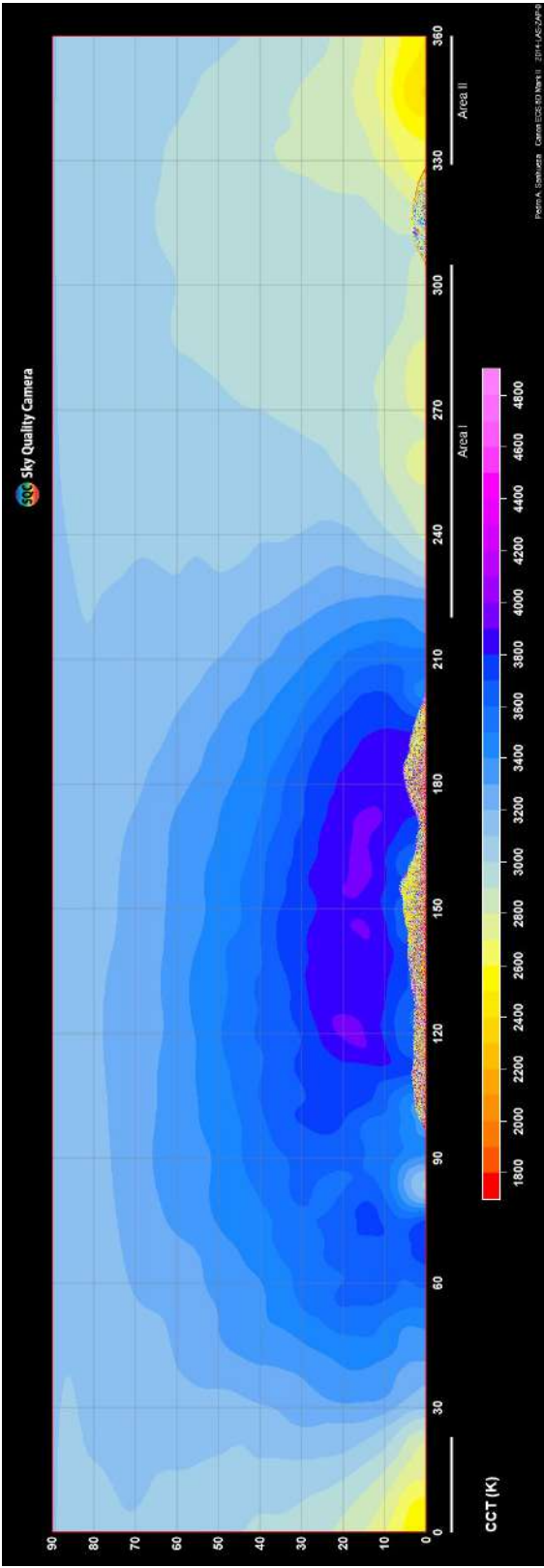
6.4.1. Mapas de NSB y Mapas de CCT

En el caso de los datos de Cerro Grande, no tenemos ciudades de estudio debido a que nos encontramos al interior de una ciudad. En la Figura 6.14 encontramos un área que sobresale y se encuentra dividida por la montaña, esta área tiene un brillo superficial mayor a 18 mag/arcsec^2 . Por esta razón decidimos visualizar la figura en otra escala de color, esta escala denominada por el software de la SQC como las Vegas nos permite tener una escala de color diferente que va desde 21 mag/arcsec^2 hasta 11 mag/arcsec^2 y usualmente se utiliza para sitios con mucha contaminación lumínica. Adicionalmente, correlacionamos el mapa de NSB con el mapa CCT y encontramos dos áreas con temperatura menor a 3000 K. La primera área hacia el norte que corresponde al centro y la comuna conocida como Las compañías, mientras que la segunda hacia La Pampa que es un sector de la comuna de La Serena y Coquimbo.

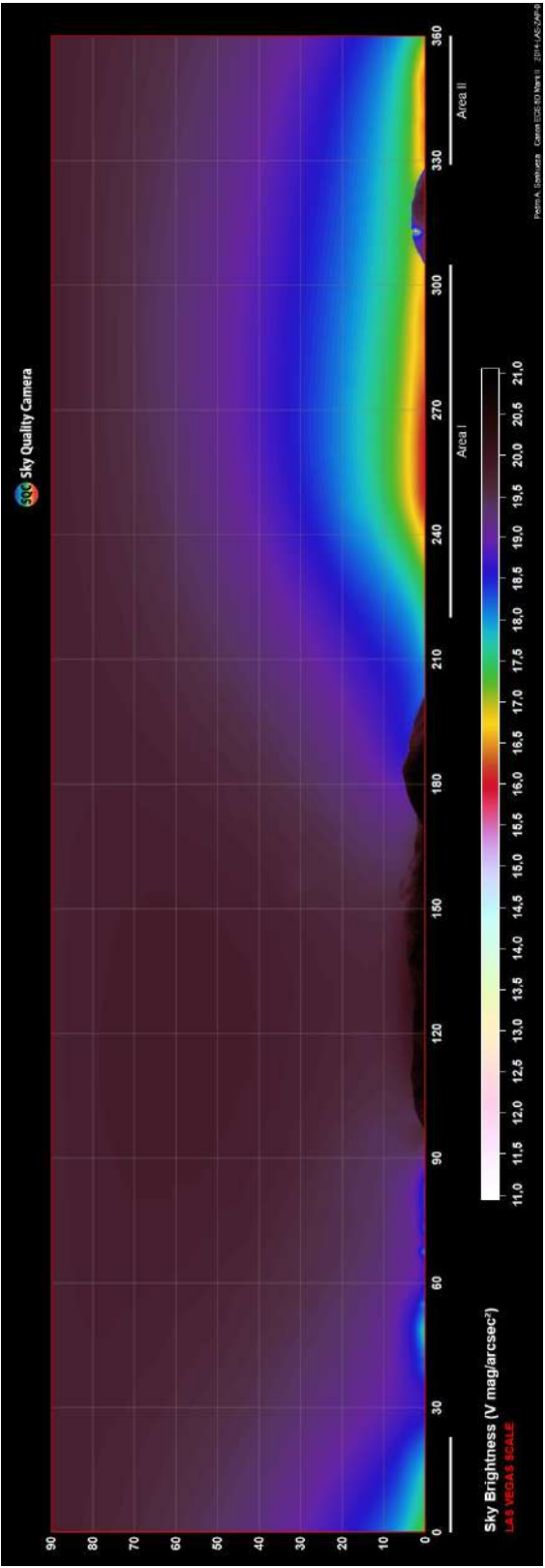
Para resumir la información, presentamos la Tabla 6.7 donde encontramos los valores de los límites de las áreas y su altitud correspondiente.

Nombre	Límites del Área ($^\circ$)	Azimut Central ($^\circ$)	Ancho del Área ($^\circ$)
Area I	225 - 309	267	83
Area II	325 - 15	350	50

Tabla 6.7: Tabla con los límites de las 2 áreas de ALAN desde Cerro Grande



(a)



(b)

Figura 6.14: Mapas de todo el cielo desde Cerro Grande en La Serena, el día 29-10-2019 a las 22:01:35. Mapa de NSB(arriba) y mapa de CCT (abajo).

6.4.2. NSB en función de la elevación

Al igual que en los otros sitios estamos interesados en conocer hasta que elevación con respecto al horizonte las fuentes de ALAN afectan al sitio. Se construyeron los perfiles de elevación de NSB, los cuales presentan un azimut central de cada área con un ancho de 1° y un azimut de comparación del mismo ancho, pero en un lugar que no se vieran afectados por ALAN, para este caso se buscó el azimut menos afectado por ALAN.

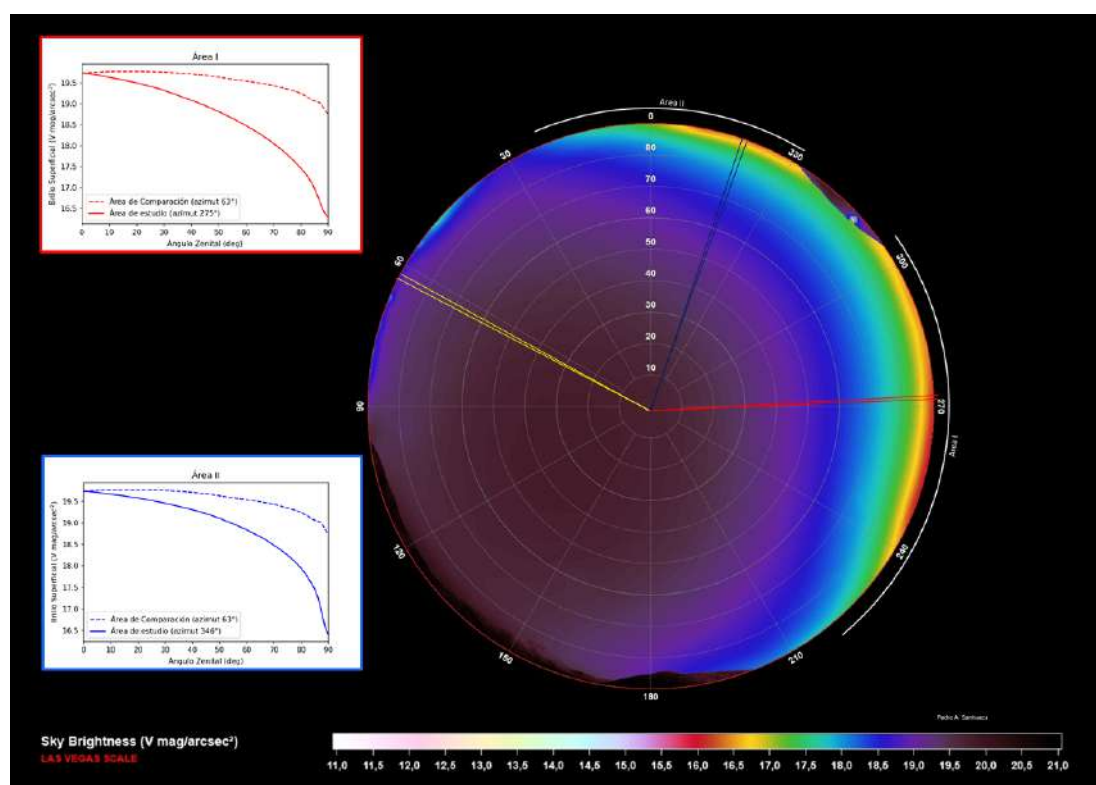


Figura 6.15: Perfiles de elevación de brillo en Cerro Grande: línea roja área I, línea azul área II y la línea amarilla azimut de comparación.

En la Figura 6.15 encontramos la comparación de los perfiles de elevación de NSB de cada una de las áreas y el área de comparación (línea amarilla). Para las dos áreas el brillo empieza a aumentar con respecto al área de comparación. Hay que recordar que estamos dentro de un cielo contaminado y podemos ver en ambas gráficas que desde el cenit empieza al cambio de pendiente, además acá es más fuerte la contribución artificial.

Finalmente, con el fin de encontrar una relación entre el NSB y CCT en cada una de las áreas, decidimos construir perfiles azimutales en NSB y en CCT. Estos perfiles los construimos a una elevación fija (1° de elevación) y verificando que el anillo cruzará por todas las dos áreas de estudio. En la figura 6.16 presentamos el mapa de NSB y de CCT con un anillo a una elevación 1° , se puede detallar que para las dos áreas I (azimut 267°) y II (azimut 350°), existe una relación inversa entre el NSB y el CCT. La ausencia de datos entre los azimuts 105° y 200° , se debe a 1° de elevación se encuentra la montaña y por lo tanto no tenemos datos.

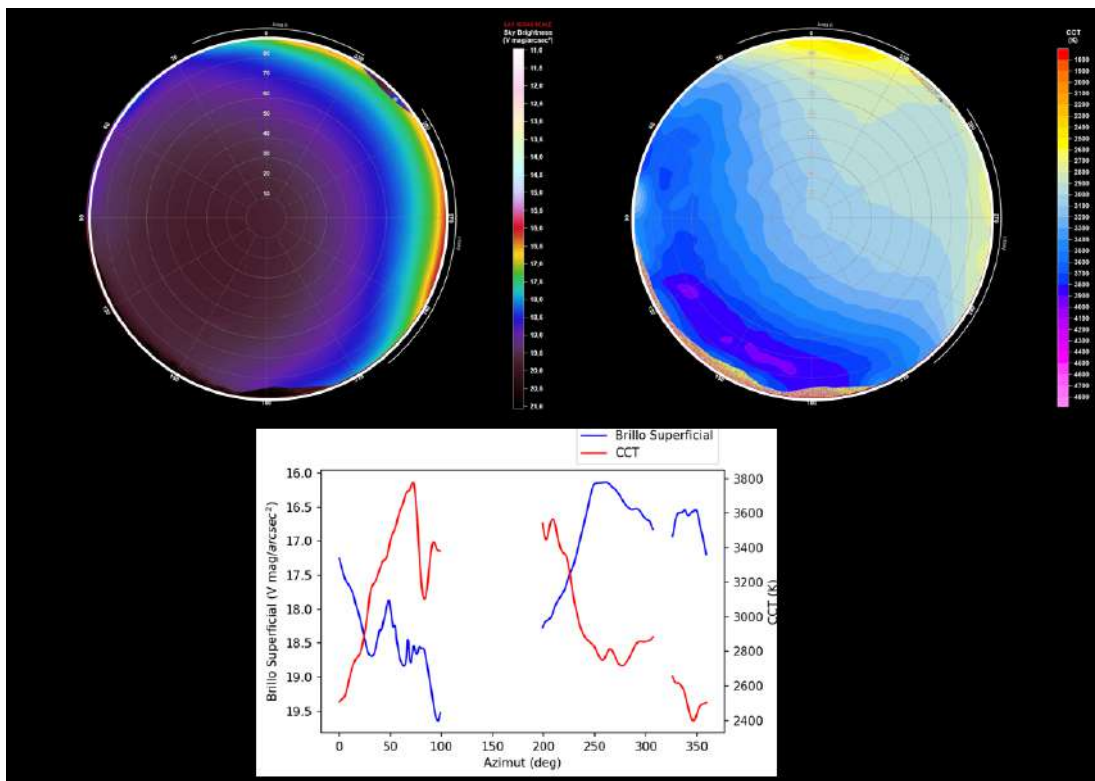


Figura 6.16: Perfiles azimutales NSB y CCT a una elevación fija en Cerro Grande. Dentro del mapa de NSB y CCT se encuentra un círculo blanco a 1° de elevación.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Consistencia de la Cámara

En la Sección 5.2 describimos cómo opera el software y los pasos que realizamos para hacer la reducción de los mismos. Sin embargo, se realizaron diferentes pruebas para comprobar que el software mantuviera una consistencia cada vez que se realiza algún cambio en un parámetro. Uno de los parámetros de entrada es la extinción.

Ahora, para encontrar el mejor valor de entrada para el parámetro de extinción, se realizaron diferentes pruebas como las que se encuentra en la Figura 7.1. Allí pudimos determinar que no hay variaciones significativas cuando se varía el parámetro en intervalos 0.05. Para estar seguros de que este parámetro de entrada tuviera una consistencia con valores medidos, se decidió utilizar el valor que fue calculado en el telescopio Swope en la banda V (Krisciunas et al., 2017), ya que cerca de este telescopio fue la medición. Por este motivo, se utilizó el valor $0,15 \text{ mag airmass}^{-1}$ para el parámetro de extinción.

Finalmente, para verificar que el parámetro de Smoothing no alterará los datos, se realizó una prueba de los datos con el parámetro Smoothing y sin Smoothing a diferentes elevaciones, es decir, se crearon anillos a diferentes elevaciones en el mapa de NSB de la primera observación (LCO1). En

la Figura 7.2, se puede observar las pruebas que desarrollamos para verificar que esta opción. Recordando que el parámetro Smoothing aplica una media aritmética a los datos para reducir datos espurios. Lo que encontramos es que el parámetro no modifica los datos y solo reduce la cantidad de peaks producidos por ruido, razón por la cual todos los datos de este trabajo se les aplicó un Smoothing.

7.2. Observatorio Las Campanas

En este trabajo utilizamos los mapas de Gaia Map of the Brightness Of the Natural Sky (GAMBONS, por sus siglas en inglés) para comparar con nuestras observaciones. GAMBONS es un modelo de NSB en noches sin nubes y sin Luna basado en el brillo superficial estelar extra-atmosférica obtenida del catálogo Gaia. Para las estrellas más brillantes, no incluidas en Gaia-DR3, utilizaron el catálogo de Hipparcos. Seguidamente a los datos le sumaron las contribuciones naturales como la luz galáctica y extragaláctica difusa, la luz zodiacal y airglow. Además, tuvieron en cuenta los efectos de la atenuación y dispersión atmosféricas para estimar brillo superficial desde el lugar a elegir desde la Tierra. Por el momento, GAMBONS no incluye las contribuciones de la Luna y el Sol.

La Figura 7.3 presenta la observación realiza en el LCO1 donde podemos identificar que el área I y III son fuentes de ALAN, ya que primero tienen un brillo superior 20 mag/arcsec^2 y segundo no se encuentran presentes en el mapa de GAMBONS. En el caso del área II se identifica que esta área aún cuenta con la contribución de brillo de la luz zodiacal y airglow debido a que la imagen fue adquirida a comienzo de la noche cuando aún estaban presente estas contribuciones naturales. Sin embargo, no se observa que la carretera supere el valor de NSB natural y el área IV tiene un aumento de NSB casi insignificante.

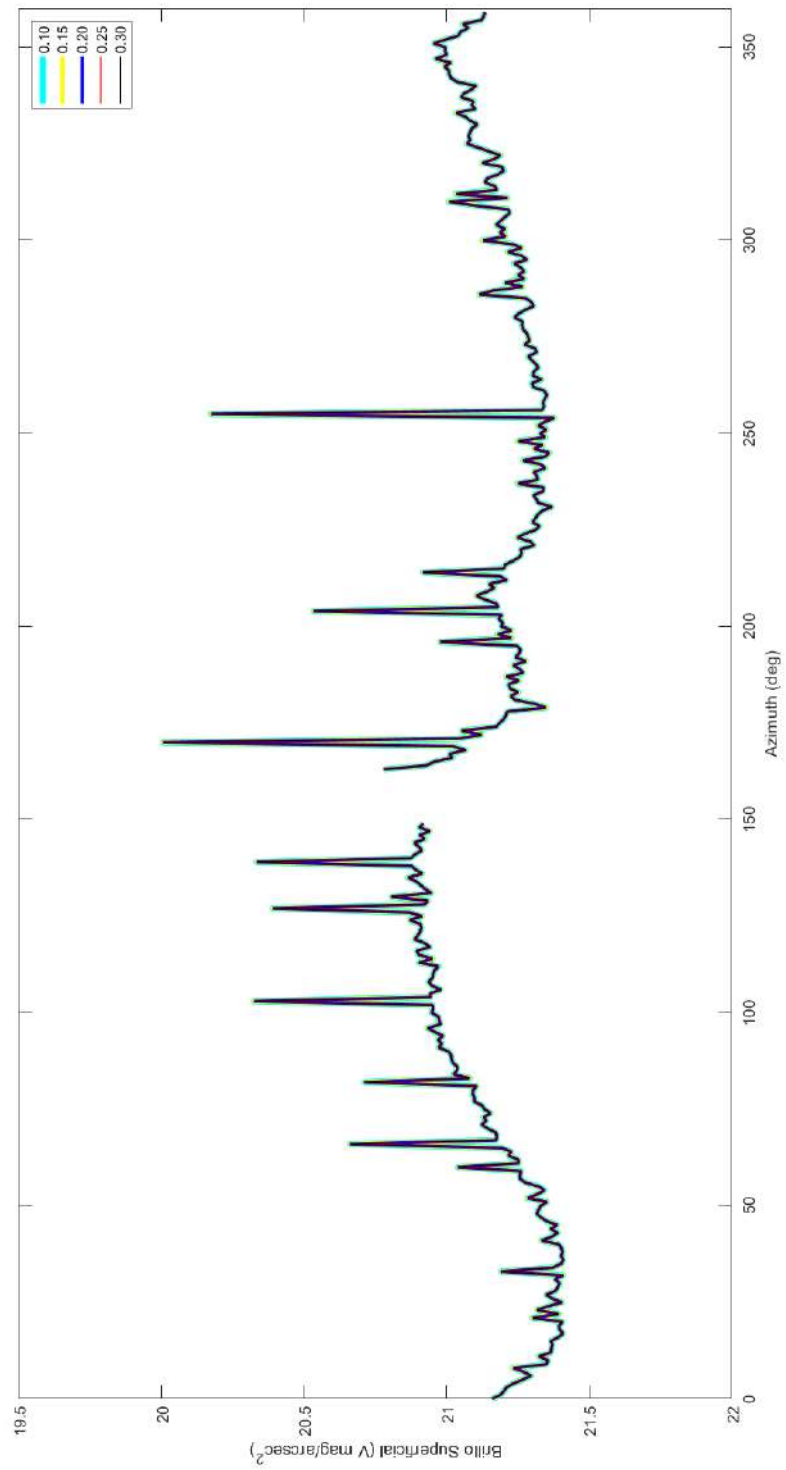


Figura 7.1: Comparación de diferentes valores de coeficiente extinción en el software SQC.

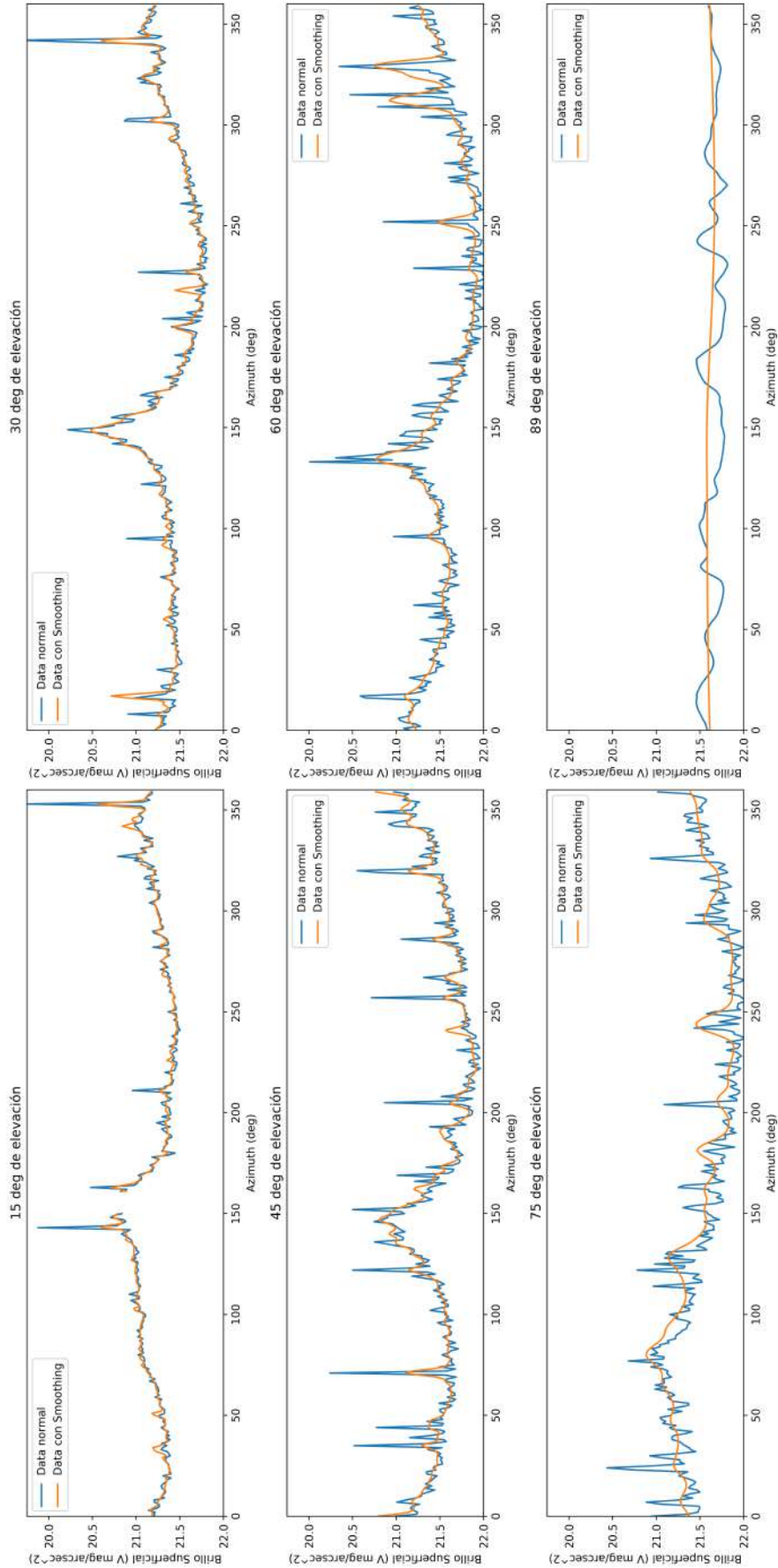


Figura 7.2: Prueba de comparación del parámetro Smoothing. La línea naranja representa los datos con smoothing, mientras que la línea azul son los normales.

Adicionalmente, se construye un círculo de radio 5° en el cenit para conocer el valor del brillo superficial en este punto y compararlo con el modelo de contribuciones naturales GAMBONS. Los valores encontrados fueron: $21.99 \text{ mag/arcsec}^2$ en la imagen adquirida y $21.81 \text{ mag/arcsec}^2$ en GAMBONS. También, buscamos la dirección del punto más oscuro del cielo para la observación realizada. En la parte derecha de la Figura 7.3 podemos encontrar un círculo rojo donde se encuentre este lugar, las coordenadas son: $22,12^\circ$ en el ángulo zenital y $151,7^\circ$ en azimut donde el brillo del punto es $22,12 \text{ mag/arcsec}^2$.

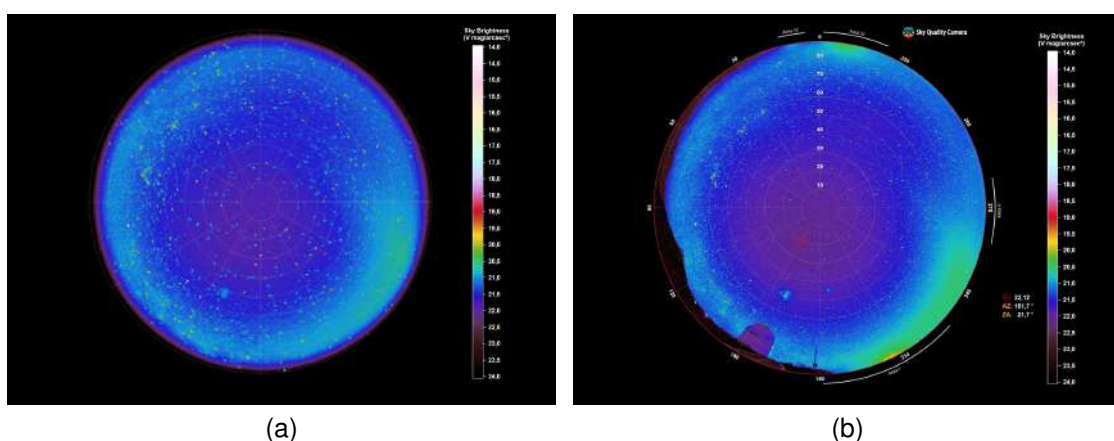


Figura 7.3: Comparación del mapa del LCO con la Vía Láctea sobre el horizonte desde GAMBONS (izquierda) y la observación realizada (derecha)

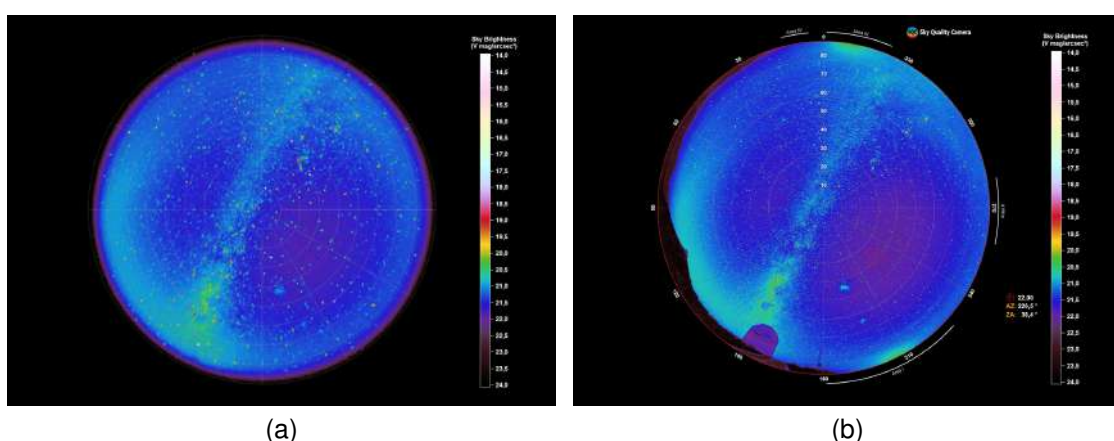


Figura 7.4: Comparación del mapa del LCO con la Vía Láctea cruzando por el cenit desde GAMBONS (izquierda) y la observación realizada (derecha)

Por otra parte, en la Figura 7.4, presentan los mapas del mismo sitio pero con

la Vía Láctea cruzando por el cenit. Al igual que en los datos anteriores, las áreas que sobresalen por su brillo superior a 20 mag/arcsec^2 son: el área I y III, mientras que las áreas II y IV su brillo no es tan sencillo determinar debido a las contribuciones naturales. También, se construyó un círculo de radio 5° en el cenit con el fin de conocer el valor del brillo en este punto, el valor encontrado fue de $21.46 \text{ mag/arcsec}^2$ y en GAMBONS de $21.28 \text{ mag/arcsec}^2$. El punto más oscuro del cielo se encuentra en las siguientes coordenadas: 226.5° en azimut y 38.4° en el ángulo zenital donde el brillo del punto es $22,00 \text{ mag/arcsec}^2$.

Ahora, podemos determinar cuál es el área que más contribuye con NSB al sitio de estudio. Para esto revisamos los perfiles de elevación y obtenemos cuál es el área que aumenta más rápidamente en NSB, el orden de mayor a menor es el siguiente: el área I (la conurbación La Serena-Coquimbo), el área III (Vallenar), el área IV (Copiapó) y el área II (Domeyko y Ruta 5).

Finalmente, presentamos la Figura 7.5 donde observamos las variaciones de NSB en el cenit a lo largo de toda la noche, la imagen 1 corresponde al valor al primer dato adquirido al inicio de la noche (LCO1) desde las 22:18:48 hasta 03:46:55 que corresponde al último dato (LCO). El aumento de NSB que se observa es debido al paso de la Vía Láctea en el cenit.

De igual forma, en la Figura 7.6 detallamos las variaciones NSB para cada una de las áreas estudio. En esta gráfica podemos detallar las variaciones a lo largo de la noche en el LCO desde las 22:18:48 (Dato1) hasta 03:46:55 (Dato50). En conclusión podemos detallar que todas las áreas aumentan su NSB en (2 mag/arcsec^2) cuando tienen la presencia de las contribuciones naturales (Vía Láctea y airglow). Adicionalmente, el área I y III son las que más contribuyen con NSB a lo largo de la noche donde el área I lo hace al inicio y el área III al final. El área II que representa la Ruta 5, se detalla que es el área que menos contribuye con NSB a lo largo de la noche.

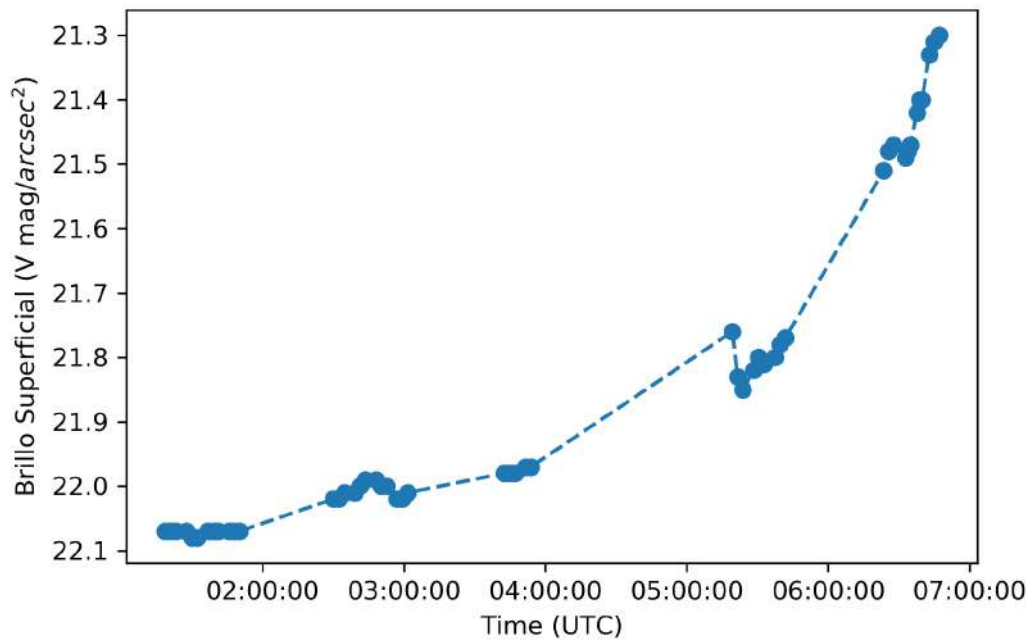


Figura 7.5: Variación del NSB en el cenit del LCO desde las 22:18:48 hasta 03:46:55 hora local.

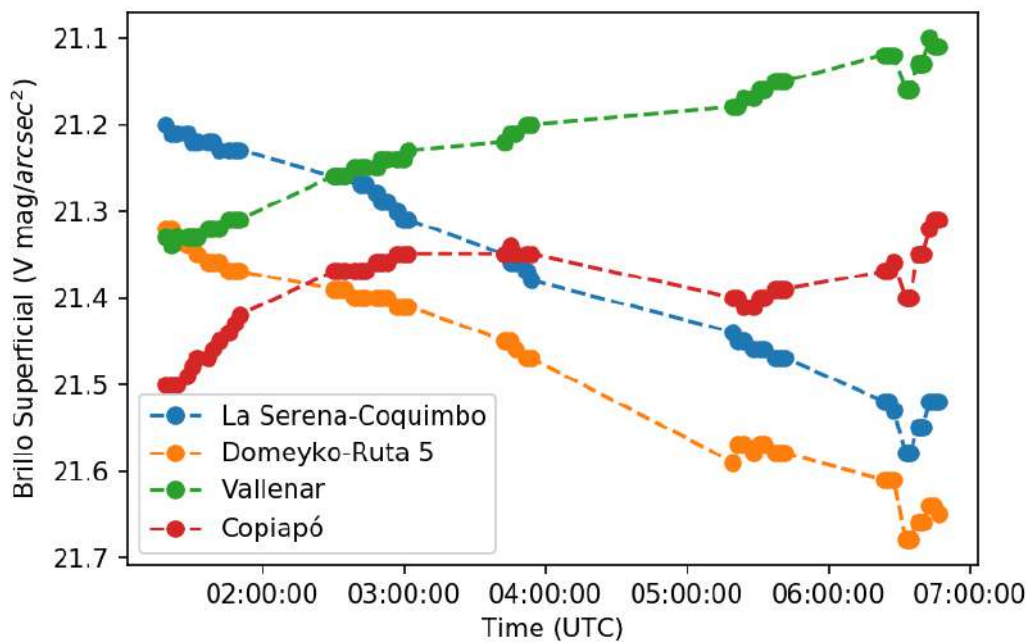


Figura 7.6: Variación del NSB en todas las áreas del LCO desde las 22:18:48 hasta 03:46:55 hora local.

7.3. Observatorio ESO La Silla

La Figura 7.7 presenta la observación realizada en la Silla donde podemos identificar que el área I, III y IV son fuentes de ALAN, ya que primero tienen un brillo superior 20 mag/arcsec^2 y segundo no se encuentran presentes en el mapa de GAMBONS. En el caso del área II no es tan fácil separar la contribución natural de la artificial, ya que el área aún cuenta con la contribución de brillo de la luz zodiacal debido a que la imagen fue adquirida al comienzo de la noche cuando aún estaba presente. Sin embargo, no se observa que la carretera tenga un valor de NSB superior al natural.

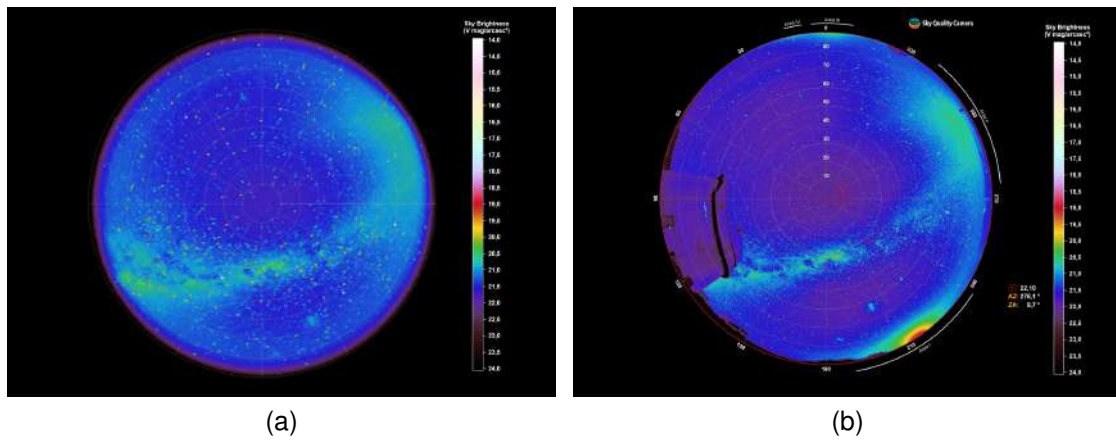


Figura 7.7: Comparación del mapa de ESO La Silla desde GAMBONS (izquierda) y la observación realizada (derecha)

Adicionalmente, construimos un círculo de radio 5° en el zenit con el fin de conocer el valor del brillo en este punto, el valor encontrado fue de $21.95 \text{ mag/arcsec}^2$ y en GAMBONS $21.66 \text{ mag/arcsec}^2$. También, buscamos la dirección del punto más oscuro del cielo para esta observación en la parte derecha de la Figura 7.7, podemos encontrar un círculo rojo donde se encuentra la posición de este punto y sus coordenadas son las siguientes: 8.7° en distancia al cenit y 276.1° en azimut donde el brillo del punto es de $22,10 \text{ mag/arcsec}^2$.

Al observar los datos ESO La Silla y el LCO nos damos cuenta de que tenemos las mismas áreas, esto debido a que los dos observatorios se encuentran uno en frente del otro separado por una distancia 20 km. Encontramos por ejemplo:

el área I presenta un mayor NSB desde la ESO La Silla, ya que se encuentra más cerca de la conurbación La Serena/Coquimbo. En ambos sitios el área I es la que más NSB contribuye. La carretera, es decir, el área II es el área que menos aporta al NSB en los sitios. Sin embargo, están son comparaciones superficiales debido a que los datos son tomados en fechas distintas, lo que implica que no se pueda hacer una comparación directa.

7.4. Parque Nacional Bosque Fray Jorge

En la Figura 7.8 presenta la observación realiza en el BFJ en el camping donde podemos identificar que el área I y II. Estas áreas son las más brillantes debido a que tienen un brillo superior 20 mag/arcsec^2 y adicionalmente, no se encuentran presentes en el mapa de GAMBONS. En el caso de las áreas III y IV se puede detallar un aumento del brillo que no se está presenten en el mapa de GAMBONS, pero no es tan brillante y esto es debido a que en esas direcciones hay poblaciones de pocos habitantes. El área V no es tan fácil de detallar la contribución artificial debido a que tenemos la presencia de contribuciones naturales, ya que el área aún cuenta con la contribución de brillo de la Vía Láctea. Sin embargo, al comparar con GAMBONS se puede observar que sobre el horizonte a un 1° de elevación hay un brillo diferente.

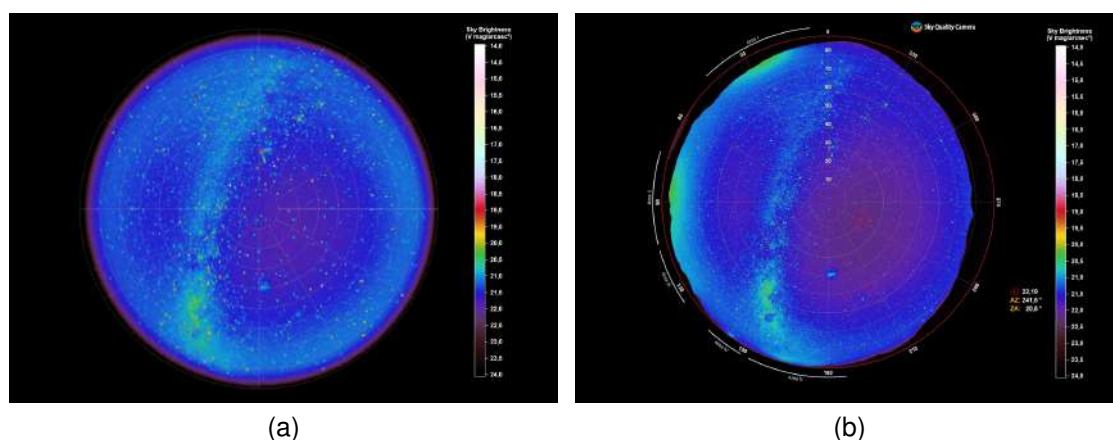


Figura 7.8: Comparación del mapa del BFJ en el camping desde GAMBONS (izquierda) y la observación realizada (derecha)

Adicionalmente, construimos un círculo de radio 5° en el zenit con el fin de conocer el valor del brillo en este punto, el valor encontrado fue de $21.91 \text{ mag/arcsec}^2$ y en GAMBONS $21.69 \text{ mag/arcsec}^2$. También, buscamos la dirección del punto más oscuro del cielo para esta observación en la parte derecha de la Figura 7.8 podemos encontrar un círculo rojo donde se encuentra la posición de este punto y sus coordenadas son las siguientes: 20.6° en ángulo zenital y 241.6° en azimut donde el brillo del punto es de $22,19 \text{ mag/arcsec}^2$.

7.5. Cerro Grande

En la Figura 7.9 presenta la observación realiza en el cerro grande donde podemos identificar como se degrada el cielo por ALAN. Al comparar los dos mapas podemos evidenciar como desde la ciudad estamos perdiendo la capacidad de observar las estrellas, en nuestra observación realizada tenemos el cielo tan brillante que son muy pocas las estrellas que podemos identificar. Este sitio se seleccionó con el fin de mostrar como es un cielo contaminado por ALAN. Adicionalmente, construimos un círculo de radio 5° en el zenit con el fin de conocer el valor del brillo en este punto, el valor encontrado fue de $19.62 \text{ mag/arcsec}^2$ y en GAMBONS $21.65 \text{ mag/arcsec}^2$. También, buscamos la dirección del punto más oscuro del cielo para esta observación en la parte derecha de la Figura 7.9 podemos encontrar un círculo rojo donde se encuentra la posición de este punto y sus coordenadas son las siguientes: 30.2° en ángulo zenital y 116.2° en azimut donde el brillo del punto es de $19,84 \text{ mag/arcsec}^2$.

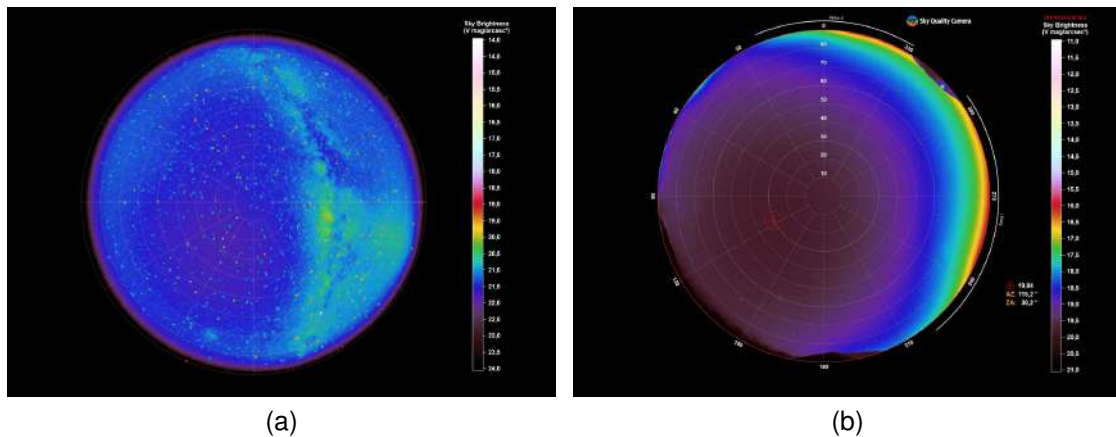


Figura 7.9: Comparación del mapa de cerro grande desde GAMBONS (izquierda) y la observación realizada (derecha)

7.6. La Conurbación La Serena/Coquimbo

En las secciones anteriores encontramos que el área que más afecta a los sitios de estudio es la que se encuentra en dirección a la conurbación La Serena/Coquimbo. Al ser la fuente que más contribuye con NSB, decidimos revisar los azimuts del área I. Para esto comparamos los azimuts del área con en el World Atlas 2015 y buscamos en que azimut proviene la máxima contribución de NSB. Para el caso del LCO azimut 208° , la Silla azimut 214° y BFJ azimut 26° . Ahora, todos estos valores están relaciones con el hecho de que cruzan por la misma zona de La Serena. Esta zona es:

- La parte histórica de la ciudad (Centro)
- La Ruta 5 (carretera principal)
- La zona del Estadio La Portada
- Las Compañías

La municipalidad de La Serena a través de la Secretaria Comunal de planificación¹ tiene disponible los mapas sectorizados de las luminarias de La Serena, utilizamos estos mapas para entender mejor los resultados de los azimuts en

¹<http://mapas.laserena.cl/>

los que se detecta el máximo de NSB en cada uno de los sitios. En la tabla 7.1, se encuentra la información de la potencia de todo el alumbrado público hasta el 2017 de la municipalidad de la Serena. Ahora, la municipalidad cuenta con la ubicación (latitud y longitud) de cada uno de las luminarias y en la página de la Secretaria de planificación delimitaron toda la ciudad por sectores como: Avenida del Mar, Centro, la Antena, la Pampa, las Compañías y la zona rural. Construyendo mapas de toda la ciudad con el alumbrado público. Nosotros descargamos los datos y graficamos esta información aplicando una media a los datos para obtener un mapa de color de la potencia (W) del alumbrado de la Serena.

La Figura 7.10 presenta el mapa de potencia de media del alumbrado de La Serena donde podemos identificar las zonas de mayor potencia: las Compañías, el centro histórico y la calle Amonátegui. Lo cual se correlaciona con los azimutes donde se encuentra el máximo NSB en los sitios.

Tipo de Luminaria (W)	Total por Tipo	Tipo de Luminaria (W)	Total por Tipo
100	17379	2x100/2x400	1
150	2111	2x250	3
150 WF0	38	2x400	26
1x100/1x100	1	2x70	9
1x100/1x150	105	3x100	14
1x100/1x250	5	3x150	3
1x100/1x400	82	3x400	58
1x100/2x400	11	400	26
1x70/1x100	1	4x100	46
1x70/2x250	1	4x150	5
250	54	4x400	16
2x100	606	6x100	1
2x100/1x400	3	70	117
Total de Luminarias en La Serena		20722	

Tabla 7.1: Tabla con las potencia y tipo de luminarias de la municipalidad de La Serena hasta el 2017

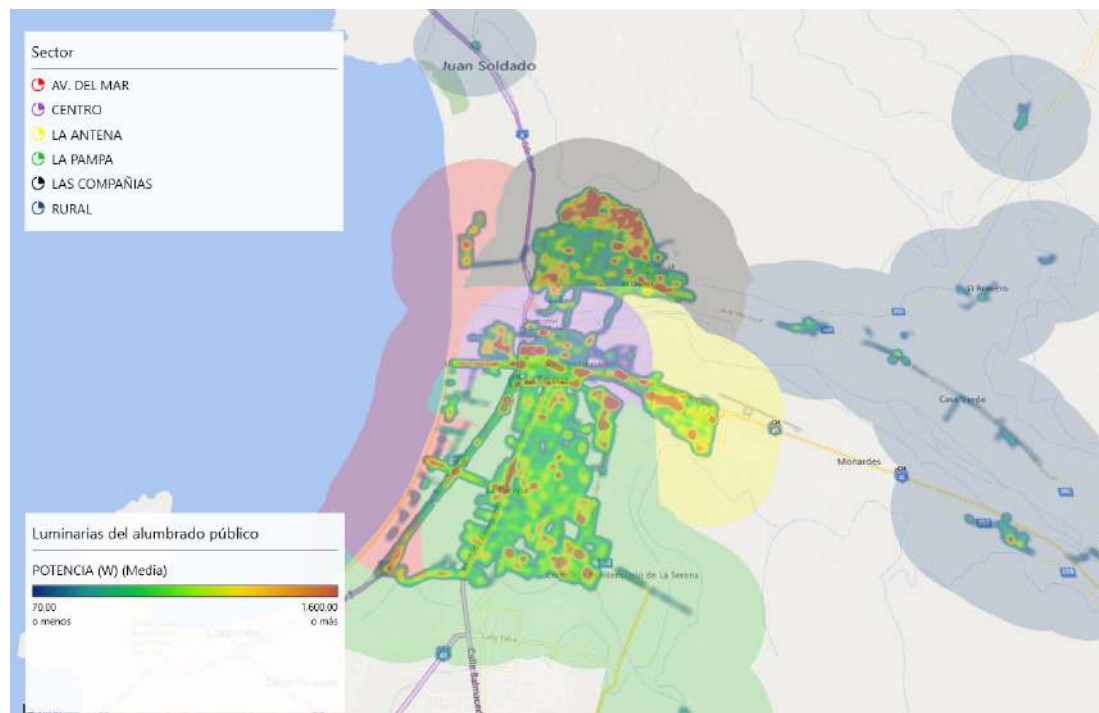


Figura 7.10: Mapa de La Serena con la potencia media del Alumbrado Público. Los colores superpuestos en el mapa corresponde a la delimitación que hace la Secretaria de Planificación

Capítulo 8

Conclusiones

La comprensión del brillo del cielo desde los observatorios en Chile (Las Campanas y la Silla) y Parque Nacional brinda un conocimiento acerca de cómo ALAN empieza afectar sitios que son considerados como cielos oscuros. En el caso de los observatorios presenta un esfuerzo que viene de años por conservar los cielos para la astronomía, mientras que en el Parque Nacional Fray Jorge simboliza la conservación no solo del cielo, sino de todas aquellas especies únicas que se han visto alteradas por el ALAN. En el caso de los datos de Cerro Grande, esto nos brinda una perspectiva desde el interior de una ciudad. Como parte de este trabajo, hemos investigado el cambio de color espectral y la atenuación (o amplificación) del brillo del cielo en los sitios descritos anteriormente. Nuestros principales resultados pueden enumerarse:

- Se observaron niveles de brillo al zenit en el Observatorio Las Campanas de $21.99 \text{ mag/arcsec}^2$ cuando la Vía Láctea esta bajo el horizonte, mientras que cuando cruza el zenit de $21.46 \text{ mag/arcsec}^2$ y en el Observatorio Eso La Silla $21.95 \text{ mag/arcsec}^2$ conservando en el zenit la característica de cielo oscuros. En el caso de La Silla nuestros resultados coinciden con los ya existentes por (Mattila & Väisänen, 1996). En la Tabla 8.1, se resumen los valores de NSB en el zenit y la dirección del punto de mínimo NSB de cada imagen.

Sitio	Zenit NSB ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$)	Mínimo de NSB		
		Distancia Zenital ($^\circ$)	Azimut ($^\circ$)	NSB ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$)
LCO	21.99 (MWD)	22.1	151	22.12
	21.46 (MWU)	38.4	226	22.00
ESO La Silla	21.95	8.7	276	22.10
BFJ	21.91	20.6	241	22.19
Cerro Grande	19.62	30.2	116	19.84

Tabla 8.1: Tabla con los valores de mínimo de NSB para cada sitio.

- Hasta el momento los observatorios no presentan sobre el horizonte una fuente que pueda ocasionar afectaciones a las mediciones astronómicas. Sin embargo, en el LCO y la Silla se pueden evidenciar que ya se están registrando áreas con elevaciones 10° a 15° , lo que representa una señal de alerta para cuidar los cielos oscuros, ya que se espera que con el crecimiento de las ciudades estos niveles aumenten.
- El Parque Bosque Fray Jorge tiene un brillo al zenit de $21.91 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$, lo cual le brinda la característica de sitio oscuro y tener la renovación de su certificación Starlight. No obstante, manifestamos nuestra voz de preocupación por las posibles instalaciones de nuevos parques eólicos en la zona costera, incluyendo las cercanías al Parque Nacional Bosque Fray Jorge. Esto de seguro comprometería la calidad del cielo nocturno del este sitio.
- Un sitio urbano como Cerro Grande tiene un brillo superficial en el zenit $19.62 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. A pesar de que es un valor relativamente bueno para un sitio urbano, este dato demuestra que cada vez se deteriora más cielo por el ALAN de la ciudad.
- Todos los sitios presentaron como característica principal que son afectados en gran parte por la conurbación La Serena-Coquimbo. Cuando se identificó el azimut desde cada lugar de estudio nos encontramos que el máximo brillo corresponde al centro histórico, la Ruta 5 y el estadio La Portada; y no hacia las zonas como Guillermo Ulrisky donde ha crecido

la zona residencial en los últimos años.

- La SQC es una herramienta que nos permite tener información simultánea del brillo superficial y temperatura de color correlacionada lo cual hace que sea una de las mejores herramientas para caracterizar ALAN. Sin embargo, debido a la nueva tecnología LED empieza a quedarse corto a la respuesta espectral de este tipo de lámpara y no es muy confiable para determinar contribuciones de LED.
- Presentamos una comparación de nuestros datos con GAMBONS donde se puede evidenciar que esta simulación de contribuciones naturales es bastante precisa. Cabe resaltar que GAMBONS sobre estima los valores del cenit (Masana et al., 2021). Sin embargo, es una buena aproximación para sitios de cielos oscuros.

Estos resultados se obtuvieron utilizando un método de fotometría de todo el cielo con una cámara DLSR y un lente de ojo de pez. Los resultados representan un primer paso para entender NSB en Chile y en especial en sitios de interés astronómico, naturalístico y turístico. Como el crecimiento de las ciudades sigue avanzado y por ende ALAN, es necesario seguir investigando el impacto de la luz artificial en sitios de cielos oscuros para comprender plenamente las posibles consecuencias de la contaminación lumínica.

Parte III

Proyectos a Futuro

Capítulo 9

Proyecto Doctorado

Como continuación de este trabajo de tesis, se propone la investigación de doctorado en la Universidad de La Serena bajo la supervisión del Profesor Rodolfo Angeloni y en colaboración con la Universidad de Padova (UniPD). El objetivo principal del proyecto es realizar el primer monitoreo espectral del cielo nocturno chileno a través de un espectrógrafo óptico portátil recientemente concebido. Este instrumento es capaz de tomar espectros calibrados de flujo de baja resolución ($R \sim 600$) a grandes porciones de la esfera celeste (~ 30 deg). De este modo, obtener una caracterización espectral completa de las fuentes naturales y artificiales del brillo del cielo nocturno, un patrimonio natural y cultural que es nuestra obligación científica, social y moral defender y preservar.

Como se ha mencionado en el capítulo 3, los diferentes instrumentos para cuantificar el ALAN operan para una cierta distribución espectral de energía donde los resultados son confiables. Sin embargo, existe una creciente preocupación por el cambio en la distribución espectral de energía que experimenta el ALAN, con la llegada de la tecnología LED. Esta tecnología de fácil acceso se ha instaurado rápidamente en el mercado y se ha comercializado de forma masiva. Actualmente, se ha evidenciado que la mayoría de las técnicas con las que se monitorea ALAN son incapaces de seguir el ritmo.

De hecho, hay pruebas claras de que, a pesar de un aumento objetivo del número de instalaciones de alumbrado público y privado, los valores de brillo basados en SQM tienden a aumentar progresivamente, ofreciendo así la impresión contradictoria de que los niveles de contaminación lumínica estarían disminuyendo: una conclusión claramente incorrecta que solo puede explicarse teniendo en cuenta que los desplazamientos de la emisión global de ALAN se mueven a rangos espectrales que el SQM y dispositivos similares simplemente no pueden afrontar (Bertolo et al. 2019; Kyba 2018).

Pero no solo los SQM se ven afectados por este cambio en la distribución espectral, todos los dispositivos en algún momento lo harán debido a que están diseñados para cubrir rangos específicos de la distribución espectral de energía. Es por esta razón que se hace necesario un análisis espectral y se convierte en el siguiente paso a realizar por la persona que aquí escribe.

El prototipo para llevar a cabo estas nuevas mediciones ha sido diseñado y construido recientemente por M. Fiaschi perteneciente ARPAV, una agencia regional de prevención y protección del medio ambiente en Italia. El prototipo ha visto su primera luz a principios de junio de 2020 desde la ciudad de Padua y ha ofrecido resultados preliminares muy prometedores sobre las mediciones de ALAN. Por esta razón, el año pasado se construyó una propuesta ALMA-ANID la cual ha sido aceptada (Figura 9.1) para tener un instrumento similar con versión actualizada y mejorada para monitorear ALAN desde Chile. En la Figura 9.2, presentamos la primera luz del espectrógrafo.

**Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo**

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

Santiago, 22 de marzo de 2021
REC/GSC/061

**Dr.
Rodolfo Angeloni
Universidad de La Serena
Presente**

Materia: «Notificación de Fallo Concurso Fondo ALMA-ANID 2020»

Estimado Dr. Angeloni,

Junto con saludarle, informo a usted que con fecha 11 de marzo del año 2021, ANID aprobó la Resolución de Fallo del Concurso ALMA 2020.

En relación a este fallo y a su proyecto presentado **N° ASTRO20-0041**, denominado **"A portable low-resolution prototype spectrograph for monitoring the night sky. towards a full characterization of artificial light at night (alan) in the era of led lighting"**, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Mixto ALMA resolvió aprobar su postulación, tal como se señala a continuación:

Nombre IR	Adjudicado Año 1	Adjudicado Año 2	Total Adjudicado
Rodolfo Angeloni	\$15.000.000	\$2.500.000	\$17.500.000

Para iniciar los trámites de firma de convenio, le agradecemos responder aceptando las condiciones estipuladas en este documento vía correo electrónico.

Atentamente,

**Patricia Muñoz Palma
Subdirectora**

Subdirección de Redes, Estrategia y Conocimiento
ANID

Figura 9.1: Carta de adjudicación del proyecto por parte de ANID.

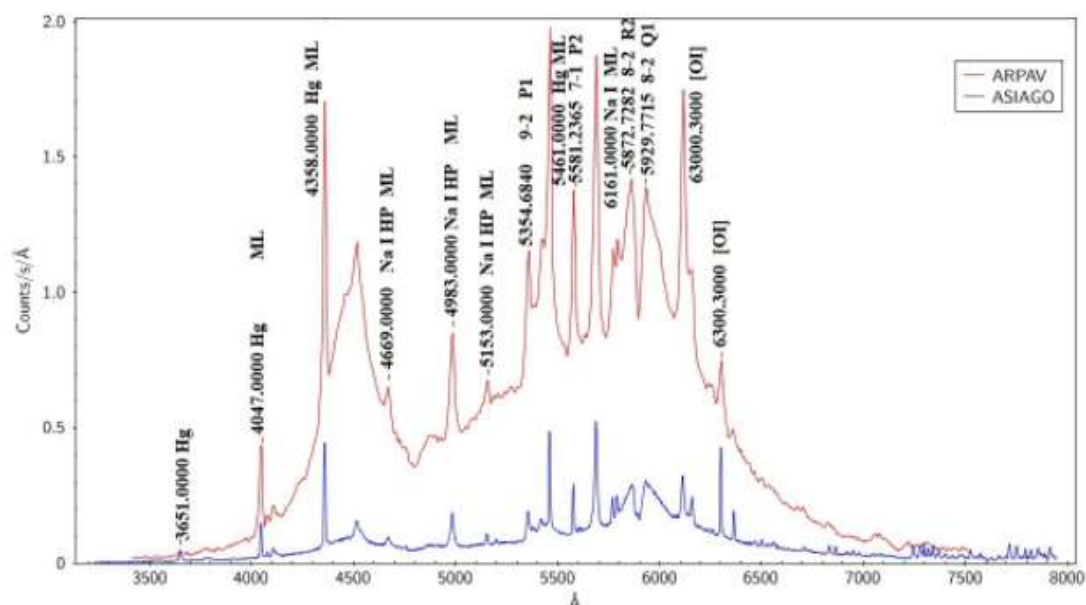


Figura 9.2: Espectros del cielo nocturno del Observatorio de Asiago (línea azul - tomada con el espectrógrafo *B&C* en el telescopio Galileo 1.2m por S. Ciroi) y de la ciudad de Padua (línea roja - primera luz del prototipo de espectrógrafo ARPAV, tomada por M. Fiaschi a principios de junio de 2020). El espectro ARPAV (aún no calibrado en flujo) se obtuvo con la lente de objetivo de 6 mm y un tiempo de exposición de 600 s.

Bibliografía

Aceituno, J., Sánchez, S., Aceituno, F. J., Galadí-Enríquez, D., Negro, J. J., Soriguer, R. C., & Gomez, G. S. (2011). An all-sky transmission monitor: Astmon. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(907), 1076.

Aubé, M., Franchomme-Fossé, L., Robert-Staehler, P., & Houle, V. (2005). Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: toward a night-time aerosol optical depth retrieval method. In *Atmospheric and environmental remote sensing data processing and utilization: numerical atmospheric prediction and environmental monitoring*, vol. 5890, (p. 589012). International Society for Optics and Photonics.

Baade, W. (1944). The resolution of messier 32, ngc 205, and the central region of the andromeda nebula. *The Astrophysical Journal*, 100, 137.

Bará, S., Tapia, C. E., & Zamorano, J. (2019). Absolute radiometric calibration of tess-w and sqm night sky brightness sensors. *Sensors*, 19(6), 1336.

Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., & Gaston, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104(3), 611–620.

Bertolo, A., Binotto, R., Ortolani, S., & Sapienza, S. (2019). Measurements of night sky brightness in the veneto region of italy: Sky quality meter network results and differential photometry by digital single lens reflex. *Journal of Imaging*, 5(5), 56.

Blanc, G. (2016). Protecting the dark skies of chile: Initiatives, education and coordination. *Published in 2016 by the United Nations Educational, Scientific*

and Cultural Organization, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France and the UNESCO Office in Mexico, Presidente Masaryk 526, Polanco, Miguel Hidalgo, 11550 Ciudad de Mexico, DF, Mexico., (p. 85).

Bortle, J. E. (2001). The bortle dark-sky scale. *Sky and Telescope*.

Brei, M., Pérez-Barahona, A., & Strobl, E. (2016). Environmental pollution and biodiversity: Light pollution and sea turtles in the caribbean. *Journal of Environmental Economics and Management*, 77, 95–116.

Briggs, W. R. (2006). Physiology of plant responses to artificial lighting. *Ecological consequences of artificial night lighting*, (pp. 389–411).

Buchheim, R. K. (2007). Visual variable star observing. *The Sky is Your Laboratory: Advanced Astronomy Projects for Amateurs*, (pp. 75–94).

Cabe, J. (2020). *Canon EOS 6D Mark II Users Guide: The Complete User Guide for Quickly Mastering Canon 6D Mark II DSLR Digital Camera from Beginner to Expert with All the Hidden Tips and Tricks*. Independently Published.

URL https://books.google.cl/books?id=5z_2zQEACAAJ

Cabrera-Cruz, S. A., Smolinsky, J. A., McCarthy, K. P., & Buler, J. J. (2019). Urban areas affect flight altitudes of nocturnally migrating birds. *Journal of Animal Ecology*, 88(12), 1873–1887.

Campos, J., & Pons, A. (2015). Sabías que las lámparas tienen una temperatura de color correlacionada. *Revista Española de Metrología*, 9, 95–97.

Chamberlain, J. W. (1958). Theories of the aurora. In *Advances in geophysics*, vol. 4, (pp. 109–215). Elsevier.

Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: health effects of light pollution.

Christensen, L. L., Noll, S., & Horálek, P. (2016). Light phenomena over the eso observatories i: airglow. *Messenger*, 163, 40–2.

- Cinzano, P. (2005). Night sky photometry with sky quality meter. *ISTIL Int. Rep*, 9(1).
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C., & Baugh, K. (2000). The artificial night sky brightness mapped from dmsp satellite operational linescan system measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318(3), 641–657.
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689–707.
- Cole, S., Treyer, M.-A., & Silk, J. (1992). The faint galaxy contribution to the diffuse extragalactic background light. *The Astrophysical Journal*, 385, 9–25.
- Cook-Mena, V., Chávez-Villavicencio, C., Martínez-Palma, P., & Tabilo-Valdivieso, E. (2019). Variación de la abundancia de lama guanicoe en el parque nacional bosque fray jorge, coquimbo, chile y su relación con la cobertura vegetal. *Revista peruana de biología*, 26(4), 481–490.
- Da Silva, A., Valcu, M., & Kempenaers, B. (2015). Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common european songbirds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140126.
- Davies, T. W., Duffy, J. P., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2016). Stemming the tide of light pollution encroaching into marine protected areas. *Conservation Letters*, 9(3), 164–171.
- Dick, R. (2011). Reducing light pollution across canada: Efforts of the royal astronomical society of canada. In *Sources of Knowledge Forum: Dark Skies, Bright Minds. Conference Proceedings*, (pp. 10–16).
- Diez-Suárez, A., GONZÁLEZ MARTÍNEZ, A., DE LA PUENTE GIL, Á., VEGA BARRALLO, B., & DE SIMON MARTIN, M. (2017). *Selección de equipos*

y materiales en las instalaciones eléctricas de baja tensión en el entorno de edificios de viviendas, industrias, oficinas y locales de pública concurrencia. Paraninfo.

Donners, M., van Grunsven, R. H., Groenendijk, D., van Langevelde, F., Bikker, J. W., Longcore, T., & Veenendaal, E. (2018). Colors of attraction: Modeling insect flight to light behavior. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 329(8-9), 434–440.

Duarte, C., Quintanilla-Ahumada, D., Anguita, C., Manríquez, P. H., Widdicombe, S., Pulgar, J., Silva-Rodriguez, E. A., Miranda, C., Manríquez, K., & Quijón, P. A. (2019). Artificial light pollution at night (alan) disrupts the distribution and circadian rhythm of a sandy beach isopod. *Environmental Pollution*, 248, 565–573.

Duriscoe, D. M. (2013). Measuring anthropogenic sky glow using a natural sky brightness model. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(933), 1370.

Duriscoe, D. M. (2016). Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, 33–45.

Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., & Ghosh, T. (2017). Viirs night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860–5879.

Falchi, F., & Bará, S. (2020). Protecting the night sky darkness in astronomical observatories: a linear systems approach. *arXiv preprint arXiv:2008.09928*.

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances*, 2(6), e1600377.

Ffrench-Constant, R. H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., Spalding, A., & McGregor, P. K. (2016). Light pollution is associated

- with earlier tree budburst across the united kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), 20160813.
- Forgan, D. (2009). An introduction to monte carlo radiative transfer. Tech. rep., Tech. rep., Institute for Astronomy Royal Observatory Edinburgh.
- Gallaway, T. (2010). On light pollution, passive pleasures, and the instrumental value of beauty. *Journal of Economic Issues*, 44(1), 71–88.
- Gallaway, T., Olsen, R. N., & Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological economics*, 69(3), 658–665.
- Ganslandt, R., & Hofmann, H. (2011). *Handbook of Lighting Design*. ERCO Edition. Editorial Vieweg.
URL <https://www.ercos.com/>
- García, M. C. M., & Moreno, A. M. (2016). La contaminación lumínica. aproximación al problema en el barrio de sants (barcelona)/light pollution. approach to the problem in sants quarter (barcelona, spain)/la pollution lumineuse. approche du problème dans le quartier de sants (barcelone, espagne). *Observatorio Medioambiental*, 19, 133.
- Garstang, R. (1986). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98(601), 364.
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological reviews*, 88(4), 912–927.
- Glickman, G., Levin, R., & Brainard, G. C. (2002). Ocular input for human melatonin regulation: relevance to breast cancer. *Neuroendocrinology Letters*, 23, 17–22.
- Gooley, J. J., Chamberlain, K., Smith, K. A., Khalsa, S. B. S., Rajaratnam, S. M., Van Reen, E., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A., & Lockley, S. W. (2011). Exposure to room light before bedtime suppresses melatonin onset and

- shortens melatonin duration in humans. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 96(3), E463–E472.
- Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D. M., Gabriel, K., Jechow, A., Kupprat, F., Lerner, A., Marchant, P., Riley, W., et al. (2019). Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates. *Sustainability*, 11(22), 6400.
- Hamacher, D. W., De Napoli, K., & Mott, B. (2020). Whitening the sky: light pollution as a form of cultural genocide. *arXiv preprint arXiv:2001.11527*.
- Hänel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., Kollath, Z., Lolkema, D. E., Moore, C., Schmidt, N., et al. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278–290.
- Haus, E., & Smolensky, M. (2006). Biological clocks and shift work: circadian dysregulation and potential long-term effects. *Cancer causes & control*, 17(4), 489–500.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons.
- Hosokawa, K., Kullen, A., Milan, S., Reidy, J., Zou, Y., Frey, H. U., Maggiolo, R., & Fear, R. (2020). Aurora in the polar cap: A review. *Space Science Reviews*, 216(1), 1–44.
- Hubble, E., & Humason, M. L. (1931). The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 74, 43.
- Hubble, E. P. (1925). Cepheids in spiral nebulae. *Popular Astronomy*, 33.
- Ingham, M. (1972). The spectrum of the airglow. *Scientific American*, 226(1), 78–85.
- Kelt, D. A., Cofré, H., Cornelius, C., Engilis Jr, A., Gutiérrez, J. R., Marquet, P. A., Medel, R., Meserve, P. L., Quirici, V., Samaniego, H., et al. (2016). The

- avifauna of bosque fray jorge national park and chile's norte chico. *Journal of Arid Environments*, 126, 23–36.
- Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörler, M., & Fontaine, C. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548(7666), 206–209.
- Kocifaj, M. (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics*, 46(15), 3013–3022.
- Kolláth, Z., Száz, D., Kolláth, K., & Tong, K. P. (2020). Light pollution monitoring and sky colours. *Journal of Imaging*, 6(10), 104.
- Krisciunas, K., Contreras, C., Burns, C. R., Phillips, M., Stritzinger, M. D., Morrell, N., Hamuy, M., Anais, J., Boldt, L., Busta, L., et al. (2017). The carnegie supernova project. i. third photometry data release of low-redshift type ia supernovae and other white dwarf explosions. *The Astronomical Journal*, 154(5), 211.
- Krisciunas, K., Semler, D. R., Richards, J., Schwarz, H. E., Suntzeff, N. B., Vera, S., & Sanhueza, P. (2007). Optical sky brightness at cerro tololo inter-american observatory from 1992 to 2006. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(856), 687.
- Kuechly, H. U., Kyba, C. C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., Fischer, J., & Hölker, F. (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in berlin, germany. *Remote Sensing of Environment*, 126, 39–50.
- Kyba, C., Garz, S., Kuechly, H., De Miguel, A. S., Zamorano, J., Fischer, J., & Hölker, F. (2015). High-resolution imagery of earth at night: New sources, opportunities and challenges. *Remote sensing*, 7(1), 1–23.
- Kyba, C. C. (2018). Is light pollution getting better or worse? *Nature Astronomy*, 2(4), 267–269.

- Kyba, C. C., Wagner, J. M., Kuechly, H. U., Walker, C. E., Elvidge, C. D., Falchi, F., Ruhtz, T., Fischer, J., & Hölker, F. (2013). Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance. *Scientific reports*, 3(1), 1–6.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (2013). *Mechanics and electrodynamics*. Elsevier.
- Leinert, C., Bowyer, S., Haikala, L., Hanner, M., Hauser, M., Levasseur-Regourd, A.-C., Mann, I., Mattila, K., Reach, W., Schlosser, W., et al. (1998). The 1997 reference of diffuse night sky brightness. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 127(1), 1–99.
- Levasseur-Regourd, A.-C., & Dumont, R. (1980). Absolute photometry of zodiacal light. *Astronomy and Astrophysics*, 84, 277–279.
- Louedec, K. (2011). *Atmospheric aerosols at the Pierre Auger Observatory: characterization and effect on the energy estimation for ultra-high energy cosmic rays*. Ph.D. thesis, Université Paris Sud-Paris XI.
- Luginbuhl, C. B., Boley, P. A., & Davis, D. R. (2014). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 21–26.
- Macgregor, C. J., Pocock, M. J., Fox, R., & Evans, D. M. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecological entomology*, 40(3), 187–198.
- Martínez-Ledesma, M., Sanhueza, P., Corco, C., Astudillo, H., Angeloni, R., Damke, G., Falchi, F., & Blanc, G. (2019). Spectral and zonal restriction justification - review process of ds043/2012 mma (ministry of environment).
- Masana, E., Carrasco, J. M., Bará, S., & Ribas, S. J. (2021). A multiband map of the natural night sky brightness including gaia and hipparcos integrated starlight. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(4), 5443–5456.

- Massetti, L. (2018). Assessing the impact of street lighting on platanus x acerifolia phenology. *Urban forestry & urban greening*, 34, 71–77.
- Mathis, J., Mezger, P., & Panagia, N. (1983). Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar matter and in giant molecular clouds. *Astronomy and Astrophysics*, 128, 212–229.
- Mattila, K., & Väisänen, P. v. (1996). Sky brightness at the eso la silla observatory 1978 to 1988. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 119(1), 153–170.
- McMahon, T. A., Rohr, J. R., & Bernal, X. E. (2017). Light and noise pollution interact to disrupt interspecific interactions. *Ecology*, 98(5), 1290–1299.
- Meserve, P. L., Kelt, D. A., Gutiérrez, J. R., Previtali, M. A., & Milstead, W. B. (2016). Biotic interactions and community dynamics in the semiarid thorn scrub of bosque fray jorge national park, north-central chile: a paradigm revisited. *Journal of Arid Environments*, 126, 81–88.
- Mie, G. (1908). Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Annalen der physik*, 330(3), 377–445.
- Morgan-Taylor, M. (2015). Regulating light pollution in europe: Legal challenges and ways forward. In *Iluminación urbana, contaminación lumínica y sociedad*. Routledge.
- Narisada, K., & Schreuder, D. (2004). Adverse effects of light pollution. In *Light Pollution Handbook*, (pp. 79–114). Springer.
- O’Connell, R. W. (1987). Ultraviolet detection of very low-surface-brightness objects. *The Astronomical Journal*, 94, 876–882.
- Orellana Mc Bride, A. G. (2020). Conformación metropolitana desde la fragmentación. el proceso de conurbación del gran la serena. *Urbano (Concepción)*, 23(41), 58–83.

- Osterbrock, D., Walker, M., & Koski, A. (1976). The spectrum of light pollution at mount hamilton. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 88(523), 349.
- Owens, A. C., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E. K., & Seymoure, B. (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation*, 241, 108259.
- Papalambrou, A., & Doulos, L. T. (2019). Identifying, examining, and planning areas protected from light pollution. the case study of planning the first national dark sky park in greece. *Sustainability*, 11(21), 5963.
- Patat, F. (2003). Ubvri night sky brightness during sunspot maximum at esoparanal. *Astronomy & Astrophysics*, 400(3), 1183–1198.
- Patat, F. (2008). The dancing sky: 6 years of night-sky observations at cerro paranal. *Astronomy & Astrophysics*, 481(2), 575–591.
- Percy, J. R. (2001). Light pollution: Education of students, teachers and the public. In *Symposium-International Astronomical Union*, vol. 196, (pp. 353–358). Cambridge University Press.
- Posch, T., Binder, F., & Puschnig, J. (2018). Systematic measurements of the night sky brightness at 26 locations in eastern austria. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 211, 144–165.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520–7540.
- Rajkhowa, R. (2014). Light pollution and impact of light pollution. *International Journal of Science and Research*, 3(10), 861–867.
- Riegel, K. W. (1973). Light pollution: outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science*, 179(4080), 1285–1291.

- Roach, F., & Gordon, J. L. (1973). The night airglow or nightglow. In *The Light of the Night Sky*, (pp. 47–81). Springer.
- Romano, G. (2002). Stargazing: Its importance to man throughout the centuries. In *International Dark-Sky Association (IDA) Regional Meeting, Venice, Italy*, (pp. 77–83).
- Rybicki, G., & Lightman, A. (2008). *Radiative Processes in Astrophysics*. Physics textbook. Wiley.
URL <https://books.google.cl/books?id=eswe2StAspsC>
- Sánchez de Miguel, A., Aubé, M., Zamorano, J., Kocifaj, M., Roby, J., & Tapia, C. (2017). Sky quality meter measurements in a colour-changing world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3), 2966–2979.
- Sánchez-Medina, A. J., Alonso-Hernández, J. B., Voltes-Dorta, A., et al. (2019). Astrotourism and night sky brightness forecast: first probabilistic model approach. *Sensors*, 19(13), 2840.
- Schroer, S., Häffner, E., & Hölker, F. (2019). Impact of artificial illumination on the development of a leafmining moth in urban trees. *International Journal of Sustainable Lighting*, 21(1), 1–10.
- Schroer, S., Kyba, C., van Grunsven, R., Celino, I., Corcho, O., & Hölker, F. (2018). Citizen science to monitor light pollution—a useful tool for studying human impacts on the environment. In *Citizen Science*. JSTOR.
- Silva, B. K. (2020). Chile: A center of global astronomy, 1850–2019. In *Oxford Research Encyclopedia of Latin American History*. Oxford University Press.
- Snyder, J. P. (1987). *Map projections—A working manual*, vol. 1395. US Government Printing Office.
- Spinrad, H., & Stone, R. (1978). An upper limit to the extragalactic background light. *The Astrophysical Journal*, 226, 609–612.

- Squeo, F. A., Loayza, A. P., López, R. P., & Gutiérrez, J. R. (2016). Vegetation of bosque fray jorge national park and its surrounding matrix in the coastal desert of north-central chile. *Journal of Arid Environments*, 126, 12–22.
- Stevens, R. G. (2009). Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. *International journal of epidemiology*, 38(4), 963–970.
- Stone, E. L., Harris, S., & Jones, G. (2015). Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology*, 80(3), 213–219.
- Straka, T., Greif, S., Schultz, S., Goerlitz, H. R., & Voigt, C. (2020). The effect of cave illumination on bats. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00808.
- Teikari, P. (2007). Light pollution. *UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA*.
- Thews, G., & Mutschler, E. (1983). *Anatomía, fisiología y patofisiología del hombre*. Reverté.
URL <https://books.google.cl/books?id=5HNSGRm0aWMC>
- Toller, G., Tanabe, H., & Weinberg, J. (1987). Background starlight at the north and south celestial, ecliptic, and galactic poles. *Astronomy and astrophysics*, 188, 24–34.
- Turek, F. W., Joshu, C., Kohsaka, A., Lin, E., Ivanova, G., McDearmon, E., Laposky, A., Losee-Olson, S., Easton, A., Jensen, D. R., et al. (2005). Obesity and metabolic syndrome in circadian clock mutant mice. *Science*, 308(5724), 1043–1045.
- Villagrán, C. (2018). Biogeografía de los bosques subtropical-templados del sur de sudamérica. hipótesis históricas. *Magallania (Punta Arenas)*, 46(1), 27–48.
- Walker, C. E., Pompea, S. M., Sparks, R. T., & Dokter, E. (2010). Teaching illumination engineering using light pollution education kits. In *Optics Edu-*

cation and Outreach, vol. 7783, (p. 77830H). International Society for Optics and Photonics.

Walker, M. F. (1973). Light pollution in california and arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 85(507), 508.

Walker, W. H., Bumgarner, J. R., Walton, J. C., Liu, J. A., Meléndez-Fernández, O. H., Nelson, R. J., & DeVries, A. C. (2020). Light pollution and cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(24), 9360.

Wesson, P. S. (1991). Olbers's paradox and the spectral intensity of the extragalactic background light. *The Astrophysical Journal*, 367, 399–406.

Wilson, T., Rohlf, K., & Huettemeister, S. (2008). *Tools of Radio Astronomy*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg.
URL <https://books.google.cl/books?id=9KHw6R8rQEMC>

Wright, K. P., Hughes, R. J., Kronauer, R. E., Dijk, D.-J., & Czeisler, C. A. (2001). Intrinsic near-24-h pacemaker period determines limits of circadian entrainment to a weak synchronizer in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(24), 14027–14032.

Zamorano, J., García, C., Tapia, C., de Miguel, A. S., Pascual, S., & Gallego, J. (2016). Stars4all night sky brightness photometer. *International Journal of Sustainable Lighting*, 18, 49–54.

Zielinska-Dabkowska, K. M. (2019). Urban lighting masterplan-origins, definitions, methodologies and collaborations.

Zwicky, F. (1933). Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helvetica physica acta*, 6, 110–127.

Parte IV

Apéndices

Te

Apéndice A

Información de los datos

La Tabla A.1 corresponde a un resumen de todos los datos utilizados para este trabajo de grado. Allí están registrados los datos correspondientes al sitio, la fecha, los tiempos de exposición y el ISO para cada uno de los datos.

Nombre	Ubicación	Fecha	Hora	Tiempo de exposición (s)	ISO
LCO1	LCO	24-11-2019	22:18:48	120	1600
LCO2	LCO	25-11-2019	22:21:03	120	1600
LCO3	LCO	25-11-2019	22:23:18	120	1600
LCO4	LCO	25-11-2019	23:27:47	120	1600
LCO5	LCO	25-11-2019	22:30:02	120	1600
LCO6	LCO	25-11-2019	22:32:17	120	1600
LCO7	LCO	25-11-2019	22:36:47	120	1600
LCO8	LCO	24-11-2019	22:39:02	120	1600
LCO9	LCO	25-11-2019	22:41:17	120	1600
LCO10	LCO	25-11-2019	22:45:47	120	1600
LCO11	LCO	25-11-2019	22:48:02	120	1600
LCO12	LCO	25-11-2019	22:50:17	120	1600
LCO13	LCO	25-11-2019	23:30:08	120	1600

Continúa en la siguiente página

Nombre	Ubicación	Fecha	Hora	Tiempo de exposición (s)	ISO
LCO14	LCO	25-11-2019	23:32:23	120	1600
LCO15	LCO	25-11-2019	23:34:38	120	1600
LCO16	LCO	25-11-2019	23:39:07	120	1600
LCO17	LCO	25-11-2019	23:41:22	120	1600
LCO18	LCO	25-11-2019	23:43:37	120	1600
LCO19	LCO	25-11-2019	23:48:07	120	1600
LCO20	LCO	25-11-2019	23:50:22	120	1600
LCO21	LCO	25-11-2019	23:52:37	120	1600
LCO22	LCO	25-11-2019	23:57:07	120	1600
LCO23	LCO	25-11-2019	23:59:22	120	1600
LCO24	LCO	25-11-2019	00:01:47	120	1600
LCO25	LCO	25-11-2019	00:42:40	120	1600
LCO26	LCO	25-11-2019	00:44:55	120	1600
LCO27	LCO	25-11-2019	00:47:10	120	1600
LCO28	LCO	25-11-2019	00:51:39	120	1600
LCO29	LCO	25-11-2019	00:53:54	120	1600
LCO30	LCO	25-11-2019	02:19:20	120	1600
LCO31	LCO	25-11-2019	02:21:34	120	1600
LCO32	LCO	25-11-2019	02:23:49	120	1600
LCO33	LCO	25-11-2019	02:28:19	120	1600
LCO34	LCO	25-11-2019	02:30:34	120	1600
LCO35	LCO	25-11-2019	02:32:49	120	1600
LCO36	LCO	25-11-2019	02:37:19	120	1600
LCO37	LCO	25-11-2019	02:39:34	120	1600
LCO38	LCO	25-11-2019	02:41:49	120	1600
LCO39	LCO	25-11-2019	03:23:36	120	1600
LCO40	LCO	25-11-2019	03:25:39	120	1600

Continúa en la siguiente página

Nombre	Ubicación	Fecha	Hora	Tiempo de exposición (s)	ISO
LCO41	LCO	25-11-2019	03:27:42	120	1600
LCO42	LCO	25-11-2019	03:32:41	60	1600
LCO43	LCO	25-11-2019	03:33:44	60	1600
LCO44	LCO	25-11-2019	03:34:47	60	1600
LCO45	LCO	25-11-2019	03:37:46	60	3200
LCO46	LCO	25-11-2019	03:38:49	60	3200
LCO47	LCO	25-11-2019	03:39:52	60	3200
LCO48	LCO	25-11-2019	03:42:49	120	3200
LCO49	LCO	25-11-2019	03:44:52	120	3200
LCO50	LCO	25-11-2019	03:46:55	120	3200
S1	Eso La Silla	24-05-2019	20:10:01	120	1600
S2	Eso La Silla	24-05-2019	20:19:18	120	1600
BFJ-E1	BFJ- Entra Norte	09-01-2021	22:52:06	120	1600
BFJ-E2	BFJ- Entra Norte	09-01-2021	22:56:06	120	1600
BFJ-E3	BFJ- Entra Norte	09-01-2021	23:00:06	120	1600
BFJ-C1	BFJ- Camping	09-01-2021	23:09:51	120	1600
BFJ-C2	BFJ- Camping	09-01-2021	23:13:51	120	1600
BFJ-C3	BFJ- Camping	09-01-2021	23:17:51	120	1600
BFJ-C4	BFJ- Camping	09-01-2021	23:21:51	120	1600
BFJ-C5	BFJ- Camping	09-01-2021	23:25:50	120	1600
CB	Cerro Grande	29-10-2019	22:01:35	15	1600

Tabla A.1: Informe de las observaciones.

Apéndice B

Fotometría con Cámaras DSLR

Una cámara DSLR (Digital Single Lens Reflex), es una cámara reflex digital de un solo lente. Las cámaras DSLR son una de las formas más económicas de iniciarse en la fotografía digital. Se necesitan fundamentalmente tres cosas: una lente o dispositivo de enfoque, una cámara capaz de proporcionar imágenes en un formato sin procesar y algo para estabilizar la cámara durante exposiciones prolongadas. Discutiremos cada uno de estos tres componentes en detalle basados en Cabe 2020; Buchheim 2007

B.1. Cámaras DSLR

Las cámaras DSLR consisten en un cuerpo de la cámara donde se encuentra un espejo que refleja la luz que llega del objetivo hacia un visor óptico, ya sea por un prisma (en DSLR de gama alta) o una serie de espejos adicionales (generalmente en modelos de gama baja). Así es como se puede ver lo que está filmando, directamente a través del lente. Cuando se presiona el obturador, ese espejo se levanta, el obturador se abre, y la luz que llega del objetivo, toma directamente al sensor de imágenes donde se realiza la fotografía (Buchheim, 2007).

B.1.1. Trayectoria óptica

La cámara consta de un objetivo fijado en la parte delantera del cuerpo de la cámara, un obturador, varios filtros grandes, una matriz de microlentes, filtros adicionales y un detector. El primer componente óptico es el objetivo. Su objetivo principal es proyectar y enfocar una imagen en el sensor. Detrás del objetivo se encuentra el diafragma. Este determina la apertura total, o superficie de captación de luz, del objetivo. Estos componentes suelen estar contenidos en el propio cuerpo del objetivo. Dentro del cuerpo de la cámara, el primer elemento que se encuentra es el obturador. El objetivo del obturador es controlar la luz que entra en la cámara. Detrás del diafragma hay una serie de filtros que eliminan la luz no deseada (infrarroja y ultravioleta). La cámara presenta dos situaciones de funcionamiento:

Situación normal: La luz pasa a través de la lente y su apertura está completamente abierta. Se refleja hacia la pantalla de enfoque en el espejo principal. Allí se realiza la medición fotométrica y el enfoque se puede confirmar en el caso de una lente manual. La luz continúa su recorrido y se refleja en las paredes del microprisma para llegar al ocular, donde el usuario puede visualizar y componer la escena. Una pequeña parte de la luz, atraviesa el espejo primario, que es parcialmente transparente (al menos en una zona), y se refleja en el espejo secundario para llegar a los sensores de autoenfoque. Normalmente el enfoque se hace al pulsar ligeramente el botón de disparo, justo antes de tomar la imagen.

Situación de disparo: Al presionar el botón del disparador, ocurre lo siguiente en la cámara:

- El diafragma se cierra al valor seleccionado.
- El espejo primario se levanta y el espejo secundario se levanta, dejando un camino despejado para que la luz llegue al sensor.

- La primera cortina del obturador mecánico se abre y expone el sensor a la luz.
- La segunda cortina se cierra en función de la velocidad seleccionada y finaliza la exposición.
- Se baja el espejo y se abre la apertura para que la cámara pueda reutilizarse.

Todo esto sucede muy rápido. La velocidad de disparo de las cámaras DSLR puede alcanzar de 5 a 8 imágenes por segundo. Además, se puede apreciar que la imagen desaparece del ocular, ya que el espejo está levantado. En la Figura B.1, se observa la comparación del recorrido de la luz en las dos situaciones.

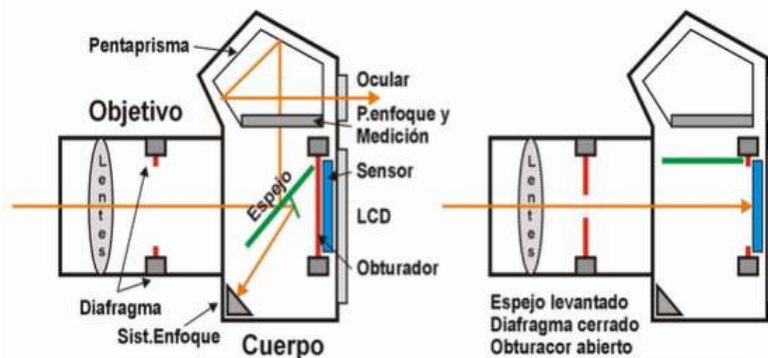


Figura B.1: Esquema de una cámara DSLR en situación normal (izquierda), comparada con la situación de disparo (derecha) (Buchheim, 2007).

B.1.2. Sensor de la Cámara

Una cámara digital utiliza una serie de millones de pequeñas cavidades de luz para grabar una imagen. Cuando presiona el botón del obturador de la cámara y comienza la exposición, cada uno de estos se descubre para recolectar fotones y almacenarlos como una señal eléctrica. Una vez que finaliza la exposición, la cámara cierra cada uno de estas cavidades y luego intenta evaluar cuántos fotones cayeron en cada cavidad midiendo la fuerza de la señal eléctrica. A continuación, las señales se cuantifican como valores digitales, con una precisión determinada por la profundidad de bits. La precisión

resultante puede reducirse de nuevo dependiendo del formato de archivo que se esté grabando (0-255 para un archivo JPEG de 8 bits).

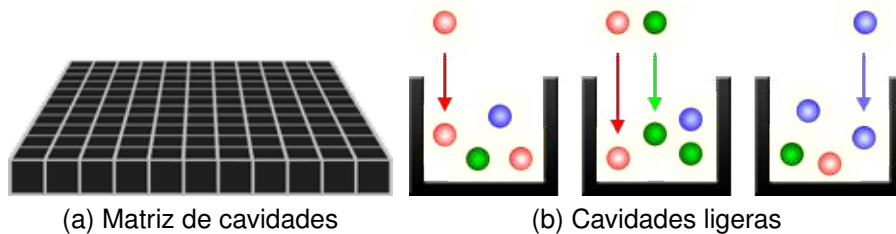


Figura B.2: Vista superior de la matriz del sensor (izquierda) y vista lateral de las cavidades (derecha). Créditos: PixelRajeev Photography.

Sin embargo, la Figura B.2 solo crearía imágenes en escala de grises, ya que estas cavidades no pueden distinguir cuánto tienen de cada color. Para capturar imágenes en color, se debe colocar un filtro sobre cada cavidad que permita solo colores de luz particulares. Prácticamente todas las cámaras digitales actuales solo pueden capturar uno de los tres colores primarios en cada cavidad, por lo que descartan aproximadamente $2/3$ de la luz entrante. Como resultado, la cámara tiene que aproximarse a los otros dos colores primarios para tener todo el color en cada píxel. El tipo más común de matriz de filtros de color se llama matriz de Bayer, que se muestra a continuación en la Figura B.3.

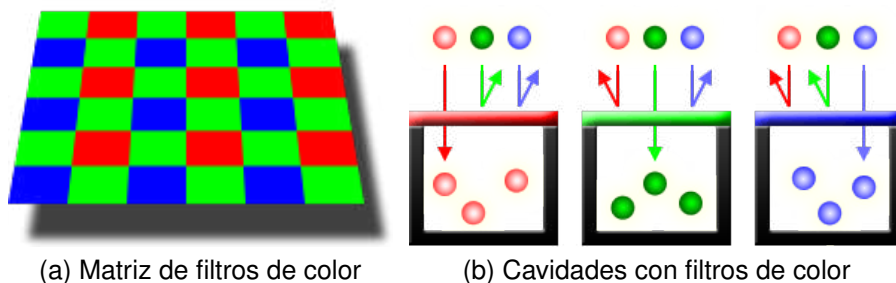


Figura B.3: Vista superior de la matriz Bayer (izquierda) y vista lateral de las cavidades con filtro de color (derecha). Créditos: PixelRajeev Photography

Una matriz de Bayer consta de filas alternas de filtros rojo-verde y verde-azul.

Observe cómo la matriz de Bayer contiene el doble de sensores verdes que rojos o azules. Cada color primario no recibe una fracción igual del área total porque el ojo humano es más sensible a la luz verde que a la luz roja y azul. La redundancia con píxeles verdes produce una imagen que parece menos ruidosa y tiene un detalle más fino de lo que podría lograrse si cada color se tratara por igual.

El corazón de cualquier cámara es el sensor, ya que el sensor dictamina la calidad de las imágenes que puede producir: cuanto más grande es el sensor, mayor es la calidad de la imagen. En la actualidad, los sensores de cámaras se clasifican dos categorías: dispositivos de carga acoplada (CCD) y reproductores de imágenes de semiconductores de óxido metálico complementario (CMOS).

Los sensores CCD traducen las mediciones de píxeles siguiendo una secuencia, utilizando circuitos que rodean al sensor. La desventaja de usar un CCD es que son componentes analógicos que requieren más circuitos electrónicos alrededor del sensor y, como resultado, son más costosos y consumen más energía. Mientras que los sensores CMOS traducen las mediciones de píxeles de forma simultánea, utilizando circuitos desde el propio sensor. Son más comunes en las cámaras DSLR porque son más rápidos y económicas, además de que consumen menos energía.

B.2. Lentes

La capacidad de cambiar las lentes es una ventaja de estas cámaras, que permiten diferentes configuraciones según las necesidades del programa de observación individual. Se prefieren las lentes de distancia focal fija, ya que tienden a tener menos superficies de aire a vidrio y menos distorsiones en comparación con las lentes con zoom. Los elementos de vidrio de alta dispersión, la óptica rápida y los revestimientos antirreflejos son deseables, pero

pueden aumentar considerablemente el costo.

B.3. Trípodes y monturas

Para obtener imágenes de buena calidad es necesario fijar la cámara a algún tipo de soporte; una cámara de mano no proporcionará suficiente estabilidad para tomar imágenes de calidad. Hay varias formas de montar una cámara, siendo un trípode fijo la más sencilla y menos costosa. También es posible montar una cámara equipada con un objetivo en una montura ecuatorial o acoplar una cámara a un telescopio que esté en una montura ecuatorial.

B.3.1. Trípodes o monturas fija

Un trípode consiste un aparato de tres patas y una parte superior circular o triangular, que permite estabilizar un objeto y evitar su movimiento. Ofrece la posibilidad de mantener la cámara fija y apuntando exactamente al mismo lugar en el cielo, sin estar sujeta al movimiento.

B.3.2. Montura ecuatorial

Una montura ecuatorial está diseñada para seguir el movimiento del cielo. Este tipo de montura suele sustituir a la cabeza fija de un trípode. Las monturas ecuatoriales se utilizan a menudo con los telescopios, lo que les permite seguir el movimiento del cielo y seguir el mismo objeto en el espacio durante el transcurso de la noche sin tener que ajustar constantemente el telescopio a mano. También se puede montar una cámara digital u otro instrumento óptico en las monturas ecuatoriales. Las monturas ecuatoriales tienen requisitos adicionales: se necesita una fuente de energía para accionar la montura, y tendrá que alinear la montura con el polo norte o sur para que pueda realizar un seguimiento adecuado. En principio, una montura ecuatorial bien alineada le permite utilizar tiempos de exposición más largos que los de un trípode fijo.

B.4. Filtros y respuesta espectral

B.4.1. Cámara DLSR estándar (sin modificar)

Los filtros Bayer rojo, verde y azul (en realidad, los píxeles RGB) están hechos de pigmentos depositados en la superficie superior de los píxeles del detector de silicio CMOS, y no pueden limpiarse ni eliminarse. Forman varios filtros rojos, verdes y azules que se coloca en la parte superior del sensor. Por tanto, cada píxel es sensible solo a su propio color de luz. Un conjunto de microlentes enfoca la luz que incide en cada píxel hacia la parte más sensible del mismo, mejorando el llenado del píxel hasta un nivel cercano al 100 %. A poca distancia del propio sensor hay una pila de filtros que realizan varias funciones, entre ellas:

- Filtro IR reduce el exceso de sensibilidad a la luz roja e infrarroja.
- Filtro dieléctrico IR elimina la luz infrarroja por encima de 700 nm.
- Filtro dieléctrico UV elimina la luz ultravioleta por debajo de 400 nm.
- Filtro Anti-Moiré reduce el efecto de textura debido a la estructura Bayer (un filtro espacial de paso bajo, reduce ligeramente la resolución, y reduce el problema de submuestreo en la fotometría)

B.4.2. Cámara DLSR Modificadas

Los filtros de muchas cámaras DSLR se pueden retirar por los especialistas. Al hacerlo, aumenta la respuesta al rojo y al infrarrojo cercano (H_α). La eliminación total de algunos filtros es interesante para espectroscopia. Entonces la imagen clásica necesita que las funciones de corte IR y UV sean sustituidas por un filtro externo (estas funciones se eliminan con el filtro IR). Ese filtro externo IR y UV también es necesario para la fotometría V y B (y posiblemente R). La eliminación del filtro IR mejora algo la respuesta G y proporciona una mejora en V con una transformación reducida. No se recomienda modificar DLSR, si no se cuenta con filtros adicionales para la fotometría V.

Apéndice C

Certificación Starlight

La Fundación Starlight es la promotora de este certificado, “mediante el cual se acreditan aquellos espacios que poseen una excelente calidad de cielo y que representan un ejemplo de protección y conservación. Son escenarios que incorporan la observación del firmamento como parte de su patrimonio natural, paisajístico, cultural o científico y fomentan a su vez el “Turismo de las Estrellas”. Este sistema de certificación está respaldado por la UNESCO, la Organización Mundial del Turismo (UNWTO) y la Unión Astronómica Internacional (IAU)”.

La fundación Starlight tiene diferentes modalidades de certificación:

- **Reservas Starlight:** son aquellos espacios naturales protegidos en donde se establece un compromiso por la defensa de la calidad del cielo nocturno y el acceso a la luz de las estrellas. Además, los sitios tienen como función la preservación de la calidad del cielo nocturno y de los diferentes valores asociados, ya sean culturales, científicos, astronómicos, paisajísticos o naturales.
- **Destino Starlight:** son lugares visitables, que gozan de excelentes cualidades para la contemplación de los cielos estrellados y que, al estar protegidos de la contaminación luminosa, son especialmente aptos para desarrollar en ellos actividades turísticas basadas en este recurso natu-

ral.

- **Pueblos/Ciudades Starlight:** la certificación está dirigida a los pequeños pueblos con identidad propia y con carácter principalmente rural, estas pequeñas localidades buscan una economía diversificada a través del desarrollo del turismo astronómico con el fin de promover el crecimiento económico y sostenible del territorio y evitar el declive poblacional.
- **Parques Estelares Starlight:** son infraestructuras ya constituidas, que se encuentran en lugares con un cielo limpio y oscuro; permitiendo desarrollar actividades de divulgación y educativas vinculadas a la contemplación y observación astronómica.
- **Campamentos Starlight:** aquellas instalaciones acreditadas que organizan actividades dirigidas a promover el conocimiento del cielo estrellado como parte de la naturaleza y a experimentar un turismo sostenible, respetuoso con el medio ambiente y proteccionista con el cielo nocturno.

C.1. Procedimiento de certificación

De acuerdo con el Procedimiento establecido para llevar a cabo la Certificación, los pasos que se deben cumplir con los siguientes puntos:

1. El solicitante tiene la facultad legal para representar al sitio susceptible de ser Reserva Starlight.
2. La institución a la que representa se adhiere formalmente a la Declaración Starlight de La Palma y declara su intención de cumplir e impulsar los principios generales de sostenibilidad.
3. El solicitante cumple estrictamente con las condiciones descritas en el procedimiento del Sistema de Certificación Starlight.

C.2. Parque Nacional Bosque Fray Jorge

La Fundación Starlight entregó al Parque Nacional Bosque Fray Jorge la certificación que garantiza un cielo apto para la observación astronómica, sello que solo habían obtenido tres sitios del planeta hasta ese momento: el Parque Nacional de Monfrague (Provincia de Cáceres, España), Lake Tekapo (Nueva Zelanda) y Costa Norte Fuerteventura (Islas Canarias, España). De este modo, el parque en julio del 2013 se convirtió en la primera reserva Starlight de Chile y Sudamérica. Por este motivo que describiremos los parámetros que se necesitan para la certificación en la modalidad reserva:

- **Cielos Despejados (60 %):** Se refiere al porcentaje de noches despejadas en el sitio. Mínimo 60 % de noches despejadas.
- **Oscuridad del cielo ($> 21,4 \text{ mag/arcsec}^2$):** Contempla el grado de perturbación causado por la contaminación lumínica sobre las condiciones naturales de oscuridad de la noche en el emplazamiento. Se establece magnitud astronómica al cenit mínima de 21.4 en el visible (V).
- **Seeing ($\leq 1''$):** Se define como la capacidad de distinguir dos objetos celestes muy cercanos entre sí, tales como estrellas binarias. El límite aceptable para las Reservas Starlight implica que más del 50% de las noches este es mejor que $1''$ en los puntos excelentes de la zona núcleo¹.
- **Trasparencia ($\leq 0,15 \text{ mag}$):** El grado de transparencia de un cielo está en relación con la calidad y características de la atmósfera y su nivel de absorción (extinción). Es un parámetro directamente relacionado con la cantidad de objetos celestes que podemos ver. Un cielo oscuro y transparente estará lleno de estrellas. Se establece el umbral en más del 50% de las noches con una extinción en visible $V < 0,15 \text{ mag}$.

Sin embargo, la certificación debe ser renovada cada dos años, por lo que la dirección regional del Servicio Nacional de Turismo (Sernatur) se propuso

¹Zona núcleo o de exclusión: Es donde se mantienen intactas las condiciones de iluminación natural y nitidez del cielo nocturno.

como objetivo recuperar la calificación internacional del parque y para esto acudió al equipo ULS/OPCC para llevar a cabo la medición de los parámetros que solicita la fundación Starlight. Desde finales del 2019, el equipo de trabajo ULS/OPCC y el Sernatur trabajaban en la preparación para obtener la certificación, pero debido las protestas sociales vividas en Chile y a la pandemia actual. No fue posible programar una visita al parque para la adquisición de datos.

Finalmente, el 10 de enero del 2021 se pudo realizar las mediciones de NSB en el parque. El parámetro que se midió fue el de oscuridad del cielo, los cuales corresponden a los datos de este trabajo de tesis. No obstante, por la situación de la pandemia, no se ha podido medir el resto de los parámetros para la renovación de la certificación, pero gracias a la mediación de la OPCC y teniendo en cuenta la situación global de pandemia ha concedido renovar la certificación del parque, solo suministrando las mediciones de brillo del cielo, es decir, los datos presentados por este proyecto han contribuido a que el parque reciba la certificación. Sin embargo, la fundación ha manifestado que en condiciones de normalidad se deben completar los 4 parámetros. El grupo ULS/OPCC se ha comprometido a realizar las mediciones correspondientes a los otros parámetros faltantes.

Pedro Sanhueza
Juan Pablo Uchima
OPCC/ULS
18 de febrero de 2021

Reporte Brillo del Cielo Nocturno

Parque Nacional y Reserva de la Biosfera Bosque Fray Jorge

Para Certificación como Reserva Starlight

El Parque Nacional y Reserva de la Biosfera Bosque Fray Jorge, cuenta con una certificación Starlight como Reserva. En este reporte se expone la evaluación del brillo del cielo nocturno de esta zona, junto con un análisis de las fuentes de contaminación lumínica del entorno. Esto para conseguir una renovación de la certificación de cielos oscuros otorgada por la Fundación Starlight. Se ha establecido el acuerdo de sólo medir lo relativo a brillo del cielo nocturno en esta oportunidad, para renovar la certificación, dado que las restricciones sanitarias hacen difícil o imposible realizar en estos momentos la medición de los demás parámetros Starlight. Sin embargo, una vez superada la contingencia sanitaria, estas mediciones deberán ser llevadas a cabo.

Los resultados muestran un nivel de oscuridad relevante, de un promedio de 21.98 magnitudes por arco segundo al cuadrado, medido en el acceso norte del parque y en la localidad Peral Ojo de Agua. Se ha usado el medidor de Unihedron, el Sky Quality Meter - SQM L y además se han tomado una serie de imágenes y se ha realizado la correspondiente procesamiento con la Sky Quality Camera -SQC- que opera la OPCC, mostrando una razonable coincidencia en los valores obtenidos, entendiendo que la SQC cubre toda la semi esfera superior y que el SQM es un dispositivo manual que cubre un área de unos 20 grados en el cielo, por lo que las medidas no son totalmente comparables.

Mediciones de Brillo con SQM L

REPORTE BRILLO CIELO NOCTURNO

1

Figura C.1: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página I .

Las mediciones de oscuridad se realizaron primero en el acceso norte del parque, un emplazamiento en altura que permite una visual bastante amplia hacia el sur especialmente y permite evitar el manto de nubes que cubre la zona del bosque relicto, que brinda la permanente humedad que permite conservar este bosque de tipo valdiviano. Se midió en un horario en que no influye la luz de la Luna ni el Sol, entre las 23:13 del día 09 de enero y 01:41 ya del 10 del mismo mes, del año 2021. Luego se midió también en el sector del camping Viento Sur, en las cercanías de la pequeña localidad de Peral Ojo de Agua, entre las 01:22 y 01:34 del 10 de enero de 2021. Este último lugar no cuenta con alumbrado público, por propia decisión de la comunidad, por lo que no fue necesario alejarse de la misma para obtener un cielo oscuro.

Se usaron dos dispositivos SQM L_x, midiendo a 66 grados sobre el horizonte y con un azimut de 225 OS en el caso del acceso a Fray Jorge y de 260 grados OS en el camping. Ambas zonas presentaban una escasa presencia de estrellas brillantes, pareciendo muy oscuras. Se realizaron tres tandas de mediciones en el acceso norte del parque y una en el camping Viento Sur. Cada tanda incluyó entre ocho y diez medidas. En todo los casos se tomaron cinco medidas preliminares, que no se usaron en el informe, sólo para descartar un posible “ruido” electrónico.

Acceso Norte Parque Bosque Fray Jorge	SQM L 2920	SQM L 23237
23:13 - 32:27 09/01/2021	22,013	22,07
23:30 - 23:34 09/01/2021	21,981	22,07
00:35 - 0041 10/01/2021	21,927	21,96
	22,01	22,03

Camping Viento Sur, Peral Ojo de Agua	SQM L 2920	SQM L 23237
01:22 - 01:34	21,927	21,96

Los valores obtenidos en ambos lugares demuestra que el cielo del parque y sus alrededores es muy oscuro, ratificando que se exceden largamente los requerimientos de brillo del cielo nocturno para la categoría Reservas Starlight. A partir de las 02 am se pudo observar un incremento

REPORTE BRILLO CIELO NOCTURNO

2

Figura C.2: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página II.

importante de la humedad, por lo que se detuvieron las mediciones y se retiraron los equipos, para no correr riesgos de dañarlos. Según los operadores de turismo astronómico del camping, se produce un patrón repetitivo en la evolución de la nubosidad a través de la noche. En las primeras horas de la misma, la nubosidad se mantiene por sobre los cerros de la Cordillera de la Costa (bosque relicto) desplazándose de sur a norte, es decir, en paralelo a la costa y por sobre dichos cerros, sin incidir en la zona interna (secano) del parque. Luego, después de las 2 o 3 am, la nubosidad empieza a avanzar hacia el este, cubriendo el sector del secano. El inicio del incremento de la humedad que se pudo confirmar a eso de las 2 am en nuestra campaña de mediciones, va en la misma línea del patrón sugerido, respecto de la dinámica de las nubes. Es, al parecer, una zona en donde la nubosidad es muy dinámica, aunque siguiendo el patrón aquí comentado.

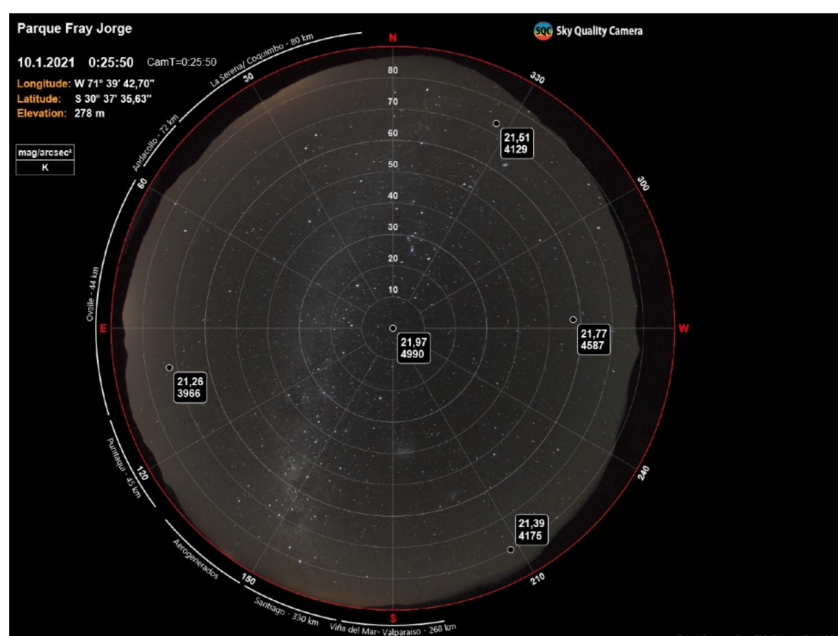
Registro de la Semi Esfera Superior con SQC

El registro de todo el cielo nocturno se ha realizado con la SQC, desde el acceso norte del parque. No se midió desde el camping. Un elemento novedoso y de riesgo ambiental y en cierta medida también para la calidad del ambiente nocturno que se pudo detectar a simple vista fueron los destellos de las luces de advertencia para la aero navegación, instaladas en la parte superior de los aerogeneradores del proyecto Talinay, al sur del parque. Pese a estar ubicados en el otro extremo del parque, son plenamente visibles desde el extremo norte del mismo. Se trata de luces blancas con un destello intermitente, muy notorias en medio de la oscuridad del lugar. Estas luces son ilegales al utilizar el blanco. La Norma Lumínica señala solo la opción con color rojo. Es posible que estos destellos hayan influido en las mediciones con los SQM L y también con la SQC.

Respecto de las medidas de brillo del cielo nocturno, es posible apreciar valores de oscuridad similares, en cierta medida, a los obtenidos con los SQM L. Se puede confirmar la oscuridad del lugar, cumpliendo largamente los requisitos Starlight en este apartado.

Figura C.3: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página III.

Respecto de las fuentes contaminantes que rodean el lugar; estas se encuentran hacia el nor este (La Serena - Coquimbo), y este (Ovalle) y también es posible detectar la Zona Metropolitana (Santiago) y hacia el sur las principales ciudades de la Región de Valparaíso (Viña del Mar y Valparaíso). Sin embargo, en la ubicación de estas últimas dos ciudades (conurbación) se encuentran emplazados los aerogeneradores del proyecto Talinay, por lo que las señales lumínicas de estas ciudades debieran tener un agregado de luz producto de los destellos de estas molinos, con unos 100 metros de alto. La única forma de separar los aportes consistiría en medir en similares condiciones, aunque con las lámparas de los molinos apagadas. Se asume que una vez que las lámparas de Talinay sean reemplazadas, por luces rojas, el aporte contaminante bajaría drásticamente, al contar con una fuente sin azul, es decir, con un efecto de dispersión atmosférica muy reducido comparativamente.

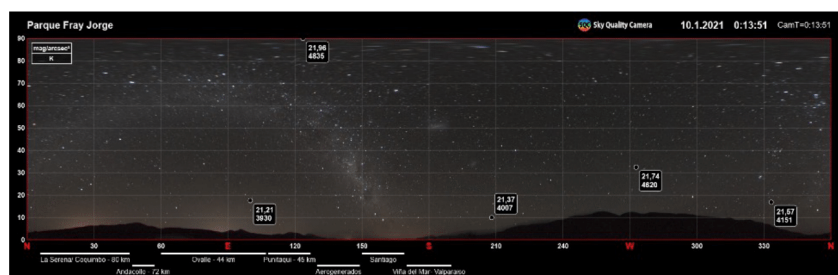


REPORTE BRILLO CIELO NOCTURNO

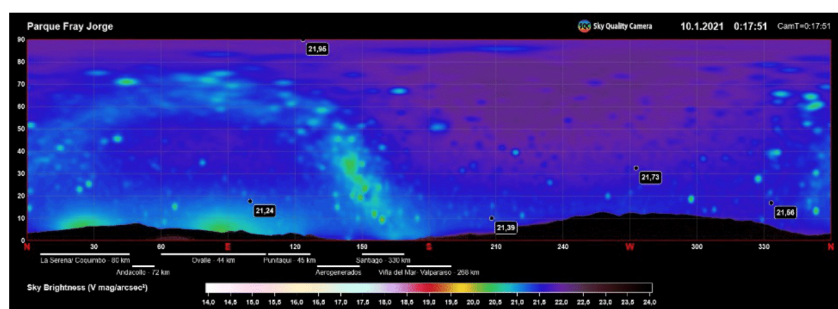
4

Figura C.4: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página IV.

Imagen azimutal de todo el cielo con la SQC desde acceso norte del Parque Bosque Fray Jorge, incluyendo algunas medidas de brillo del cielo nocturno, en diversas ubicaciones. En el horizonte, al NE, E y SE se pueden observar los aportes de contaminación lumínica de las principales ciudades del entorno. La Zona Metropolitana (Santiago) es también detectada.



En esta proyección cilíndrica se percibe mejor la vista de los cerros y las fuentes de contaminación lumínica de la zona. El sector de secano del parque está ubicado en una depresión entre un cordón cordillerano hacia el este y la Cordillera de la Costa. Las fuentes de contaminación lumínica no son percibidas directamente en este sector del parque.



REPORTE BRILLO CIELO NOCTURNO

5

Figura C.5: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página V.

En esta otra proyección cilíndrica, se muestra el mapa de brillo del cielo nocturno por regiones del cielo, en magnitudes astronómicas, y se puede visualizar los aportes contaminantes de las ciudades de La Serena/Coquimbo, Ovalle y, a lo lejos, Santiago. También es posible ver, en violeta, la zona más oscura del cielo. La Vía Láctea y las estrellas principales están incluidas en la imagen.

Conclusiones

Se ha podido ratificar la marcada oscuridad del parque nacional Bosque Fray Jorge, lo mismo en la cercana localidad del Peral Ojo de Agua, con valores cercanos a las 22 magnitudes arco segundo al cuadrado. Estos son valores propios de sitios de observación astronómica profesional, valor 0 en la escala de Bortle, permitiendo el desempeño correcto de las funciones ecológicas nocturnas en la zona y brindando condiciones excelentes para la promoción del turismo astronómico responsable. Sin embargo, hacia el sur del parque, la situación se ha desmejorado al instalarse el parque eólico Talinay con potentes luces blancas e intermitentes. Como se expresó, esta iluminación es ilegal y debe ser reemplazada por fuentes rojas (en coordenadas tricromática definidas en DS043/2012 MMA) lo que mitigaría drásticamente su impacto.

Cabe destacar la preocupación ambiental que exhiben los habitantes de la localidad del Peral Ojo de Agua, al no permitir la instalación de alumbrado público y contar solo con mínimas fuentes de luz exterior. Al punto que se pueden realizar mediciones de brillo del cielo nocturno desde el mismo camping o virtualmente desde cualquier emplazamiento en la misma localidad, sin afectar la oscuridad de las mediciones. Por ello, las actividades de turismo astronómico están por ahora garantizadas en la zona.

Resulta preocupante las posibles instalaciones de nuevos parques eólicos en la zona costera, incluyendo las cercanías de esta localidad. Esto de seguro comprometería la calidad del cielo nocturno del Peral Ojo de Agua y por extensión es posible que también afecte al parque nacional.

Figura C.6: Informe de las mediciones de brillo en el Parque Fray Jorge, página VI.

Apéndice D

Escala de Bortle

El astrónomo John E. Bortle construyó una escala basada en los objetos que pueden ser observados en función de la calidad del cielo (Figura D.1), así como el límite de magnitud de las estrellas observables una vez la vista se acostumbra a la oscuridad. Bortle (2001) clasificó la contaminación lumínica de forma visual y no cuantitativa descritas a continuación:

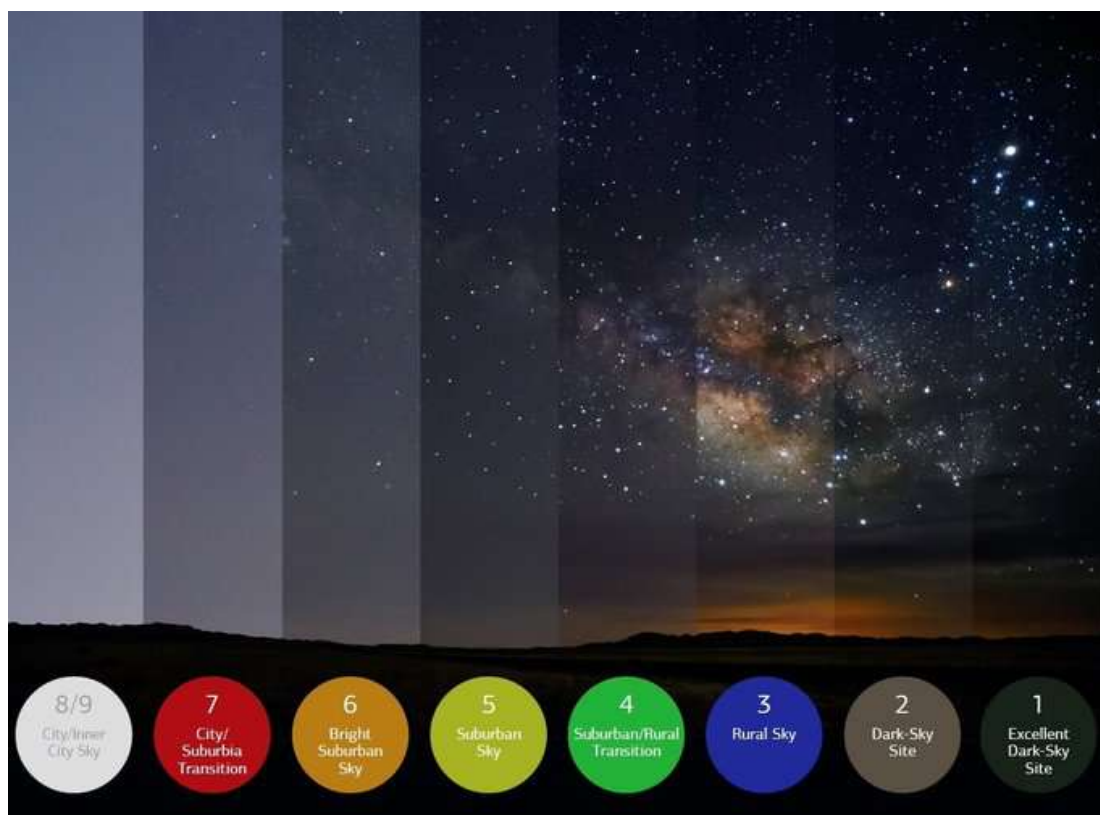


Figura D.1: Escala de Bortle. Créditos: Gloria García-Cuadrado.

- **Clase 1 (Cielo Oscuro Excelente:)** en estos lugares es visible la luz zodiacal, los objetos fuera de la Tierra (e.g, planetas, galaxias) y las estrellas visibles a simple vista van de un rango de 7.6 mag hasta 8.0 mag.
- **Clase 2 (Cielo Oscuro Típico:)** El brillo atmosférico es difícil de ver en el horizonte, y la luz zodiacal proyecta una clara sombra al amanecer y al atardecer. El rango visual es de 7.1 mag hasta 7.5 mag.
- **Clase 3 (Cielo Rural:)** El horizonte es definitivamente más brillante que el zenit, y las nubes en el horizonte pueden estar ligeramente resaltadas. El rango visual es de 6.6 mag hasta 7.0 mag.
- **Clase 4 (Cielo entre Rural y Periurbano:)** Sobre el horizonte, es visible el resplandor procedente de los alrededores. La Vía Láctea es visible, pero sin una estructura clara. El rango visual es de 6.1 mag hasta 6.5 mag.
- **Clase 5 (Cielo Periurbano:)** La Vía Láctea es visible débilmente. El rango visual de las estrellas más débiles es de 5.6-6.0 mag.
- **Clase 6 (Cielo Periurbano Brillante:)** La luz zodiacal es invisible, y la Vía Láctea solo es parcialmente visible cerca del zenit. El rango visual es de 5.1 mag hasta 5.5 mag.
- **Clase 7 (Cielo entre Periurbano y Urbano:)** Todo el cielo es de tonalidad blanco-grisácea. Las fuentes de luz fuertes son evidentes en todas las direcciones. El rango visual es de 4.6 mag hasta 5.0 mag.
- **Clase 8 (Cielo Urbano:)** El cielo brilla de color blanco o naranja. La mayoría de las constelaciones son irreconocibles. El rango visual es de 4.1 hasta 4.5 mag.
- **Clase 9 (Cielo Dentro de la Ciudad:)** Todo el cielo está muy iluminado, incluso en el zenit. De los objetos celestes, en realidad solo son visibles la luna, los planetas y las estrellas más brillantes. En el mejor de los casos, se puede observar estrellas hasta 4.0 mag.

Apéndice E

Vinculación con el medio

Debido a la importancia y relevancia del proyecto para la región Coquimbo desde un inicio se planteó la opción de dar conocer e informar que es la contaminación lumínica, ya que la región que se caracteriza por sus cielos oscuros, es importante mencionar que desde algunos años atrás el astroturismo se ha convertido en parte de la economía regional. Por esta razón decidimos que debíamos realizar actividades como charlas y talleres para dar a conocer este fenómeno. Sin embargo, la pandemia actual del coronavirus trajo una época de confinamiento que nadie se esperaba y con ello una nueva forma de vivir donde todas las actividades académicas se realizan de forma remota. Es por esta razón que todas las actividades que se realizaron fueron por medio de plataformas digitales.

El primer espacio donde fui invitado a participar fue ASTROSERENA¹. En este espacio fui el primer estudiante de posgrado de la Universidad de La Serena (ULS) en ser el conferencista principal con una charla denominada: *¡A cuidar los cielos! Contaminación Lumínica en la región estrella*². Días después y como parte del proyecto de virtualidad del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira³ en Colombia fui invitado a participar en su primer ciclo de conferencias “Explorando el universo en casa” donde en

¹<http://astroserena.weebly.com/>

²https://www.youtube.com/watch?v=hcnuca0LbzE&ab_channel=UserenaOficial

³<https://observatorioastronomico.utp.edu.co/>

este caso hable de contaminación lumínica, resaltando la importancia de los cielos como patrimonio de todos, su título fue: *¿Por qué no podemos ver las estrellas desde la ciudad? El cielo como patrimonio natural que debemos cuidar*⁴.



Figura E.1: Folleto de publicidad para la charla en ASTROSERENA.

Seguidamente, tuve la oportunidad de participar en IluminaconCiencia⁵ una campaña de la ULS, la OPCC y el Hospital San Juan de Dios de La Serena. Esta campaña buscaba crear conciencia sobre la contaminación lumínica y sus efectos en diversas áreas como la salud, el medio ambiente, la economía y la astronomía. En esta ocasión hablé sobre como por medio de una aplicación (*Loss of the Night*⁶) de nuestros teléfonos móviles podíamos participar en campañas de ciencia ciudadana sobre contaminación lumínica. El vídeo de la campaña se convirtió en tutorial en español de como usar y registrar los datos en la aplicación, en la Figura E.2 se observa un pantallazo del blog del proyecto donde resaltan el vídeo. Finalmente, 5 de mayo del 2021 participé sobre contaminación lumínica para el curso de Astronomía General del Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio (ICATE), Argentina.

⁴https://youtu.be/74zqVADPLtE?list=PL-pxmgJeqluI9taD_NWObCawiz98N4IEX

⁵<http://www.userena.cl/coronavirus/iluminaconciencia.html>

⁶<http://lossofthenight.blogspot.com/>

Loss of the Night citizen science project

Friday, October 9, 2020

Spanish language instructional video for the Loss of the Night app

Juan Pablo Uchima from the University of La Serena, Chile, created an instructional video for using the Loss of the Night app. Check it out!



Thanks so much for creating this Juan!

If anyone is inspired to do the same for another language, be sure to let us know!

Posted by Christopher Kyba at 7:52 AM

Labels: [instructions](#)

Translate this blog!

Seleziona lingua

Powered by Google Traduttore

Blog Archive

▼ 2020 (9)

► December (1)

▼ October (1)

Spanish language instructional video for the Loss ...

► September (1)

► July (1)

► June (3)

► March (1)

► February (1)

► 2019 (11)

► 2018 (7)

► 2017 (12)

► 2016 (14)

► 2015 (33)

► 2014 (52)

► 2013 (32)

Popular Posts

[Brief introduction to the Loss of the Night app project](#)

The Loss of the Night app allows citizen scientists to estimate how many stars they can see, and by extension how bright the night sky is. T...

Figura E.2: Pantallazo de la página del proyecto Loss of the Night donde se resalta la versión en español realizada por mí.