



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Medioambiente  
Ingeniería Ambiental**

**Propuesta de reducción de la contaminación lumínica en la comuna de San Pedro de  
Atacama en la región de Antofagasta a través de la aplicación de los modelos  
matemáticos recomendados por el SEA para el recambio de luminarias**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
AMBIENTAL**

**AUTOR: BENJAMÍN BUSTOS  
PROFESOR GUÍA: JOAO CERQUEIRA**

**VALPARAÍSO, 2025**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi familia: mi padre Rene Bustos, mi madre Rosa Chaparro y mis Hermanos Maximiliano Bustos y Sebastián Bustos, quienes me han apoyado durante mi vida, ayudando a mi formación como persona. Gracias por brindar su ayuda en momentos en donde me encontraba perdido y quería rendirme, sus palabras me han ayudado en seguir adelante y poder creer que puedo superar las dificultades con las que me he encontrado durante mi trayectoria tanto como estudiante como de vida.

Agradezco a mi profesor guía Joao Cerqueira por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este trabajo, su ayuda permitió que este trabajo se mantuviera enfocado en los objetivos que se querían alcanzar. También quiero dar gracias al profesor Matías Quezada quien me ayudó en llegar a la selección de este trabajo, además de ayudarme en las dificultades que se presentaron en este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos quienes me han ayudado durante distintas partes de mi vida, por poder compartir con ellos, tener buenos momentos y por ayudarme en momentos de dificultad.

## RESUMEN

La contaminación lumínica, generada por el uso inadecuado de luz artificial, afecta negativamente la salud humana, los ecosistemas y la calidad del cielo nocturno. Este fenómeno ha aumentado con el paso del tiempo y la necesidad de la generación de luz para los distintos usos que la población requiere. Esto ha llevado por el poco interés de los efectos negativos de la luz artificial a intensificar el brillo del cielo (skyglow). Una respuesta a esta problemática es el presente trabajo, en que se propone un recambio de luminarias en las comunas San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, aplicando modelos matemáticos recomendados por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) para evaluar y mitigar la contaminación lumínica.

El estudio utiliza dos modelos: Skyglow Simulator e Illumina. Skyglow modela la dispersión de la luz artificial considerando factores como geometría, condiciones atmosféricas y tipo de luminaria. Por su parte, Illumina se basa en la transferencia radiativa y utiliza información satelital y geoespacial, permitiendo simulaciones realistas del brillo nocturno en distintas longitudes de onda.

Con la información que se recabó junto a los resultados obtenidos a través del modelo seleccionado durante este estudio, se propone un recambio de luminarias que tiene una reducción en la contaminación lumínica generada por el alumbrado público a través de su radiancia, así mejorando la calidad de cielo nocturno, considerando los gastos iniciales por un monto de 158.191.566 CLP y operacionales por un monto de 9.277.193.107 CLP, necesarios para su implementación dentro de la comuna.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ii
Acrónimos .....	iv
1 Introducción .....	1
1.1 Contaminación lumínica .....	1
1.2 Efectos de la contaminación lumínica .....	2
1.2.1 <i>Calidad de los cielos</i> .....	2
1.2.2 <i>Salud</i> .....	2
1.2.3 <i>Ecosistemas</i> .....	3
1.3 Estimación de contaminación lumínica con la modelación matemática .....	5
2 Problema .....	6
3 Objetivos .....	7
3.1 Objetivo General .....	7
3.2 Objetivos Específicos .....	7
4 Revisión Bibliográfica .....	8
4.1 Software de modelación .....	8
4.1.1 <i>Modelo Skyglow Simulator</i> .....	8
4.1.2 <i>Modelo Illumina</i> .....	9
4.2 Estudio de imágenes satelitales .....	9
4.3 Luminarias .....	11
4.4 Área de estudio .....	13
4.5 Normativa aplicable .....	14
4.6 Evaluación de proyectos .....	15
5 Metodología .....	16
5.1 Revisión de los modelos recomendados por el SEA .....	17
5.2 Recopilación de los datos del área de estudio .....	17
5.3 Aplicación de los modelos recomendados por el SEA .....	17
5.4 Selección del modelo a utilizar para el Recambio .....	17

5.5	Revisión de las distintas luminarias disponibles en el mercado .....	17
5.6	Aplicación del modelo con el recambio de las luminarias seleccionadas .....	18
5.7	Evaluación económica del recambio de luminarias .....	18
6	Resultados .....	19
6.1	Revisión de los modelos recomendados por el SEA .....	19
6.1.1	<i>Modelo Skyglow</i> .....	19
6.1.2	<i>Modelo Ilumina</i> .....	26
6.2	Selección del modelo a aplicar en el área de estudio .....	35
6.2.1	Información del área de estudio .....	35
6.2.2	Aplicación de los modelos recomendados por el SEA .....	39
6.2.3	Selección del modelo a utilizar para el recambio .....	44
6.3	Proponer un recambio de luminarias que permita reducir la contaminación lumínica, evaluada a través del modelo seleccionado .....	44
6.3.1	Revisión de las distintas luminarias disponibles en el mercado .....	44
6.3.2	Aplicación del modelo con el recambio de las luminarias seleccionadas ...	45
6.4	Evaluación económica del recambio de luminarias .....	49
6.4.1	Inversión de capital (CAPEX) .....	49
6.4.2	Costos Operacionales (OPEX) .....	50
7	Discusión .....	52
7.1	Revisión de los modelos recomendados por el SEA .....	52
7.2	Recopilación de los datos del área de estudio .....	53
7.3	Proponer un recambio de luminarias que permita reducir la contaminación lumínica, evaluada a través del modelo seleccionado .....	54
7.4	Evaluación económica del recambio de luminarias .....	55
8	Conclusión .....	56
9	Referencias Bibliográficas .....	57
10	Anexos .....	63
10.1	Anexo: Resultados de modelaciones de Luces LED no seleccionadas .....	63

10.2 Anexo: Resultados de modelación del aumento de contaminación lumínica en base a la expansión de San Pedro de Atacama .....	67
10.3 Anexo: Mapa para el cálculo de metros lineales de San Pedro de Atacama .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comunas consideradas áreas astronómicas (adaptado de SEA, 2023) .....	15
Tabla 3	Resultados obtenidos de Illumina. ....	42
Tabla 5	Información de luminarias comunes de exterior. ....	45
Tabla 6	Modelación, a través de Illumina, de luces de sodio a alta presión en cielo claro. ....	46
Tabla 7	Modelación, a través de Illumina, de luces de sodio a alta presión en cielo nublado. ....	46
Tabla 8	Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 1800K en cielo claro. ....	47
Tabla 9	Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 1800K en cielo nublado. .	47
Tabla 10	Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 2200K en cielo claro. ....	48
Tabla 11	Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 2200K en cielo nublado.	48
Tabla 12	A. Resultado modelación Luces LED 3000K Cielo Claro. ....	63
Tabla 13	A. Resultados modelación luces LED 3000K cielo nublado. ....	64
Tabla 14	A. Resultados modelación luces LED 4000K cielo claro. ....	64
Tabla 15	A. Resultados modelación luces LED 4000K cielo nublado. ....	65
Tabla 16	A. Resultados modelación luces LED ambar 2700K cielo claro. ....	65
Tabla 17	A. Resultados modelación luces LED ambar 2700K cielo nublado. ....	66
Tabla 18	A. Resultados modelación de Expansión (Km) vs Radiancia ( $W/sr \cdot m^2$ ) . ....	67
Tabla 19	A. Resultados modelación de Expansión (Km) vs Brillo del cielo .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ejemplo de los efectos de la luz artificial en comportamiento de tortugas (Chepesiuk, 2009).....	4
Figura 2 Mapa mundial de brillo del cielo (Falchi <i>et al.</i> , 2016).....	10
Figura 3 Diferentes efectos del apantallamiento de alumbrados públicos en la contaminación lumínica (Chepesiuk, 2009).....	12
Figura 4 Diagrama de flujo del trabajo propuesto.....	16
Figura 5 Representación geométrica del funcionamiento del modelo Skyglow (Kinzey <i>et al.</i> , 2017).....	19
Figura 6 Conversión de KML a XML con software Skyglow.....	22
Figura 7 Pestaña de emisión total.....	22
Figura 8 Pestaña de dependencia angular.....	23
Figura 9 Pestaña de nubes.....	23
Figura 10 Pestaña de aerosoles.....	24
Figura 11 Resultado en gráfico polar con vista desde el cielo.....	25
Figura 12 Resultado en gráfico polar con vista del observador.....	26
Figura 13 Representación Geométrica del modelo Illumina (Kinzey <i>et al.</i> , 2017).....	27
Figura 14 Formato de zona circular uniforme superpuesta. (Aubé <i>et al.</i> ,2022).....	31
Figura 15 Formato para inventario de fuentes de luz discreta (Aubé <i>et al.</i> , 2022)....	32
Figura 16 Formato parámetros de entrada (adaptado de Aubé <i>et al.</i> , 2022).....	33
Figura 17 Localización de los Observatorios y el mega proyecto INNA (ESO, 2025) ...	37
Figura 18 Parque Astronómico Atacama (ANID, 2016).....	39
Figura 19 Área de estudio a modelar.....	40
Figura 20 Gráfico Polar desde el punto de vista del observador.....	41
Figura 21 Dominio del área de estudio creado por Illumina.....	43
Figura 22 Golonlite IP66.....	50
Figura 23 A. Gráfico Expansión vs Radiancia total.....	68
Figura 24 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 485 nm.....	69
Figura 25 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 515 nm.....	69

Figura 26 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 545 nm. ....	70
Figura 27 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 575 nm. ....	70
Figura 28 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 605 nm. ....	71
Figura 29 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 635 nm. ....	71
Figura 30 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 665 nm. ....	72
Figura 31 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 695 nm. ....	72
Figura 32 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 725 nm. ....	73
Figura 33 A. Superposición del plano regulador en Google Earth. ....	74

## **Acrónimos**

HPS: Sodio a alta presión.

LED: Diodo emisor de luz.

LPS: Sodio a baja presión.

SEA: Servicio de evaluación ambiental.

VIIRS: Radiómetro de imágenes infrarrojas visibles.

SPD: Difusión de poder espectral.

SRTM: Misión Topográfica Radar Shuttle.

USD: Dólar de Estados Unidos.

CLP: Peso Chileno.

# 1 Introducción

Uno de los grandes descubrimientos de la sociedad fue el poder generar luz artificial, lo que llevó a un cambio en cómo las personas podían realizar sus actividades sin encontrarse restringidas por la luz natural o el utilizar lugares que tenían una falta de dicha luz. Pero, al mismo tiempo, esto generó una problemática que derivó de la sobreutilización de la tecnología, la que por mucho tiempo se realizó con el mínimo esfuerzo en su instalación, teniendo un efecto en el problema que es la pérdida de la calidad del cielo nocturno, la cual ha llegado a afectar en alguna forma a la gran mayoría de la población mundial (Bara y Falchi, 2023).

## 1.1 Contaminación lumínica

La contaminación lumínica se genera a través del uso inadecuado de la luminosidad artificial, la que se define, según en SEA 2024 , como “toda luz que proviene de los alumbrados exteriores, empleados en áreas públicas, instalaciones mineras, de infraestructura, energéticas, industriales, obras de transporte, recintos deportivos, instalaciones publicitarias, entre otras”. La luminosidad artificial, cuando no se dirige correctamente al punto que se desea iluminar, se dispersa hacia el cielo, lo que junto a sus características (nivel de iluminación y color) aumenta el brillo del cielo.

El brillo natural se debe a los distintos cuerpos celestiales que se encuentran, como son las diferentes constelaciones, la Vía Láctea y, principalmente, el brillo natural de la Luna. Esta luminiscencia se considera de un valor de 22 magnitud/arco segundo<sup>2</sup>, o lo que equivale a  $1,7 \times 10^{-4}$  candela/m<sup>2</sup> (Falchi *et al.*, 2016). El cual se ha perdido en muchos lugares a nivel mundial debido a la luminosidad artificial, al generar más luz que la requerida o al encontrarse en una posición que reduce su efectividad. Alrededor del 80 % de la luz emitida es absorbida por la superficie, la cual es el objetivo de la luminaria, pero el 20 % restante se libera hacia la atmósfera, generando un efecto de brillo en el cielo (skyglow), que ha tendido a la pérdida de los cielos nocturnos, llevando a ciertos lugares a encontrarse en un crepúsculo artificial (Bara y Falchi, 2023).

## **1.2 Efectos de la contaminación lumínica**

Cuando la contaminación lumínica ocurre, se pueden observar distintos efectos que afectan de múltiples maneras. Estos efectos han sido estudiados durante las últimas décadas, dividiéndose en tres grandes grupos que se detallan a continuación.

### *1.2.1 Calidad de los cielos*

A medida que la luz artificial se dispersa en el ambiente, la luminosidad del cielo aumenta, generando un efecto de brillo nocturno, el cual altera la capacidad de poder observar el cielo nocturno en su estado natural, lo que no solo afecta a la observación astronómica, sino también a la capacidad de la sociedad de poder admirar la noche (Falchi *et al.*, 2016).

Esta pérdida de la calidad de los cielos no está presente en puntos específicos del planeta; se encuentra a lo largo de este, con estudios que muestran que alrededor del 80 % del planeta vive con algún grado de contaminación lumínica en sus cielos (Bara y Falchi, 2023).

La pérdida de la calidad del cielo es un problema que ha ido en aumento debido a la búsqueda de una mejor eficiencia en cuanto al uso de la luz artificial, pero esto llevó a un aumento del uso de luces LED que, a diferencia de las luces antiguas de sodio (HPS), han incrementado la contaminación de los cielos debido a que las luces LED, al ser blancas, emiten un mayor espectro de luz visible, principalmente luz azul, que es hasta 2,5 veces más contaminante que las luces de sodio (Falchi *et al.*, 2016).

### *1.2.2 Salud*

Durante el último siglo, las personas se han encontrado en constante contacto con la luz artificial, la que ha sido utilizada para alargar las actividades hacia la noche en distintos casos, como el trabajo o el socializar. Pero se han observado efectos en la salud de la población, los cuales tienen posibles conexiones con la exposición a la luz artificial. Uno de los efectos principales, y el cual tiene grandes ramificaciones en el ser humano, son los cambios en el ritmo circadiano, debido a que el ciclo del sueño se ve afectado por la luz artificial en sus distintas formas. Estudios históricos han mostrado que las personas, en

tiempos anteriores a la luz artificial, tenían patrones de sueño distintos a los de hoy en día. El ciclo de sueño común de las personas es monofásico actualmente, pero anteriormente este ciclo era bifásico; es decir, dos periodos de sueño con un periodo de vigilia entre medio. Sin embargo, la luz artificial llevó a un cambio en la estructura del sueño en el ser humano, donde se busca estar despierto por más tiempo y se condensó el dormir en un solo periodo más corto (Aulsebrook *et al.*, 2018).

Este cambio se evidencia por una inhibición en la producción de melatonina, lo que, a su vez, puede reflejarse en problemas para conciliar el sueño, trastornos metabólicos y de reacción (Falchi *et al.*, 2011). Al mismo tiempo, la melatonina es un compuesto que ayuda a prevenir distintos tipos de cáncer y al encontrarse inhibida por la luz artificial, puede aumentar el riesgo de desarrollar esta enfermedad. Estudios realizados por el National Cancer Institute en 2006, como se describe en Chepesiuk (2009), con datos de turnos nocturnos de enfermeras, mostraron que aquellas que tenían turnos nocturnos tres veces por mes durante 15 años tenían un 35 % más de posibilidades de desarrollar cáncer colorrectal. Chepesiuk (2009) utilizó fotografías satelitales en Israel, las que superpuso con un mapa de la distribución del cáncer de mama, mostrando una correlación: en áreas donde las mujeres viven expuestas a una cantidad de luz suficiente como para leer un libro por la noche, hay un aumento del 73 % en las posibilidades de desarrollar esta enfermedad.

### *1.2.3 Ecosistemas*

Las personas no son las únicas que muestran efectos negativos cuando se encuentran expuestas a la luz artificial; flora y fauna que han sido expuestas a la luminaria también han mostrado reacciones a esta. El efecto principal en la mayoría de la fauna diurna es el cambio en los ciclos de sueño, en Rich & Longcore (2006) se ha observado en especies de aves cantoras, que se encuentran expuestas a la luz artificial, cambios en su actividad durante la noche. Stenvers *et al.* (2016) realizaron estudios en ratones que demostraron cambios en cómo distribuyen sus horas de sueño en el día, llevándolas hacia la noche, lo que tendría consecuencias en la competencia dentro del ecosistema. También se observó

en palomas (*Columba livia*) que son expuestas a luz artificial en ciclos de mayor frecuencia (12:12 a 3:3, día:noche) tienden a ajustar su ciclo de sueño a las horas de día/noche del ciclo a que se encuentran expuestas (Rattenborg *et al.*, 2005)

Pero la luz artificial no solo tiene efectos en el ciclo de sueño de la fauna, ya que se ha visto en diferentes estudios que también afecta el comportamiento de las especies. Esta fauna se ve alterada por la luz artificial en la búsqueda de alimentos o en las zonas de apareamiento. Un ejemplo de esto son las tortugas marinas, que al salir de los huevos, su instinto es moverse hacia el mar, alejándose de la oscuridad en tierra; pero debido a la luz artificial, las tortugas recién nacidas evitan ir hacia el mar, buscando acercarse a la fuente de luz artificial como se muestra en la Figura 1. Este efecto también se ha observado en tortugas adultas, que evitan poner huevos en playas iluminadas, y en ranas, donde se ha detectado una inhibición del apareamiento por una disminución de sus cantos (Chepesiuk, 2009).



Figura 1 Ejemplo de los efectos de la luz artificial en comportamiento de tortugas (Chepesiuk, 2009)

### **1.3 Estimación de contaminación lumínica con la modelación matemática**

La estimación de la contaminación lumínica a través del uso de modelos matemáticos ha tenido una evolución en las décadas desde los inicios de su uso, implementando enfoques físicos, empíricos y computacionales. Esta búsqueda por conocer o cuantificar la contaminación lumínica tuvo sus inicios en la década de 1970, con la utilización de modelos empíricos, los que establecían relaciones entre la intensidad de la contaminación y la población o la distancia entre luces. No fue hasta 1984 que se creó el primer modelo que incorporaba variables físicas para modelar el comportamiento de la luz artificial cuando se dispersa en el ambiente, lo que permitió a Cizano *et al.* (2001) la creación del primer atlas mundial de la contaminación lumínica, el cual ofreció una primera perspectiva del impacto de la contaminación lumínica en los cielos nocturnos.

A medida que la información y las tecnologías fueron mejorando, esto permitió que las estimaciones se volvieran más eficientes, dando paso a diferentes opciones en la predicción de la contaminación lumínica, además de contar con información que permitiera validar el uso de estas.

## 2 Problema

La contaminación lumínica muestra ser un problema que fácilmente se ve ignorado por la sociedad. El mal uso de la luz artificial genera efectos negativos en la salud de la población, los ecosistemas y la calidad de los cielos nocturnos. Se ha intentado avanzar en poder mitigar estos efectos con distintas técnicas, como utilizar escudos, además de formas para evitar que la luz artificial vaya directamente hacia arriba, y también evitar la sobreiluminación, así solo se utiliza la cantidad de luz necesaria para el objetivo que se propuso en ese caso. Junto a estas técnicas, también se han propuesto normativas para ayudar a la mitigación; un ejemplo en Chile fue en 2023 a través del Decreto Supremo N° 2, donde se declararon las comunas en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo como “áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica”.

Pero aun así, en Chile, en los últimos años los efectos de la luz artificial se han mantenido debido a las necesidades de la población, así como a la poca significancia que se le ha dado a este tipo de contaminación. Esto se debe a la búsqueda de la eficiencia energética, que a su mismo tiempo tiene una mayor influencia en la contaminación de los cielos nocturnos, sin que se realice un análisis sobre los efectos que las luminarias a utilizar tienen sobre la contaminación.

Las herramientas que se han generado con el avance de la tecnología nos permite una proyección de la contaminación (o su reducción), como es el caso de los modelos matemáticos, pero no hay una claridad en la facilidad de uso y/o claridad de los resultados obtenidos por ellos.

## **3 Objetivos**

### **3.1 Objetivo General**

Proponer el cambio de luminarias en comunas de la región de Antofagasta, mediante la aplicación de los modelos matemáticos recomendados por el SEA, para reducir la contaminación lumínica.

### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar los modelos recomendados por el SEA
2. Seleccionar el modelo matemático más adecuado, entre los recomendados por el SEA, mediante su aplicación en el área de estudio.
3. Proponer un recambio de luminarias que permita reducir la contaminación lumínica, evaluada a través del modelo seleccionado.
4. Evaluar económicamente la propuesta de recambio de luminarias.

## 4 Revisión Bibliográfica

### 4.1 *Software de modelación*

Este estudio se enfoca en los modelos matemáticos recomendados por el SEIA en su "Guía de criterios de evaluación para determinar la susceptibilidad de afectar áreas astronómicas" (SEA, 2024). En esta guía se mencionan dos programas de modelación, que corresponden a Skyglow e Illumina, los cuales se analizarán brevemente a continuación.

#### 4.1.1 *Modelo Skyglow Simulator*

El modelo matemático Skyglow Simulator<sup>1</sup> es una herramienta que permite el modelamiento del brillo del cielo nocturno producido por las emisiones de una instalación de alumbrado artificial, considerando diferentes condiciones atmosféricas y los posibles cambios que puede tener el cielo, además de la presencia de aerosoles, la geometría urbana que se quiere simular, la emisión total de luz y la fracción de esta que se emite al cielo. Los cálculos se realizan en un área seleccionada en un mapa creado por el usuario, y los resultados obtenidos son determinados desde el punto de vista del observador.

Este software fue desarrollado por el físico eslovaco Miroslav Kocifaj (Kocifaj, 2007). En sus inicios el modelo utilizaba simulaciones de dispersiones simples, pero con el tiempo se alcanzó una dispersión de quinto orden. El modelo fue validado mediante comparaciones entre la teoría y la experimentación (Kocifaj, 2014), utilizando la ciudad de Frýdek-Místek en República Checa.

---

<sup>1</sup> <https://skyglow.sav.sk/>

#### 4.1.2 Modelo Illumina

Illumina<sup>2</sup> es un modelo basado en transferencia radiativa que se enfoca en simular cómo se propaga la luz artificial en el medio ambiente. El modelo utiliza típicamente información satelital y local como entrada. Comprende el cálculo de los dos primeros órdenes de dispersión hacia la atmósfera y las reflexiones en el suelo y superficies. Illumina puede simular la radiancia del cielo y la radiancia que es observada directamente desde luces artificiales y superficies iluminadas.

El modelo fue desarrollado por Aubé *et al.*(2005), con el objetivo de simular la luz que llegaba a un espectrómetro. Este modelo ha sido utilizado en el Observatorio del Teide (Aube *et al.* 2020) en España.

## 4.2 Estudio de imágenes satelitales

El estudio de imágenes satelitales o la teledetección es una tecnología que ha permitido la obtención de información de la superficie terrestre y la atmósfera. Esta tecnología tuvo sus inicios en el siglo XIX con las primeras fotografías aéreas desde globos aerostáticos; sin embargo, no fue hasta 1972, con el lanzamiento del Landsat 1 —un satélite diseñado para el estudio de la superficie terrestre— que, gracias a su escáner multiespectral (MSS), permitió un avance significativo en el procesamiento de imágenes (Chuvienco, 2006).

Hoy en día, los satélites modernos utilizan sensores ópticos, térmicos y de radar, que permiten obtener información de la superficie terrestre con resoluciones de muy alta calidad, pudiendo así obtener datos mucho más precisos para distintos tipos de estudios. Un ejemplo de esto es el Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), un instrumento presente en satélites meteorológicos que recopila datos del espectro visible e infrarrojo para el monitoreo del clima, medio ambiente, incendios, visualización nocturna, entre otros. El uso del VIIRS permite la observación de las fuentes de luz artificial desde el espacio debido a la alta sensibilidad de este instrumento (Elvidge *et al.*, 2017).

---

<sup>2</sup> <http://obsand.org/wiki/index.php?n=Prof.IllumEn>

En el caso de la contaminación lumínica, estudios con imágenes satelitales fueron utilizados para la creación del atlas del brillo artificial en el cielo nocturno (Cizano *et al.* 2001), que proporcionó una primera imagen global del brillo nocturno artificial. En 2016 se publicó la segunda versión del atlas por Falchi *et al.*, la cual utilizó el instrumento VIIRS, que tiene mayor precisión y resolución, además de considerar variables atmosféricas. Esto les permitió conocer el porcentaje de países que poseen un cielo nocturno prístino o que viven en lugares con contaminación lumínica, perdiendo así la posibilidad de observar las estrellas y los efectos negativos que también trae este tipo de contaminación, como se puede observar en la figura 2.

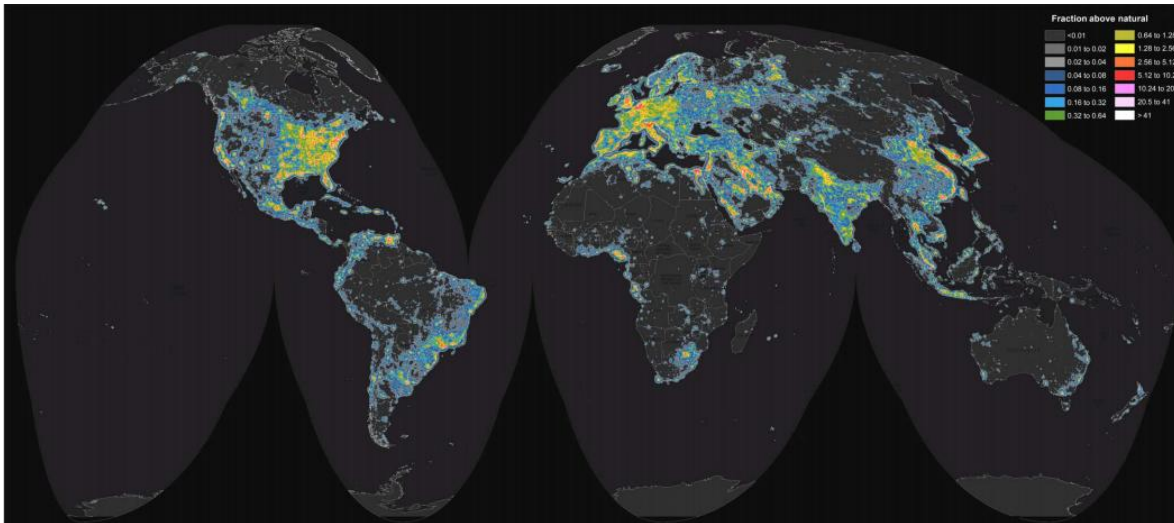


Figura 2 Mapa mundial de brillo del cielo (Falchi *et al.*, 2016).

### 4.3 Luminarias

Durante los inicios del uso de la luz artificial se experimentó con distintos tipos de luces de amplio espectro o luces blancas. No fue hasta la década de 1970 cuando empezaron a aparecer las luces de sodio de alta presión (HPS) y de baja presión (LPS), las cuales, gracias a su mayor eficiencia y capacidad de mantenimiento de lúmenes, tuvieron un mayor incentivo en su uso en comparación con las luces tradicionales. A mediados de la década de 2000, se vio un regreso al uso de luz de amplio espectro debido a la aparición del diodo emisor de luz (LED), que no solo mostraba características similares a las luces de sodio, sino también una mejor fidelidad en los colores, permitiendo una mejor visibilidad en áreas iluminadas, entre otros beneficios. Aunque las luces LED tuvieron un gran aumento en su uso, muchos lugares aún utilizaban luces antiguas que, de por sí, eran tecnología de más de 100 años de antigüedad (Kinzey *et al.*, 2017).

A medida que la tecnología de generación de luz artificial ha evolucionado, también lo han hecho las técnicas para controlar su dispersión, destacando el uso de métodos de apantallamiento que contribuyen significativamente a la reducción de la contaminación lumínica, como se muestra en la figura 3. En sus inicios, muchas luminarias carecían de cualquier tipo de apantallamiento, lo que permitía la visibilidad directa de la fuente luminosa desde cualquier ángulo. Esta configuración provocaba que una gran parte de la luz emitida se dirigiera directamente hacia el cielo, generando altos niveles de contaminación lumínica. El desarrollo del apantallamiento ha permitido limitar esta emisión ascendente. Se distinguen principalmente tres tipos:

- Luminarias full cut-off, que no emiten luz por encima del plano horizontal (0%)
- Luminarias semi-apantalladas, que permiten una emisión de hasta un 20% hacia el hemisferio superior
- Luminarias tipo cut-off, con una emisión entre un 5% y un 10%

En Chile, la normativa vigente promueve el uso obligatorio de luminarias full cut-off, especialmente en regiones del norte del país, con el objetivo de proteger la calidad del cielo nocturno y minimizar la dispersión de luz hacia la atmósfera (OPCC, 2014).

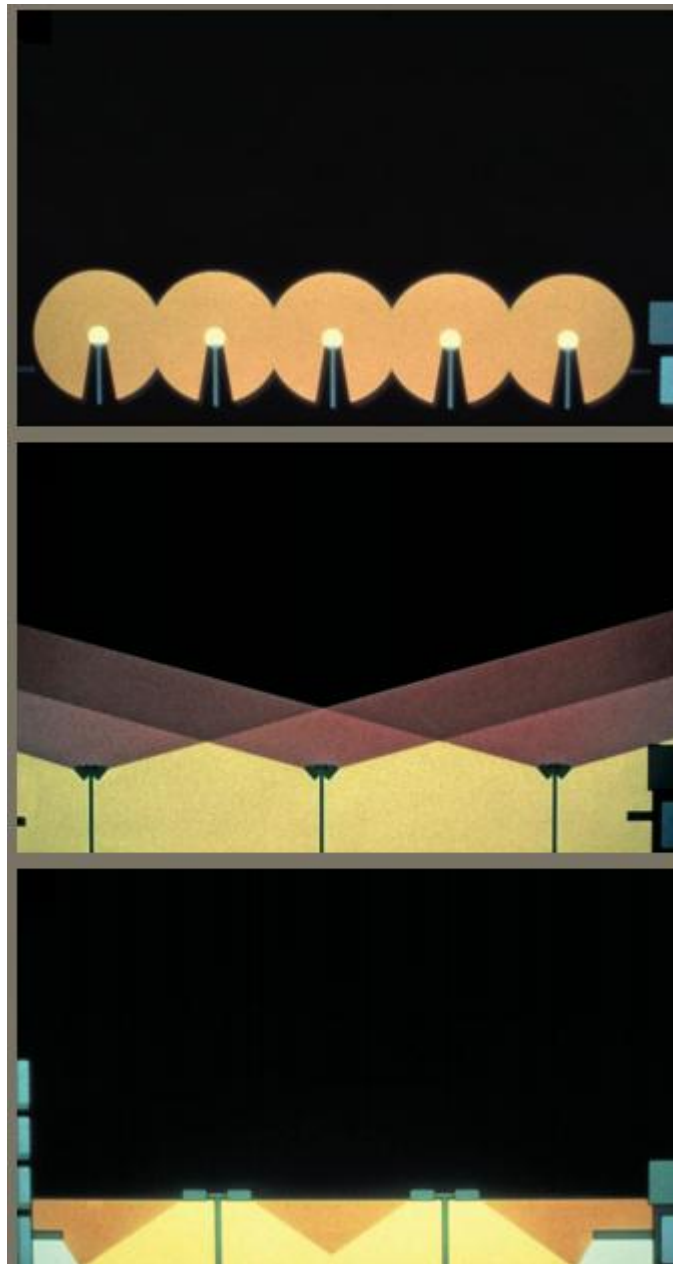


Figura 3 Diferentes efectos del apantallamiento de alumbrados públicos en la contaminación lumínica (Chepesiuk, 2009).

#### **4.4 Área de estudio**

La región de Antofagasta es la segunda región de Chile, ubicada entre 21° 28' hasta aproximadamente 25° 55' latitud sur. La superficie de la región tiene una longitud de 500 kilómetros aproximadamente y un área de 129 mil kilómetros cuadrados, siendo un equivalente del 16,67% del territorio nacional.

El clima de la región es desértico árido, con escasas lluvias, pero con nubosidad en la costa. Las temperaturas muestran variaciones extremas, con el día superando los 30°C y en la noche llegando a 1 a 2°C. Este clima desértico ha permitido a la región ser reconocida por tener uno de los cielos más prístinos del mundo, lo que se muestra con la presencia de centros astronómicos internacionales (Dirección Meteorológica de Chile, 2023).

La actividad económica principal de la región es la minería de cobre, destacando a La Escondida como la mina de cobre más grande del mundo. Además del cobre, también hay minería de otros materiales como el oro, plata, molibdeno y litio. En 2023, la minería aportó el 72% del producto interno bruto (PIB) de la región, siendo una parte significativa de la economía no solo regional como del país (Gobierno Regional de Antofagasta, 2023).

Pero debido a la necesidad de luz artificial dentro de las faenas mineras, se genera una cierta incompatibilidad con los centros astronómicos debido a la generación de contaminación lumínica, lo que ha llevado a estos centros a buscar formas para proteger los cielos nocturnos de la región para su uso en la investigación astronómica (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2020).

## 4.5 Normativa aplicable

En Chile existe normativa que limita la emisión de luz y establece requerimientos técnicos para su implementación. A continuación, se describen las normativas que tienen efecto en este trabajo.

- Ley N° 19.300: Regula la contaminación lumínica a través de la modificación que se dio el 15 de julio de 2019 con la Ley N° 21.162, que agregó la definición de "luminosidad artificial" y la obligación de realizar estudios de impacto ambiental en "áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica".
- D.S. N°40/2012 (MMA): Es el reglamento que debe seguir el estudio de impacto ambiental para ser aprobado en el SEIA.
- D.S. N°1/2022 (MMA): Decreto que derogó al D.S. N°43/2012, el cual fija los límites de emisión de luz artificial de alumbrados exteriores a nivel nacional. Esta normativa define las exigencias para la utilización de técnicas que lleven a cero la luz hacia el cielo, además de límites de luminancia por clase de alumbrado y límites permisibles de radiancia espectral tanto en áreas de protección especial como en el resto del país.
- D.S. N°2/2023 (Ministerio de Ciencias): Decreto que declara a 29 comunas de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo como áreas astronómicas (tabla 1). Estas áreas son consideradas de protección especial según el D.S. N°1/2022, imponiendo exigencias mayores que en el resto del país.
- Resolución N°455/2024 (MMA): Define zonas cercanas y lejanas alrededor de observatorios, siendo zonas lejanas aquellas que se encuentran a una distancia igual o mayor a 100 kilómetros del centro astronómico más cercano.

Tabla 1 Comunas consideradas áreas astronómicas (adaptado de SEA, 2023)

<b>Región de Antofagasta</b>	<b>Región de Atacama</b>	<b>Región de Coquimbo</b>
Antofagasta	Alto del Carmen	Andacollo
Calama	Caldera	Canela
María Elena	Copiapó	Combarbalá
Mejillones	Freirina	Coquimbo
Ollagüe	Huasco	Illapel
San Pedro de Atacama	Tierra Amarilla	La Higuera
Sierra Gorda	Vallenar	La Serena
Taltal		Monte Patria
		Ovalle
		Paihuano
		Punitaqui
		Río Hurtado
		Salamanca
		Vicuña

#### **4.6 Evaluación de proyectos**

En la evaluación económica de proyectos se tienen métodos de evaluación de cómo los gastos de estos se verán a futuro, dos de estos métodos son CAPEX y OPEX. CAPEX se define como los gastos destinados a adquirir, mejorar o mantener activos fijos que tienen una vida útil prolongada y generan valor a largo plazo. Mientras que OPEX son los gastos (normalmente anuales) para mantener las operaciones del proyecto.

# 5 Metodología

Este trabajo se divide en siete actividades, agrupadas según los distintos objetivos específicos propuestos de acuerdo con el diagrama de flujo del trabajo presentado en la figura 4.

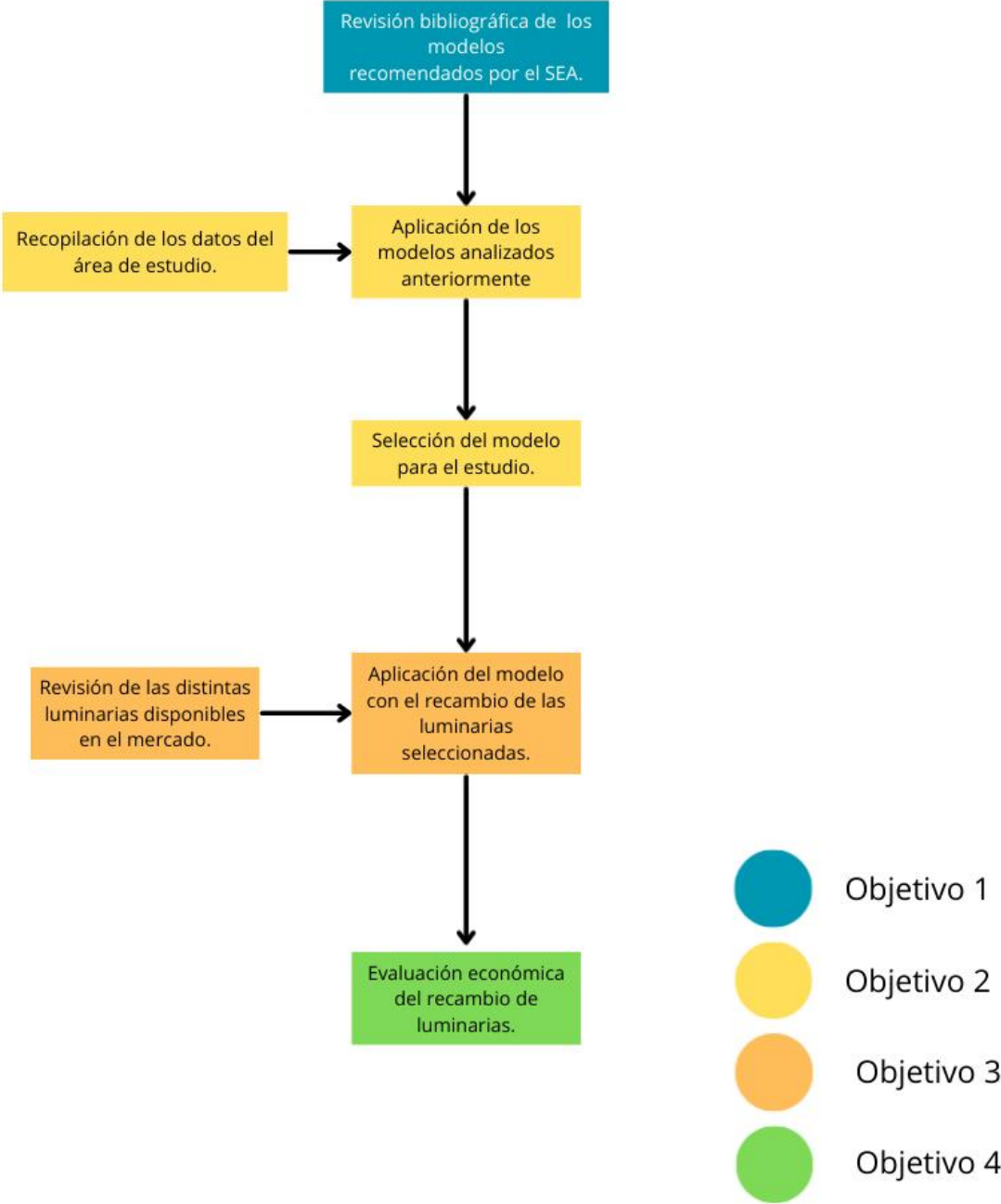


Figura 4 Diagrama de flujo del trabajo propuesto.

### **5.1 Revisión de los modelos recomendados por el SEA**

Se realizó una revisión bibliográfica de los modelos para entender su funcionamiento y la teoría subyacente utilizando bases de datos bibliográficas (Sciencedirect, Springer, entre otros) y buscadores especializados (Google Scholar) de donde se identificaron estudios en los cuales los modelos recomendados por el SEA fueron utilizados para la obtención de resultados.

### **5.2 Recopilación de los datos del área de estudio**

Se obtuvo información sobre la localización, distancia a la fuente de luz, geometría y condiciones atmosféricas del área de estudio mediante una revisión bibliográfica para poder realizar la aplicación del modelo.

### **5.3 Aplicación de los modelos recomendados por el SEA**

Se desarrollaron los modelos Illumina y Skyglow, utilizando los datos recopilados en el subcapítulo anterior, con escenarios atmosféricos de cielos claros y cielos nublados, de acuerdo a las instrucciones indicadas por los productos de los respectivos modelos.

### **5.4 Selección del modelo a utilizar para el Recambio**

Se seleccionó el modelo para ser utilizado en el recambio de luminarias a través de una comparación de los modelos, considerando las características cualitativas de ambos modelos y los resultados que entregan.

### **5.5 Revisión de las distintas luminarias disponibles en el mercado**

Se realizó una revisión bibliográfica de las luminarias comerciales disponibles en el mercado, considerando aspectos técnicos tales como la eficiencia luminica, la temperatura de color correlacionada (CCT) y el porcentaje de emisión de luz azul. Con base en esta información, se procedió a seleccionar al menos dos luminarias que cumplan con la normativa vigente aplicable al área de estudio.

## **5.6 Aplicación del modelo con el recambio de las luminarias seleccionadas**

Se aplicó el modelo seleccionado considerando los recambios a las luminarias identificadas en el subcapítulo anterior. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionó la luminaria que presentó el menor impacto en la contaminación lumínica.

## **5.7 Evaluación económica del recambio de luminarias**

Se realizó la evaluación económica correspondiente al recambio de luminarias, La elaboración de la evaluación se realizó a través de la identificación de los gastos de capital (CAPEX) y los costos operacionales (OPEX).

## 6 Resultados

### 6.1 Revisión de los modelos recomendados por el SEA

#### 6.1.1 Modelo Skyglow

El modelo Skyglow, desarrollado por Miroslav Kocifaj (2007), utiliza una metodología que se diferencia de otros modelos por considerar a los distintos lugares de interés como puntos emisores. Skyglow puede tomar la forma y extensión real de las fuentes, además de las interacciones de la luz con las condiciones atmosféricas. En la figura 5 se observa cómo el modelo trata a las fuentes, siendo áreas emisoras en vez de puntos, en el cual la superficie emite la radiación a la atmósfera según su ángulo cenital (el ángulo en el eje vertical de la fuente generadora de luz) y su azimut.

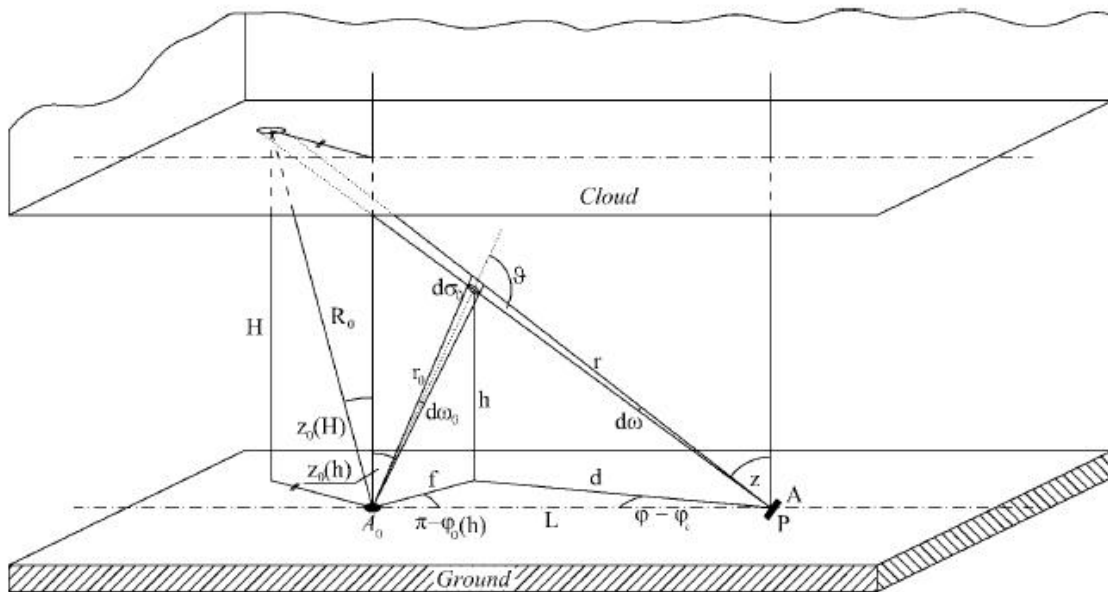


Figura 5 Representación geométrica del funcionamiento del modelo Skyglow (Kinzev *et al.*, 2017)

Como se aprecia en la figura 5, la emisión de luz se inicia desde el punto de vista del observador en la dirección A. Las alturas que se muestran son la altura máxima atmosférica que toma el modelo (H) y la altura en donde ocurre la dispersión observable (h). El rayo de luz que va a la atmósfera tiene una dirección (f) y una longitud (d), que va desde la fuente hasta el punto de dispersión (h). El ángulo Z es el ángulo cenital que da a

la formación de los ángulos  $Z_0$  que se encuentran en la dirección de la altura  $h$ .  $A_0$  es el ángulo azimutal de emisión desde la fuente. La distancia  $r$  es oblicua desde la fuente al punto de dispersión, mientras que  $R_0$  es un vector de posición del punto emisor hasta el punto de dispersión. La letra  $L$  es la dirección del haz de luz observado. El ángulo de la dispersión de la luz emitida desde  $P$  es  $\theta$ . El espacio en donde los rayos se cruzan es  $d\sigma$ , el cual es el volumen diferencial de dispersión en la atmósfera, mientras que  $d(i)$  es la dirección de incidencia del rayo antes de ser dispersado, visto desde la dirección del emisor al punto  $h$ . Por último, se encuentra  $\pi - \phi_0(h)$ , que es el ángulo entre el plano de dispersión y la dirección de emisión, y  $\phi - \phi_0$ , que es la diferencia de los ángulos azimutales del rayo observado y el rayo emitido.

La fuente generadora de luz artificial se mide como una distribución en una superficie, la que se emite hacia la atmósfera dependiendo del tipo de luminaria, la geometría, el espectro de emisión y el ángulo de salida de la luz. Esto se define con la función de la ley Bouguer-Beer-Lambert (ecuación 4, Kocifaj, 2014), con profundidad óptica variable, como una base para el cálculo de la transmisión.

$$t\lambda(h, z) = \exp\left(-\frac{\tau\lambda(h)}{\cos z}\right) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

$\tau\lambda =$  profundidad óptica

$z =$  ángulo cenital

Mientras la luz es transmitida hacia la atmósfera, esta se empieza a dispersar por moléculas o aerosoles que se encuentran suspendidos. El modelo Skyglow utiliza una función de dispersión de la luz combinada (ecuación 5).

$$\Gamma\lambda(h, \theta) = \Omega_{\lambda}^{(R)} k_{ext,\lambda}^{(R)}(h) \frac{P_{\lambda}^{(R)}}{4\pi}(\theta) + \Omega_{\lambda}^{(A)} k_{ext,\lambda}^{(A)}(h) \frac{P_{\lambda}^{(A)}}{4\pi}(\theta) \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

$\Omega =$  albedo de dispersión

$K_{ext} =$  coeficiente de extinción

$P(\theta) =$  función de fase (ángulo de dispersión  $\theta$ )

La radiancia que es dispersada, afectando la visión del observador, se calcula con la integración de todas las alturas y direcciones posibles de la emisión, siendo esta la ecuación general utilizada por el modelo Skyglow (Ecuación 6).

$$L\lambda(z_0, a_0) = M(z_0) \int_S \int_0^H B\lambda(z_E) \cdot \cos^2 z_E \cdot \frac{t\lambda(h, z_E) \cdot t\lambda(h, z_0)}{h^2} \cdot \Gamma\lambda(h, \theta) dh ds \quad \text{Ecuación 6.}$$

*Donde:*

$Z_0$  = ángulo cenital

$a_0$  = ángulo azimutal

$B\lambda(z_E)$  =  $J\lambda(0, z_E) \cos z_E$ : emisión modificada

$M(z_0)$  = masa óptica atmosférica

$\theta$  = ángulo entre direcciones de emisión y observación

Para poder utilizar el modelo Skyglow, se requiere descargar el programa desde la página del desarrollador (<https://skyglow.sav.sk/>), donde se puede encontrar, junto al programa, otras herramientas y estudios que ayuden a entender cómo el software funciona. Con el software listo para ser utilizado, se deben preparar los límites del área que se va a modelar. Esto se puede realizar utilizando otros softwares, como Google Earth, para delimitar los bordes del polígono y luego guardarlo como un archivo KML.

Skyglow permite convertir este tipo de archivos a uno que puede utilizar para la modelación, como se muestra en la figura 6, proporcionando los datos necesarios, como el nombre del lugar, su población, la cantidad de lúmenes producidos, la reflectividad promedio de la superficie y el porcentaje de luz que se dispersa al cielo.

Cuando el polígono se encuentra en el mapa, se debe configurar la emisión total. En la figura 7 se muestran los campos que deben ser llenados. Se tienen distintas opciones, como utilizar lúmenes, watts o, en caso de ciudades, a través de la población total, si es que no se tiene la información anterior.

Además de esta emisión, se debe asignar el valor de la dependencia angular, como se puede ver en la figura 8. Este valor representa la fracción de luz que se refleja isotrópicamente. Finalmente, se debe indicar la dependencia espectral, que se elige de una serie de archivos.

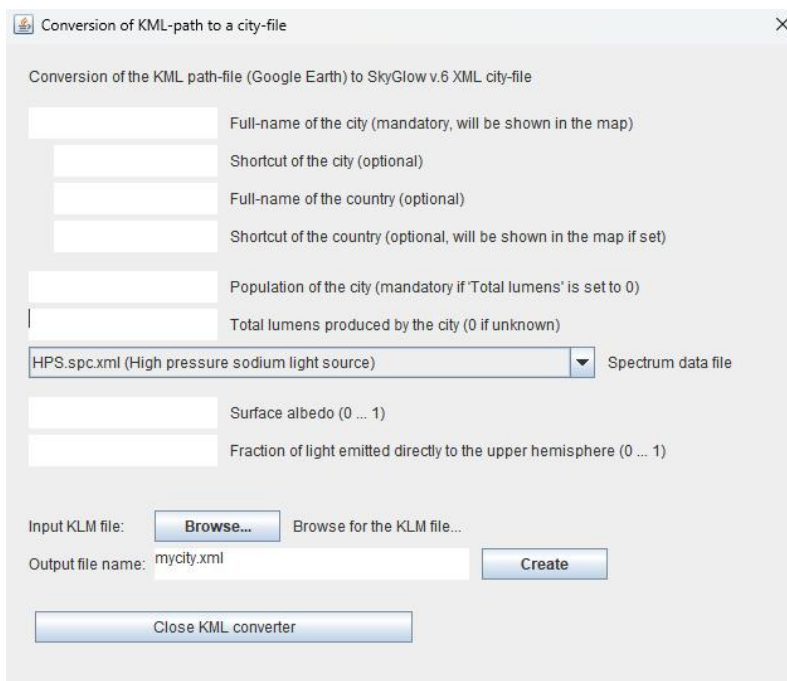


Figura 6 Conversión de KML a XML con software Skyglow.

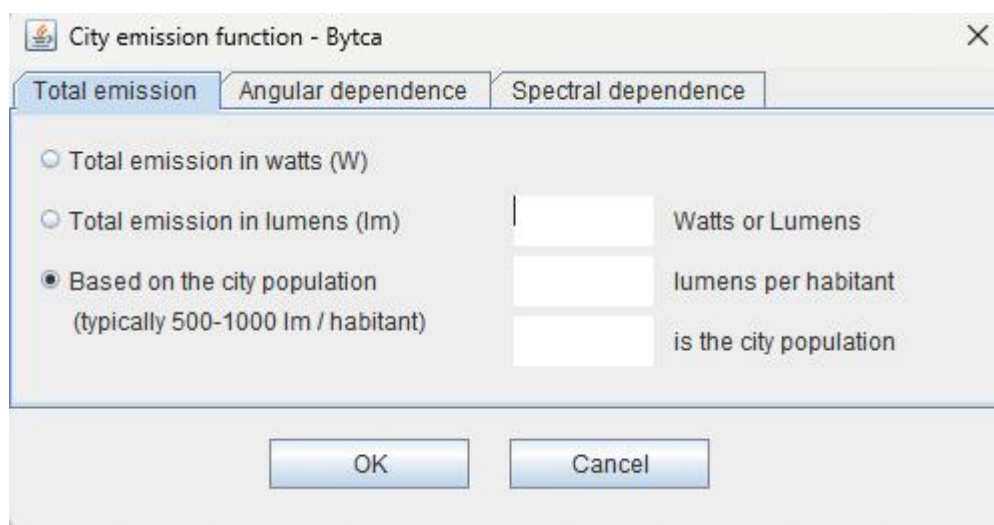


Figura 7 Pestaña de emisión total.

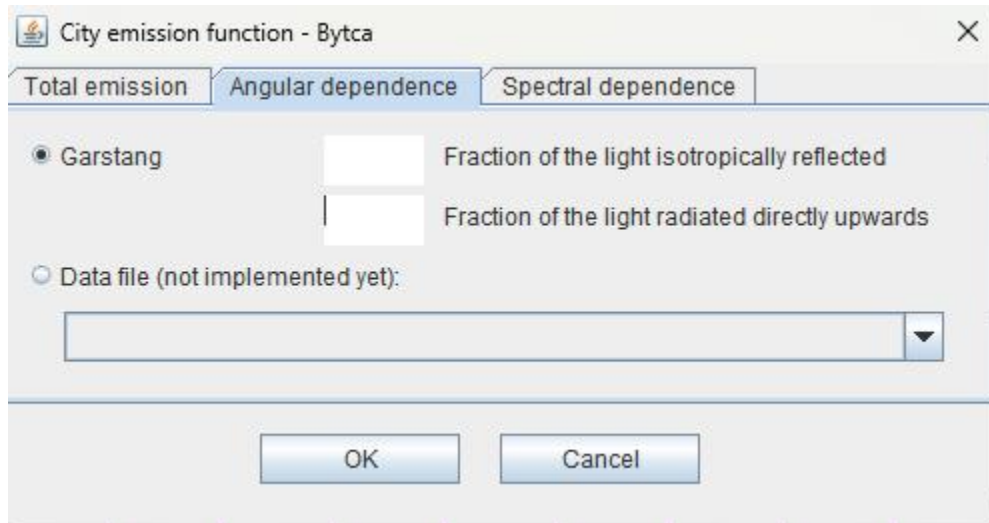


Figura 8 Pestaña de dependencia angular.

Quando se tiene configurada la información del polígono, se deben configurar las condiciones atmosféricas locales, las cuales se dividen en: nubes, aerosoles, horizonte y la salida del modelo. Como se muestra en la figura 9, se inicia indicando si se quiere modelar con un cielo despejado o con nubes, debiendo especificar la altura de la base de las nubes, la fracción de nubes que cubren el cielo, la generación de patrones en las nubes y el albedo de las nubes.

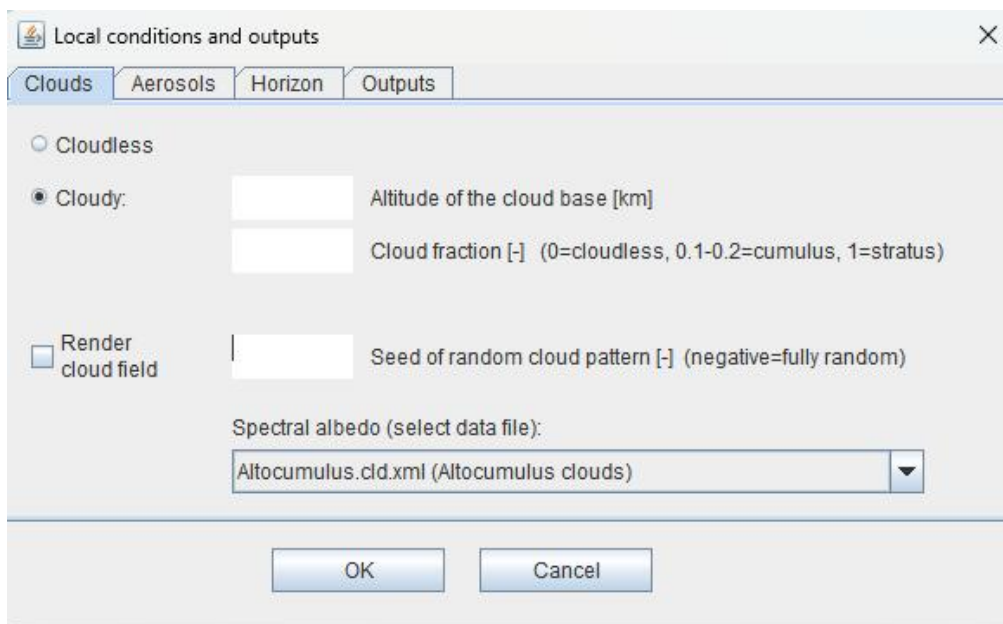


Figura 9 Pestaña de nubes.

Luego se necesita la información que se muestra en la figura 10 de los aerosoles, como la cantidad de aerosoles en la atmósfera, cómo esta cantidad varía con la longitud de onda, la altura de la atmósfera molecular y la dispersión del albedo.

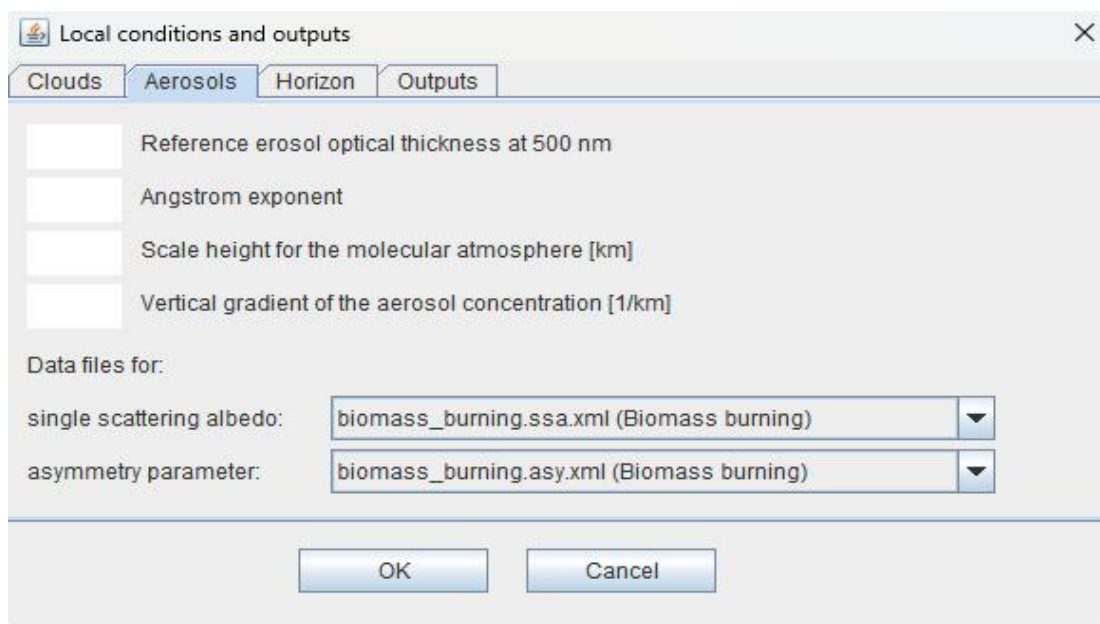


Figura 10 Pestaña de aerosoles.

En la pestaña de horizonte se tienen dos opciones, las cuales son: tener un horizonte sin obstáculos o con obstáculos en el norte o el este.

La salida de los resultados se puede calcular en base a datos de luminiscencia visual, como lúmenes, lux o  $\text{cd/m}^2$ . También se pueden obtener los datos en términos de energía radiante, como vatios,  $\text{W/m}^2$  o  $\text{W/m}^2/\text{sr}$ . Además, para este tipo de información se puede limitar la longitud de onda si es necesario.

Una vez que el modelo ha sido configurado, se puede iniciar su ejecución. Una vez finalizados los cálculos, se obtendrán archivos que muestran los detalles de la computación del modelo y, además, se abrirá un software incluido con Skyglow, el cual permite observar los resultados de la modelación en gráficos polares, con una vista desde

el cielo o desde la vista del observador, tal como se muestra en las figuras 11 y 12, respectivamente.

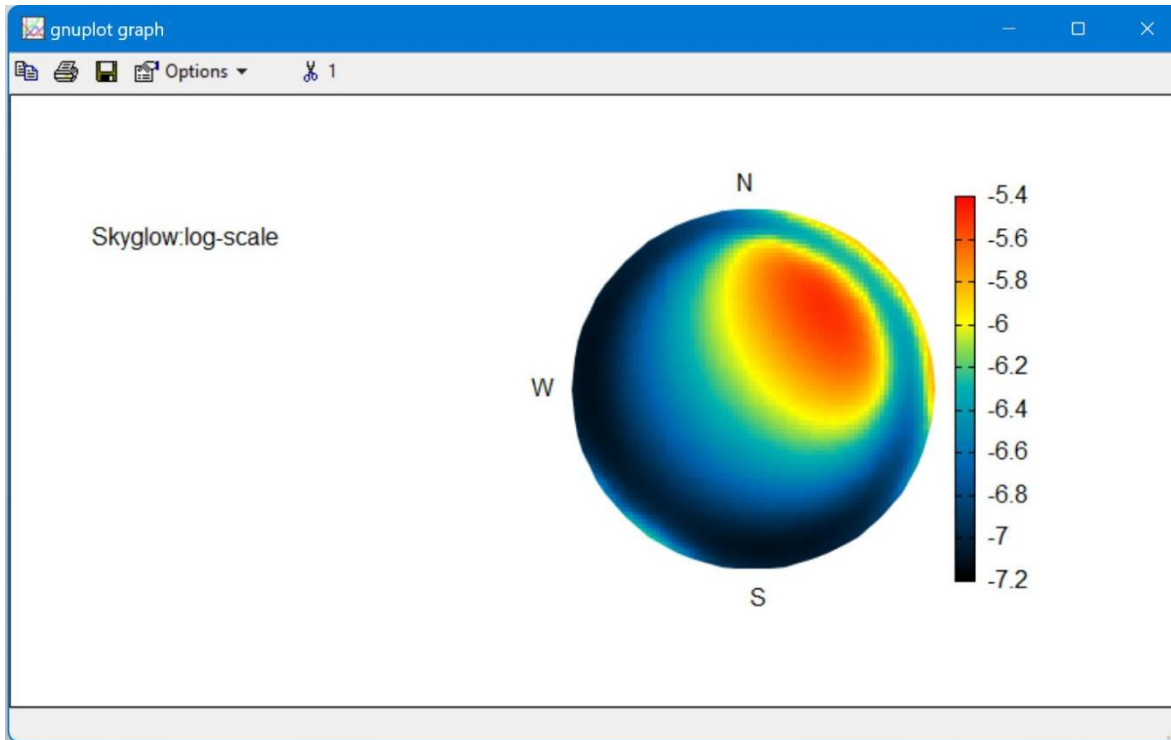


Figura 11 Resultado en gráfico polar con vista desde el cielo.

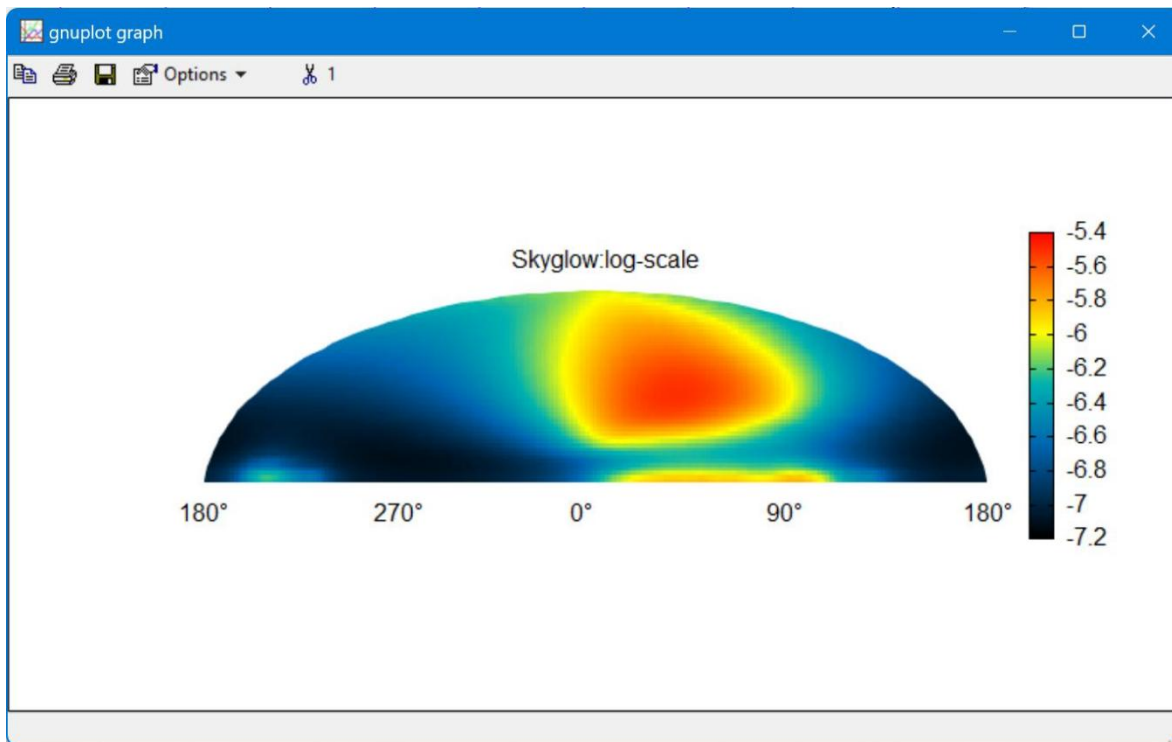


Figura 12 Resultado en gráfico polar con vista del observador.

### 6.1.2 Modelo Ilumina

Ilumina es un software que modela la transferencia radiativa, permitiendo simular el brillo del cielo nocturno. El modelo fue desarrollado por Aubé *et al.* (2005) implementando un método heterogéneo para la modelación del brillo del cielo nocturno, permitiendo así una simulación de situaciones reales (Kinzey *et al.* 2017). El modelo utiliza información satelital y local como entrada, realizando el cálculo de los primeros órdenes de la dispersión de la luz hacia la atmósfera y su reflejo en estructuras que se encuentran en el suelo (Aubé *et al.*, 2005), tal como se puede apreciar gráficamente en la figura 13.

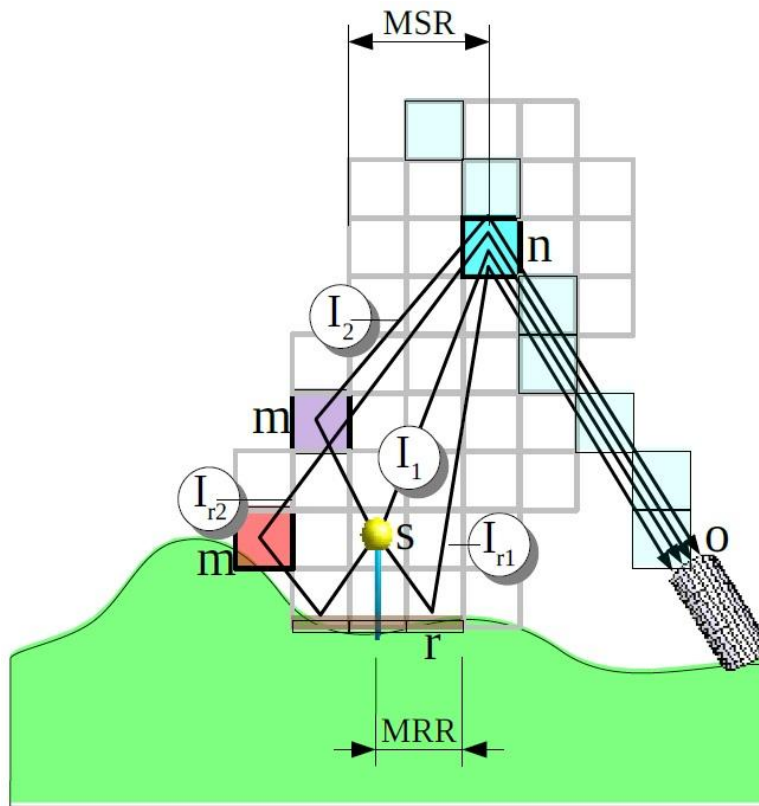


Figura 13 Representación Geométrica del modelo Illumina (Kinzezy et al., 2017).

Illumina considera la reflexión difusa del suelo y la dispersión entrante de la luz dispersada desde volúmenes discretos ( $m$ ) hacia el volumen  $n$ , el cual es visible por el observador que en este caso es considerado un espectrofotómetro en posición  $O$  (Kinzezy *et al.*, 2017). El modelo se sustenta en la ecuación de transferencia radiativa, la que describe cómo la radiación es dispersada en un medio como es la atmósfera. En su implementación Illumina considera la dispersión molecular y la dispersión por aerosoles, mediante perfiles exponenciales con distintas alturas de escala: 8 kilómetros para moléculas y 2 kilómetros para aerosoles (Aubé *et al.*, 2020). Como se mencionó anteriormente, el modelo calcula dos órdenes de dispersión, siendo el primer orden la luz dispersada una vez y el segundo orden la luz dispersada múltiples veces antes de alcanzar al observador. La dispersión de segundo orden permite representar ambientes con una alta turbidez atmosférica, en donde la dispersión múltiple contribuye de manera significativa a la contaminación de los cielos (Aubé y Kocifaj, 2012).

La probabilidad de una dispersión  $p$  en un volumen discreto se calcula con la siguiente ecuación (Aubé *et al.*, 2020):

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{\ln(T_\infty) \cdot \exp\left(\frac{-z}{H}\right) \cdot d}{H}\right) \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde:

$T_\infty =$  transmitancia vertical total

$H =$  altura de escala

$z =$  altitud sobre el suelo

$d =$  longitud del volumen discreto

Junto a esto, el modelo evalúa la propagación de la luz en distintas longitudes de onda desde los 250 nm hasta los 4000 nm. Esto permite la evaluación del posible impacto de distintos tipos de luminarias, cuya emisiones varían significativamente (Aubé y Simoneau, 2018). La emisión espectral angular se mide con la siguiente ecuación (Aubé y Simoneau, 2018).

$$I_e(z, \lambda) = \bar{G}(z, \lambda) \cdot \Phi_e \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

$\bar{G}(z, \lambda) =$  patrón espectral angular promedio

$\Phi_e =$  flujo radiante total

Mientras que la distribución espectral de potencia (SPD) de distintas lámparas se normaliza en función de la respuesta fotópica del ojo humano con la siguiente ecuación (Aubé y Simoneau, 2018):

$$\bar{J}_i(\lambda) = \frac{J_i(\lambda)}{683 \cdot \int_{\lambda} V(\lambda) \cdot J_i(\lambda) d\lambda} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

$\bar{J}_i(\lambda) =$  SPD normalizada

$J_i(\lambda) =$  SPD sin normalizar

$V(\lambda) =$  función de sensibilidad fotópica del ojo humano según la CIE (Aubé y Simoneau, 2018)

Ilumina también integra elementos geoespaciales como la topografía y la presencia de obstáculos, que se modelan mediante factores de relleno, alturas medias y distancias promedio entre la fuente y el obstáculo. Esto permite representar la obstrucción de la luz, lo que lleva a una simulación más realista de los entornos urbanos y periurbanos (Aubé et al., 2020).

A diferencia de Skyglow Simulator, Ilumina solo puede ser instalado en computadores con una distribución de sistema operativo Linux, o a través de Windows Subsystem for Linux (WSL).

Una vez se instala el software, se deben preparar archivos con la información necesaria para la ejecución del modelo. Estos archivos se dividen en los siguientes grupos de información:

- **Definición del dominio:** se debe definir dónde va a ocurrir la simulación del brillo del cielo, junto con la proyección de esta, utilizando coordenadas en metros en vez de grados. Los parámetros necesarios para este archivo son: la latitud y longitud de las coordenadas del observador (puede ser más de un punto de observación), el sistema de referencia espacial (SRS) utilizado por el modelo (el cual puede ser elegido automáticamente por el modelo o seleccionado manualmente por el usuario), y un sistema de capas superpuestas con diferentes escalas. Los cinco últimos parámetros describen estas capas:

`nb_layers`: número de capas

`nb_pixel`: ancho del dominio en número de píxeles

`scale_min`: resolución en metros de la capa más pequeña (no puede ser menor a 20 metros)

scale\_factor: proporción de las dimensiones en píxeles de las capas sucesivas

buffer\_size: tamaño en kilómetros que cada capa debe considerar para el movimiento de la luz antes de alcanzar al observador.

- Imágenes VIIRS-DNB: la emitancia nocturna se obtiene de imágenes satelitales, las que pueden ser descargadas de distintos sitios en Internet<sup>3</sup>. Se requieren dos archivos: avg\_rade9.tif y cf\_cvg.tif. Estos archivos contienen los datos de la emitancia y la información sobre la calidad de la imagen.
- Watermask: cómo se utiliza información VIIRS-DNB, el modelo necesita este archivo para calcular dónde se encuentran las luminarias que emiten la luz. Al igual que las imágenes, estas deben descargarse desde Internet<sup>4</sup>.
- Información SRTM: el modelo utiliza información de la “Misión Topográfica Radar Shuttle” para considerar la elevación del área de estudio<sup>5</sup>.

Con esta información, se puede utilizar el comando `illum warp` para procesar las imágenes del área que se quiere estudiar.

Una vez terminado este paso, se debe crear un inventario de luces. El modelo tiene dos formas de hacerlo: la primera es utilizando el producto mensual de radiancia espacial VIIRS-DNB, y la segunda es mediante un inventario de fuentes puntuales. Ambos pueden ser utilizados al mismo tiempo, mientras no se superpongan. Esto se realiza utilizando zonas circulares uniformes superpuestas o bien un inventario de fuentes de luces discretas.

---

<sup>3</sup> <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/> recomendación del desarrollador

<sup>4</sup> [https://lighttrends.lightpollutionmap.info/VIIRS\\_DNB\\_zero\\_correction\\_csv.zip](https://lighttrends.lightpollutionmap.info/VIIRS_DNB_zero_correction_csv.zip) archivo proporcionado por el desarrollador

<sup>5</sup> <https://search.earthdata.nasa.gov/search> fuente de información topográfica

Las zonas circulares uniformes superpuestas son definidas por su punto central, un radio y una mezcla de lámparas especificadas, que se asume se encuentran en esta área (siendo diferentes en su función fotométrica, patrón de salida, espectro y altura), además de la distancia promedio entre obstáculos, su altura y el factor de relleno. Dos zonas pueden encontrarse en la misma región geográfica o estar parcialmente superpuestas. Cada zona nueva sobrescribe a la anterior en caso de una intersección. Todos los puntos que no estén incluidos serán ignorados por el modelo. Para crear este archivo, se debe editar un archivo ASCII, lo cual puede realizarse con un editor de texto simple, siguiendo el formato mostrado en la figura 14

```
# lat lon R hobs dobs fobs hlamp Zone inventory Comment
21.4474 -157.9712 50 7 25 0.5 7 90_H_5 10_M_10 # Oahu
21.0052 -157.0123 40 7 25 0.5 7 90_H_5 10_M_10 # Molokai + Lanai
20.7764 -156.1512 64 7 25 0.5 7 18_H_10 72_H_0 10_M_10 # Maui
19.6468 -155.5714 103 7 25 0.5 7 87_L_10 8_H_10 5_M_5 # Big Island
19.2878 -155.2179 23 7 25 0.5 7 0_L_0 # Lava
```

Figura 14 Formato de zona circular uniforme superpuesta. (Aubé *et al.*,2022)

Cada línea con información contiene distintos parámetros; Separados por espacios/tabulaciones:

1. Lat: latitud central de la zona circular.
2. Lon: longitud central de la zona circular.
3. R: radio de la zona circular (en kilómetros).
4. Hobs: altura promediada de la subred de obstáculos (en metros).
5. Dobs: distancia promediada de la subred de obstáculos (en metros).
6. Fobs: factor de relleno de un obstáculo o la probabilidad de que un fotón choque con un obstáculo (0 a 1).

7. Hlamp: altura promedio de las lámparas relativa al suelo (en metros).
8. Lista de características de lámparas por zona o inventarios de estas.
9. Comentarios.

Cada característica de las lámparas está compuesta por tres elementos separados por un guión bajo. La primera parte es el peso de la zona, que se define en relación con las siguientes dos características. Este peso se convierte en una proporción a través de la sumatoria de todos los pesos de esa zona. La segunda parte es una referencia que corresponde al SPD (Spectral Power Distribution) de la lámpara. La tercera corresponde al poder de distribución angular de la lámpara, es decir, al patrón de salida de la luz.

El peso se aplica al flujo lumínico del SPD en lúmenes, lo que significa que el espectro es ponderado según la curva de sensibilidad fotópica.

Por el otro lado, el uso de un inventario de fuentes de luz discreta consiste en especificar directamente las propiedades de las lámparas una por una, siguiendo el formato de la figura 15

```
# lat lon pow hobs dobs fobs hlamp spct lop
21.295693 -157.856846 2500 20 25 0.9 7 MH 5
21.295776 -157.856782 1500 20 25 0.9 7 LED 0
21.295844 -157.857114 1000 30 30 0.85 7 MH 5
21.286488 -157.845900 1000 50 10 0.3 10 LED 1
```

Figura 15 Formato para inventario de fuentes de luz discreta (Aubé *et al.*, 2022).

En donde:

1. Lat: latitud de la fuente de luz
2. Lon: longitud de la fuente de luz
3. Pow: intensidad de la fuente en lumen (puede ser transformada desde watts a lumen)
4. Hobs: altura promedio de obstáculos (en metros).

5. Dobs: distancia promedio entre obstáculos (en metros)
6. Fobs: factor de relleno de obstáculos.
7. Hlamp: altura de la fuente de luz relativa al suelo (en metros).
8. Spct: poder de distribución espectral (SPD)
9. Lop: poder de distribución angular

Es posible utilizar ambos métodos simultáneamente, pero si este es el caso, todas las fuentes discretas deben estar fuera de las zonas o deben tener un peso de cero.

Con la información del dominio lista, se debe crear el archivo con los parámetros de entrada, utilizando el formato que se muestra en la figura 16.

```
# input parameters
exp_name: Chile
zones_inventory: inventory_zones.txt
lamps_inventory: inventory_INNA_permanent.txt
nb_bins: 9
lambda_min: 400 # [nm]
lambda_max: 900 # [nm]
reflectance:
asphalt: 0.8
grass: 0.2 # THIS IS THE TYPICAL SOIL IN THE AREA WHICH WOULD BE PRESENT INBETWEEN THE ASPHALT ROADS. 80/20. RATIO IS
A PURE GUESS FOR THE TIME BEING
aerosol_profile: D # Aerosol profile. 'CC','CA','CP','U','D','MC','MP','ART','ANT','Manual'.
layer_type: D # Additional layer. Same choices as aerosol_profile. Set 'layer_aod' to 0 to disable.
relative_humidity: 70 # THIS WOULD BE AT THE HARBOUR FACILITIES AT SEA LEVEL.. 60% IS A TYPICAL VALIE ACCORDING TO
METEO DATA
estimated_computing_time: 10 # estimated computing time per case [h]
batch_file_name: batch
road_orientation: False # The final azimuth angles will be determined with azimuth_angle (see below) relative to the
direction between the observer and the nearest point of the nearest road instead of relative to the north. (WARNING:
Can be slow for large domains)
observer_obstacles: False
# parameters after here can be lists
observer_elevation: 20 # elevation above ground level [m] 15m for VLT at PARANAL, 30 m for ELT at ARMAZONES, between 5
and 30 m for different CTA telescopes. Can we use 20 m as typical value
air_pressure: 101.3 # lowest domain level atmospheric pressure [kPa] - THAT WOULD BE AT SEA LEVEL. THEREFORE 1013 mbar
SHOULD BE OK
reflection_radius: 9.99 # radius around light sources where reflections can occur (m)
cloud_model: 0 # cloud model selection 0=clear, 1=Thin Cirrus/Cirrostratus, 2=Thick Cirrus/Cirrostratus,
3=Altostratus/Alto cumulus, 4=Stratocumulus, 5=Cumulus/Cumulonimbus
cloud_base: 0 # height of the cloud base [m]
cloud_fraction: 0 # Cloud cover fraction (0-100)
stop_limit: 5000. # Stop computation when the new voxel contribution is less than 1/stoplim of the cumulated flux
(suggested value = 5000.)
single_scattering: True # Activate single scattering (True/False)
double_scattering: True # Activate double scattering (True/False)
elevation_angle: [90,45] # 45 and 90 at 6 azimuth angles would be a nice grid to sample.
azimuth_angle: [0,60,120,180,240,300]
direct_fov: 5 # Field of view for the direct radiance calculations [deg]
aerosol_optical_depth: 0.101 # AOD value at 500 nm THERE IS AERONET STATION IN PAPOSO WHICH IS A GOOD REPRESENTATION
OF THE LOWEST ELEVATION: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3?
site=Paposo&nachal=2&level=1&place_code=10
angstrom_coefficient: 1.0 # angstrom exponent value
aerosol_height: 2000 # Aerosol scale height [m]
layer_aod: 0. # Layer's AOD value at 500 nm
layer_alpha: 1.0 # Layer's angstrom exponent value
layer_height: 2000 # Layer's scale height [m]
```

Figura 16 Formato parámetros de entrada (adaptado de Aubé et al., 2022).

Ilumina permite la creación de dos capas de aerosoles con propiedades distintas, los que pueden ser los siguientes tipos:

- Insoluble
- Soluble en agua
- Hollín
- Sal marina
- Minerales
- Gotas de sulfato
- Niebla

Además de esto, Illumina permite al usuario el combinar componentes utilizando la densidad de la partícula (partículas/cm<sup>3</sup>). No obstante, hay combinaciones que ya están predefinidas:

- Continental limpio (CC)
- Continental Promedio (CA)
- Continental contaminado (CP)
- Urbano (U)
- Desértico (D)
- Marítimo limpio (MC)
- Marítimo contaminado (MP)
- Marítimo tropical (MT)
- Ártico (ART)
- Antártico (ANT)

Cuando las entradas están preparadas, el comando “illum inputs” es utilizado para la preparación de la información en el modelo. Con los archivos listos, se debe de conectar con un “cluster”, el cual se envía la información a través del comando “makeILLUMINA”. Cuando la recompilación esta lista, se debe de ejecutar “illum batches” para preparar la carpeta para los cálculos y así se puede utilizar los archivos creados por el comando para iniciar los cálculos.

illumina genera los valores numéricos de la difusión de radiancia total, la radiancia de la nubes, la radiancia directa de la fuentes y la radiancia directa por la reflexión de las superficies.

Estos resultados deben ser extraídos con el comando “illum extract”. La radiancia que se obtiene de los resultados está expresada en W/sr/m<sup>2</sup>/nm, la cual puede ser transformada a mag/arcsec<sup>2</sup> utilizando el sistema UBVRi de Johnson-Cousins. Esta transformación se realiza utilizando el brillo del cielo de fondo del área de estudio ( $SB_{bg}$ ) junto con puntos ceros ( $R_0$ ) y su radiancia ( $R_{bg}$ ) que es obtenida con la ecuación 10.

$$R_{bg} = R_0 \cdot 10^{-0.4SB_{bg}} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

$R_0$  = Puntos ceros.

$SB_{bg}$  = Brillo de cielo natural.

Con los valores estimados y calculados se puede convertir la radiancia modelada a brillo de cielo con la ecuación 11.

$$SB = -2.5 \log_{10} \left( \frac{R_a + R_{bg}}{R_0} \right) \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

$R_a$  = Radiancia modelada.

## 6.2 Selección del modelo a aplicar en el área de estudio

### 6.2.1 Información del área de estudio

La región de Antofagasta se ha caracterizado por ser uno de los lugares con cielos más prístinos a nivel mundial, con áreas que permiten el uso de tecnologías que en

combinación con las características climáticas, permiten que el estudio astronómico se lleve a cabo de manera satisfactoria. Esto ha llevado a instituciones internacionales como el European Southern Observatory (ESO) a realizar estudios para la instalación de centros astronómicos en la región, como fue el caso de Cerro Armazones, donde se realizaron estudios de vapor precipitable de agua (PWV) por Lakicević et al. (2016) para observar las condiciones atmosféricas, los cuales mostraron condiciones sobresalientes, las que también se adhieren con la información documentada de ESO que muestra que las condiciones climáticas en Cerro Armazones han llevado a más de 320 noches despejadas por año, junto a una baja emisión de luz artificial en el cielo.

Pero aunque el área de Cerro Armazones se encuentra protegida por el Decreto Supremo 36/2017, el cual no permite el emplazamiento de proyectos mineros, este no afecta a otros tipos de proyectos y sus emisiones de luz artificial, como es el caso del complejo industrial INNA por AES Andes. Este complejo tiene por objetivo la generación de hidrógeno verde, pero al mismo tiempo, las emisiones de luz artificial generadas por el complejo llevarían a un incremento de un 35% o más del brillo nocturno del cielo (con otros centros llegando a un 50% de aumento) según la ONG Darksky, esto se debe a que el centro se encuentra a 23 kilómetros de Cerro Armazones.

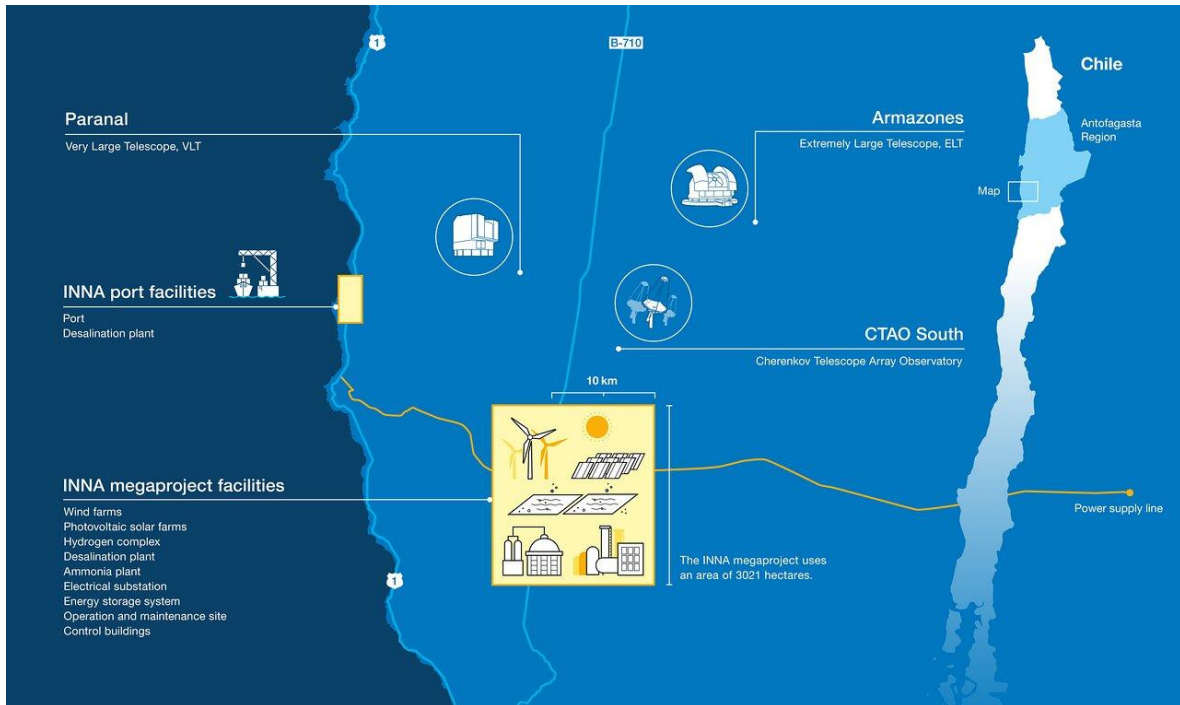


Figura 17 Localización de los Observatorios y el mega proyecto INNA (ESO, 2025)

Otro posible candidato para este estudio es el Llano Chajnantor, a 50 kilómetros de San Pedro de Atacama y 140 kilómetros de Calama, a una altitud de 5000 metros sobre el nivel del mar que, al igual que Cerro Armazones, muestra las condiciones ideales para ser un lugar de estudios astronómicos gracias a tener una transparencia atmosférica excepcional debido a que la corriente de Humboldt controla la nubosidad desde el océano junto con la Cordillera de los Andes, con valores de vapor de agua precipitable que pueden descender bajo los 0.5 milímetros y una estabilidad que lleva a tener más de 300 noches despejadas por año, junto a una topografía de cuenca natural que la protege de intrusiones lumínicas en el horizonte. Debido a estas condiciones, 363 km<sup>2</sup> de esta área en 2013 fue concesionada a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) para su uso astronómico exclusivo, el cual ha sido utilizado en proyectos de radiotelescopios y telescopios submilimétricos como son el *Cosmology Large Angular Scale Surveyor (CLASS)*, *Simons Array (Polar Bear)*, con miras a nuevos proyectos como *Cerro Chajnantor Atacama Telescope (CCAT)* y *Simons Observatory*.

Pero debido a la expansión urbanística de San Pedro de Atacama, al igual que la ciudad de Calama, se ha aumentado el brillo del cielo generando halos que son visibles en la base del horizonte. Esto se ha visto debido a las denuncias que se han dado a las autoridades: en 2024, se recibieron 30 denuncias por contaminación lumínica, con 10 de estas llegando a procedimientos sancionatorios en la región. Esto ha llevado a una preocupación por los efectos que se han visto, tanto por el aumento de la población en la región como por los distintos proyectos mineros que, aunque se han regulado para evitar efectos negativos en las áreas cercanas, aún pueden llevar a tener un efecto en la calidad de los cielos para su estudio en el futuro.

San Pedro de Atacama se ubica a 2436 metros sobre el nivel del mar, en la cuenca del Salar de Atacama. Geomorfológicamente, el territorio incluye el altiplano, quebradas, salares y campos geotérmicos como los Géiseres del Tatio. San Pedro fue declarado zona típica en 1980 por su valor histórico y cultural, siendo un patrimonio arquitectónico e histórico que alberga museos con elementos de la cultura atacameña. San Pedro de Atacama atrae turistas gracias a distintos atractivos naturales, pero debido a esto se genera la necesidad de la expansión de la ciudad para soportar el aumento de la población, lo que ha llevado a un aumento de la contaminación lumínica, afectando a las áreas para el estudio astronómico.

Calama se ubica en la depresión del río Loa, una cuenca hidrográfica que alberga salares y lagunas. Es apodada la “capital del cobre”, manteniendo turismo gracias a la cultura y los distintos puntos de interés de la comuna. El apodo viene por ser uno de los puntos principales de la producción mineral de cobre, sirviendo como centro logístico para la actividad necesitando generar grandes cantidades de luz artificial para las distintas actividades que se llevan a cabo.

Este estudio tomará los efectos que se ven afectando al Llano Chajnantor (Figura 18) debido al crecimiento de la expansión urbanística y cuál podría ser una posible solución a la disminución de los efectos de la pérdida de la calidad del cielo en el área de estudio.

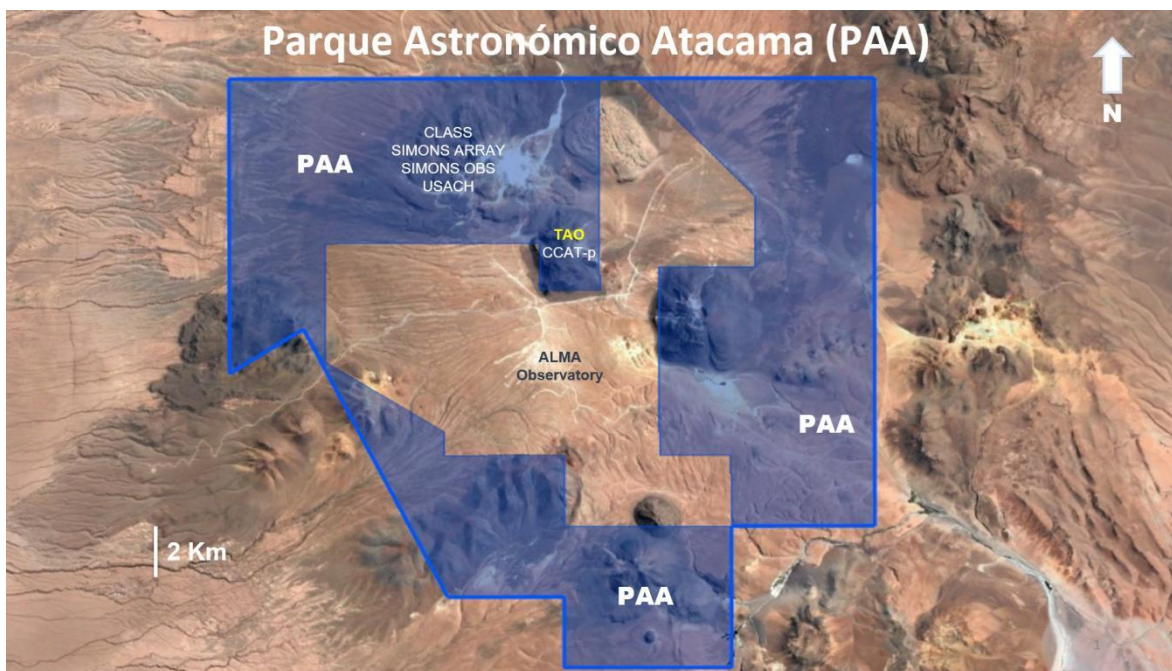


Figura 18 Parque Astronómico Atacama (ANID, 2016)

### 6.2.2 Aplicación de los modelos recomendados por el SEA

Se inició por la delimitación del área donde las luminarias se encuentran, utilizando Google Earth Pro (Figura 19), para la creación del área para luego ser agregado a Skyglow.

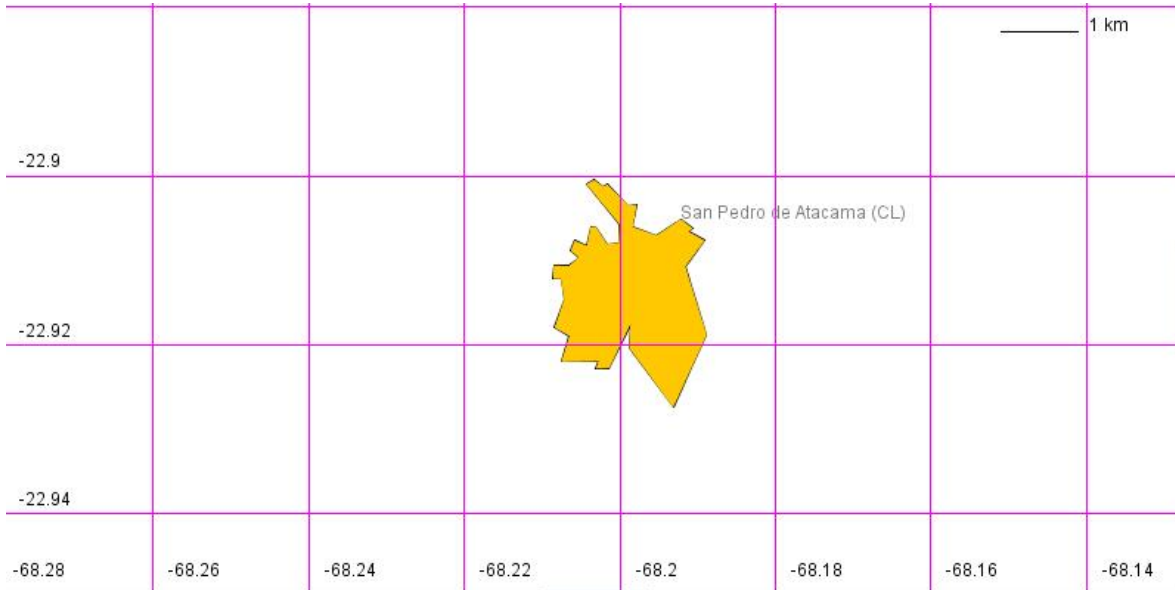


Figura 19 Área de estudio a modelar

El observador fue ubicado a 50 kilómetros al este del área de estudio mirando a la dirección de esta. Debido a que no hay información disponible de la cantidad de luminarias disponibles en San Pedro de Atacama, se utilizó a la población en dos escenarios, el primero siendo la población según el censo 2024 que son 9843 habitantes y el segundo escenario la población que se alcanza con la cantidad de turistas promedio según el PLADECO de San Pedro de Atacama, alcanzando un total de 23543 habitantes, considerando que se generan 640 lúmenes por habitante, el cual es el promedio del programa.

Una vez realizada la modelación se obtuvieron resultados en  $\text{cd}/\text{m}^2$ , junto a estos también se obtuvieron mapas polares que muestran los efectos de la luz artificial desde un punto de vista superior o desde el punto de vista del observador (Figura 20).

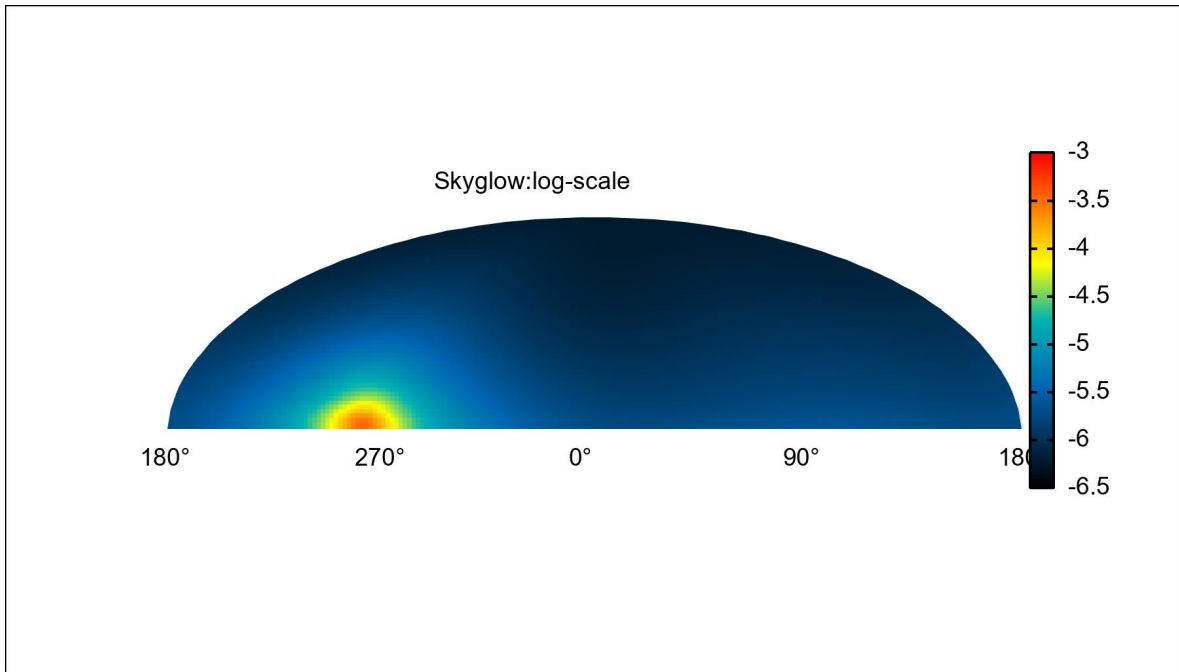


Figura 20 Gráfico Polar desde el punto de vista del observador.

Para utilizar el modelo Illumina se requirió primero de preparar la información del área de estudio, esto se dividió en dos partes principales que son la información de la luz y la información geográfica. Para la información de luz, esta se obtuvo del compuesto mensual de DNB de Earth Observation Group para el mes de agosto de 2025, obteniendo la información en datos de la luminosidad que se encuentra en el área de estudio. En el caso de la información de la geografía, esta se obtuvo de Earthdata Search de la NASA, utilizando el dominio que Illumina ha creado (Figura 21) para obtener la información.

Junto con esto se preparó el inventario de luces en el que se utilizaron cinco zonas circulares uniformes superpuestas divididas en las áreas pobladas de San Pedro, utilizando luces de sodio de alta presión dentro de estas zonas.

Una vez se terminó de procesar la información, se procedió a realizar la modelación, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3 en distintas bandas y valores de brillo.

Tabla 3 Resultados obtenidos de Illumina.

Onda (nm)	Radiancia (Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	2,472E-09	21,92
515	1,352E-09	21,92
545	3,238E-09	21,91
575	2,274E-08	21,82
605	1,886E-08	21,84
635	3,878E-09	21,91
665	1,71E-09	21,92
695	9,74E-10	21,93
725	1,178E-09	21,92

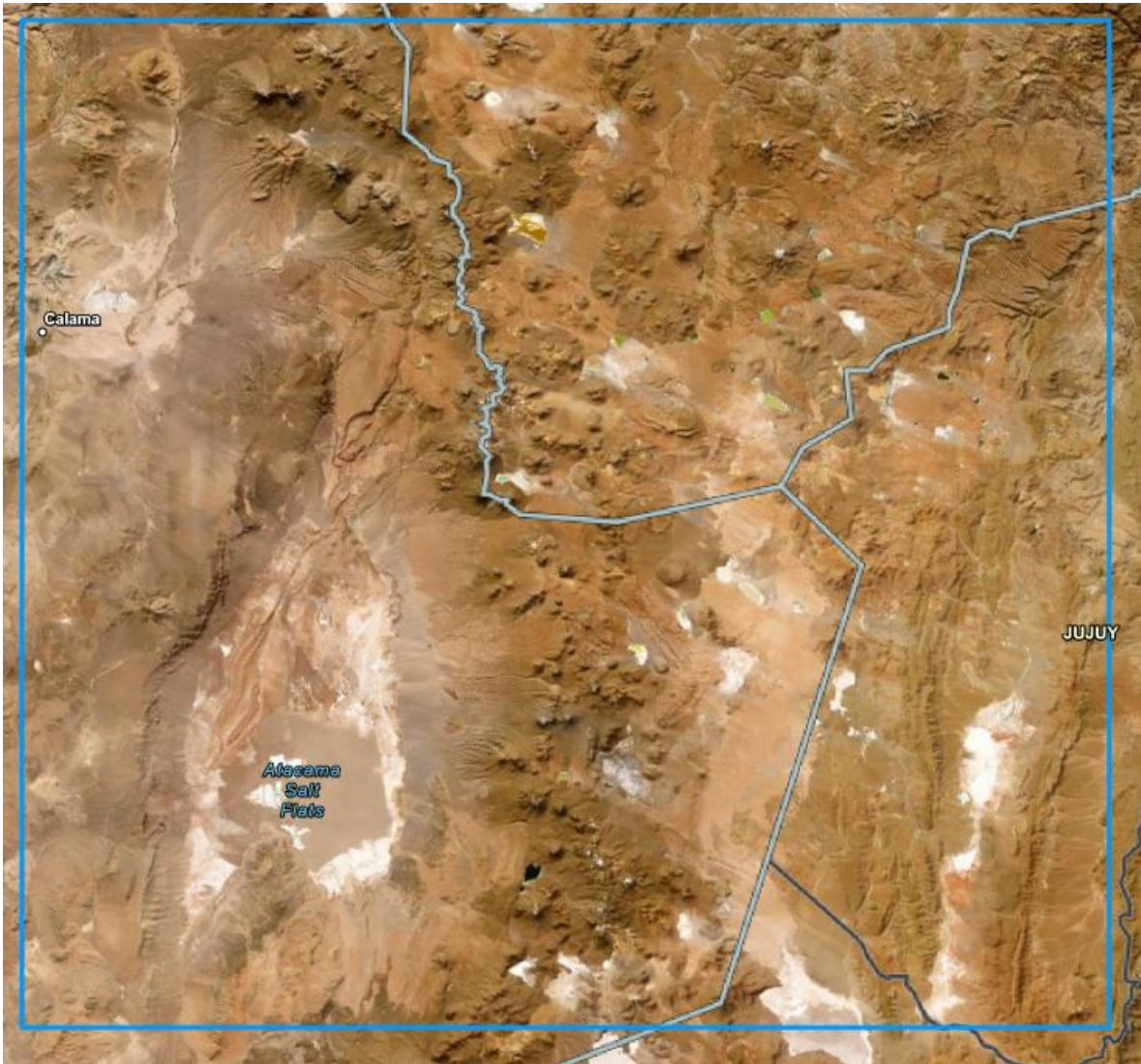


Figura 21 Dominio del área de estudio creado por Illumina.

Una vez finalizada la aplicación de ambos modelos, se verifica que los resultados que se obtuvieron para Skyglow correspondió a un promedio de  $1.8610 \times 10^{-4}$  Cd/m<sup>2</sup>, mientras que Illumina se obtuvo un promedio de  $1.8810 \times 10^{-4}$  Cd/m<sup>2</sup>.

### 6.2.3 Selección del modelo a utilizar para el recambio

Skyglow presenta características que permite un uso más sencillo en lo que es la utilización del software, gracias a su interfaz de usuario y de requerir poca información para modelación, solo requiriendo el realizar una mapa en el área de estudio y el conocer la cantidad de Watts/lúmenes que se encuentran a ser utilizados por la población a la cual se puede dar una cantidad de lúmenes por habitantes. Otra información requerida es la de las condiciones atmosféricas del área de estudio, pero debido a la falta de ingreso de información en áreas como la geografía y el brillo del cielo, los resultados que se obtienen son solamente en un plano sin ninguna obstrucción. En contraste, el modelo Illumina requiere de un usuario más avanzado para la utilización del software, además de requerir una mayor cantidad de datos (como es la geografía, la banda día/noche y el tomar en consideración las posibles obstrucciones que la luz artificial pueda encontrarse en su dispersión), así como el poder realizar una dispersión de segundo orden, lleva una obtención de resultados más realista de los efectos de la luz en la calidad de los cielos. Considerando esta información, junto a los valores obtenidos durante la modelación, se decidió trabajar con el modelo Illumina.

## **6.3 Proponer un recambio de luminarias que permita reducir la contaminación lumínica, evaluada a través del modelo seleccionado**

### 6.3.1 Revisión de las distintas luminarias disponibles en el mercado

El modelo Illumina tiene una lista de luces para el uso de modelación, las cuales son comúnmente utilizadas para distintos casos. Esto permite una serie de opciones que pueden ser posibles candidatos para la modelación del recambio de luminarias. En la tabla 5 se muestran distintas luminarias con sus respectivas características.

Tabla 5 Información de luminarias comunes de exterior, disponibles en la base de datos de Illumina.

<b>Luces</b>	<b>Eficiencia Lumínica (lumen/W)</b>	<b>CCT</b>	<b>Porcentaje de luz azul</b>	<b>Potencia (W)</b>
Sodio a alta presión (Helios)	85 lumen/W	2079K	8.3%	100W
Haluro metálico	275 lumen/W	4700K	31.7%	400W
LED blanca	75 lumen/W	4100K	29.2%	65W
LED Ámbar	61 - 100 lumen/W	1800K - 2200K	1.3% - 4.4%	40W -61W

En el artículo 6 del Decreto Supremo N°1 de 2022 del Ministerio del Medio Ambiente, punto número 3.1, se fija el límite de temperatura de color correlacionada para áreas de protección especial donde indica que, en la medida que se emplee tecnología de luz blanca, ésta no podrá exceder 2200 K, la que para las luminarias de la tabla 5 solo las LED ámbar se encuentran dentro de este límite, por lo cual son las seleccionadas para la proposición de recambio.

### 6.3.2 Aplicación del modelo con el recambio de las luminarias seleccionadas

En la modelación del recambio de las luminarias, se seleccionaron dos posibles opciones que pueden ser utilizadas al tener CCT de 1800 K y 2200 K. Se decidió realizar esta modelación con el peor caso posible, es decir, que la luz artificial no tenga posibilidad de chocar con un obstáculo, así el observador tendrá vista del efecto sin pérdidas debido a los choques con los obstáculos. Además, se dividió en dos escenarios, siendo el primero con cielos completamente claros y el segundo con el cielo completamente nublado, así obteniendo valores de radiancia ( $W/sr \cdot m^2$ ) para distintos espectros, los cuales fueron transformados a valores de brillo de cielo. Se inició la modelación con luces de sodio a alta presión para las ciudades de San Pedro de Atacama y Calama, con un observador a 15 kilómetros al este de San Pedro de Atacama. Los resultados se muestran en la tabla 6 para el caso de cielo claro y en la tabla 7 para el caso del cielo nublado.

Tabla 6 Modelación, a través de Illumina, de luces de sodio a alta presión en cielo claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	9,01331E-12	21,95
515	5,08738E-12	21,96
545	1,22753E-11	21,95
575	8,31809E-11	21,91
605	6,66827E-11	21,92
635	1,36001E-11	21,95
665	5,91478E-12	21,96
695	3,11399E-12	21,96
725	3,7676E-12	21,96

Tabla 7 Modelación, a través de Illumina, de luces de sodio a alta presión en cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	2,53968E-11	21,94
515	1,80676E-11	21,95
545	5,41394E-11	21,92
575	4,45682E-10	21,70
605	4,30001E-10	21,71
635	1,0317E-10	21,89
665	5,22138E-11	21,93
695	3,2025E-11	21,94
725	4,45182E-11	21,93

De la misma forma, se realizó las modelaciones para el recambio con luces ámbar, iniciando primero con las luces de 1800 K CCT y luego con las luces de 2200 K CCT, cuyos resultados se muestran en las tablas 8 a 11.

Tabla 8 Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 1800K en cielo claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	7,80015E-13	21,96
515	2,30869E-12	21,96
545	3,55831E-11	21,94
575	1,03953E-10	21,89
605	9,05508E-11	21,90
635	4,31541E-11	21,93
665	1,49954E-11	21,95
695	6,07752E-12	21,96
725	3,51792E-12	21,96

Tabla 9 Modelación , a través de Illumina,de luces ámbar 1800K en cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia(W/sr *m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	2,19785E-12	21,96
515	8,19922E-12	21,95
545	1,56937E-10	21,86
575	5,56976E-10	21,64
605	5,83914E-10	21,63
635	3,27363E-10	21,76
665	1,32375E-10	21,88
695	6,25027E-11	21,92
725	4,15679E-11	21,93

Tabla 10 Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 2200K en cielo claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	1,30639E-12	21,96
515	1,54671E-12	21,96
545	2,26945E-11	21,95
575	4,68232E-11	21,93
605	3,25609E-11	21,94
635	1,2059E-11	21,95
665	1,38254E-12	21,96
695	2,79927E-12	21,96
725	8,92548E-12	21,95

Tabla 11 Modelación, a través de Illumina, de luces ámbar 2200K en cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo del cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	3,68101E-12	21,96
515	5,49306E-12	21,96
545	1,00093E-10	21,90
575	2,50878E-10	21,81
605	2,09968E-10	21,83
635	9,14784E-11	21,90
665	1,22047E-11	21,95
695	2,87884E-12	21,96
725	1,05464E-10	21,89

Los resultados del recambio con las luces de 1800 K muestran mejoras en los espectros más bajos, pero muestran que el brillo del cielo aumenta en los valores centrales, volviendo a un brillo similar en los valores más altos. En cambio, las luces de 2200 K muestran una mejora en los valores bajos y los valores centrales en comparación con los resultados de las luces de sodio a alta presión en ambos casos. Con estos resultados se decidió continuar con la evaluación económica del recambio con las luces ámbar con CCT de 2200 K.

## **6.4 Evaluación económica del recambio de luminarias**

### **6.4.1 Inversión de capital (CAPEX)**

Para la evaluación económica, primero se necesita saber la cantidad de metros lineales de calle que se encuentran en San Pedro y la distancia en la que se encuentran luminarias antiguas para saber la cantidad de luminarias que se deberán adquirir para el recambio.

Utilizando el plano regulador de San Pedro, junto con Google Earth Pro, se pudo estimar que existen 30.750 metros de calle lineal y que la distancia promedio entre las luminarias antiguas es de 35,6 metros, lo que da un total de 864 luminarias. En 2020 se realizaron cambios del alumbrado público utilizando 109 luces LED, lo que reduce la cantidad total de luminarias a 755.

Se seleccionó las luminarias LED 2200 K para la evaluación, en la que se encontró el modelo Golonlite IP66<sup>6</sup> (Figura 22), producidas por la compañía Golon Manufacturing Co., Ltd. Esta luminaria se vende a un precio unitario de 30 USD en el rango de las 500 a 999 piezas; por lo que al necesitar 755 piezas, la inversión se estima en 22.650 USD o 21.391.566 CLP a la fecha de 23 de octubre de 2025. Junto a esto, el costo por hora de la mano de obra para trabajos a más de 6 metros de altura es de 75.168 CLP<sup>7</sup> por técnico, requiriendo el uso de un camión grúa por 40.000 CLP la hora. Por lo tanto, el recambio con

---

<sup>6</sup> <https://golon2010.en.made-in-china.com/product/bwuGfFRICHaj/China-IP66-Warm-White-Yellow-1700K-2000K-2200K-Amber-LED-Street-Light.html>

<sup>7</sup> <https://www.scribd.com/document/923696885/Costos-de-Mano-de-Obra-09-2025-EPAC-Copia>

un grupo de 2 técnicos más el camión, resulta en un costo de 190.336 CLP por hora que, con una jornada de 8 horas, resulta en un total de 1.522.688 CLP, con un promedio de 8 luminarias instaladas por jornada. Si se considera a 5 grupos, entonces se lograría un promedio de 30 luminarias instaladas por día, requiriendo así de 19 días para la instalación de las 755 luminarias por un total de 144.655.360 CLP. De esta forma, el costo total de inversión (CAPEX) estimado es de 166.046.926 CLP.



Figura 22 Golonlite IP66.

#### 6.4.2 Costos Operacionales (OPEX)

En los gastos operacionales se encuentra el consumo de electricidad de las luminarias. Por el cambio de luminarias, habrá una reducción desde 100 W por la luz de sodio a alta presión a 60 W por la luz LED ámbar. También se deben considerar los costos de mantenimiento de las luminarias para poder maximizar el tiempo de vida de estas. Para el control del alumbrado público se utilizan fotoceldas que detectan los cambios en la luz natural para el encendido y apagado según la norma técnica NSEG. 21 E. n. 78. Esto significa que durante el verano se tiene un promedio de 9,5 horas de encendido y en

invierno de 12,5 horas; no obstante, se usó un promedio de 11 horas de encendido para el cálculo de los gastos comparativos a continuación.

Antes del cambio, con un total de 109 luces LED a 60 W cada una y 755 luces de sodio a alta presión a 100 W por cada una, se estima un consumo total diario de 902,4 kWh, lo que a un costo de 741 CLP<sup>8</sup>/kWh, resulta en un costo de 668.708 CLP por día, o 20.061.241 CLP por mes. Después del recambio, se estima un valor total de 570,24 kWh, debido a que no hay un cambio en el tramo para los cargos, se obtiene un costo total mensual 12.676.435 CLP. De lo anterior, se observa que en términos de costos operacionales, el recambio se traduce en un potencial ahorro mensual de 7.384.805 CLP.

Según la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, en sus estudios de los estándares de calidad de servicios municipales garantizados de 2016, se estima un costo unitario anual de mantención de 120.000 CLP. Teniendo un total de 864 luminarias instaladas en la comuna, el costo de mantenimiento de todas las luminarias será de 103.680.000 CLP por año. Pero, debido a que este cálculo fue realizado con costos del año 2016, se deben actualizar estos costos a la fecha utilizando el IPC con la siguiente fórmula.

$$\text{valor 2025} = 103.680.000 * \frac{\text{IPC 2025 septiembre}}{\text{IPC 2016}}$$

donde

$$\text{IPC 2016} = 88,66$$

$$\text{IPC 2025 septiembre} = 129,41$$

Con estos valores se tiene un total estimado al 2025 de 151.333.507 CLP en costos anuales de mantención. En consecuencia, se estima un costo de operación (OPEX) anual de 303.450.727 CLP.

---

<sup>8</sup> <https://www.cespaenergia.cl/tarifas>

## 7 Discusión

En la última década se han realizado cambios en las luminarias a nivel mundial por diferentes razones, siendo uno de estos el controlar el brillo del cielo nocturno para el estudio astronómico. Además del uso que distintas culturas le dan a las estrellas, existen distintos métodos para la medición del brillo del cielo, y en este estudio se utilizaron dos métodos que son los software de modelación Skyglow e Illumina.

Debido a las características que se encuentran en el norte de Chile, el cuidado de los cielos nocturnos para los estudios astronómicos resulta de gran importancia, debido a que estos lugares representan una posibilidad al observar el espacio y los conocimientos que se pueden obtener gracias a las condiciones que se encuentran insertas en él. Junto a esto, el cielo nocturno también representa una necesidad para distintas culturas, pero debido a la utilización indiscriminada de la luz artificial, este uso se ha ido perdiendo a nivel mundial, también afectando a otras áreas debido a poco interés en estos casos.

### 7.1 Revisión de los modelos recomendados por el SEA

Los modelos recomendados por el SEA, aunque ambos tienen un mismo objetivo de modelar el brillo del cielo nocturno en base a datos obtenidos previamente, los datos que requieren ambos modelos y el cómo llevan a cabo esta modelación es bastante diferente el uno del otro. En el caso de Skyglow, el modelo requiere crear un polígono del área a estudiar y tener la información de emisiones que pueden ser base a la potencia utilizada, en watts o en lúmenes, o a la población total para realizar una estimación, junto a información de la atmósfera como la condición del cielo y aerosoles. También es posible agregar posibles obstrucciones con el software, ofreciendo obstáculos hacia el norte o el este. Por otro lado, Skyglow está listo para utilizar al descargar y descomprimir (lo más probable es que solo se necesite instalar Java). La interfaz de usuario permite un uso simple del software, mostrando cuáles son los datos que se introducen, sólo requiriendo una capacitación simple para entender su uso. Pero este modelo, por la cantidad de

información requerida, resulta en una modelación más simple que se aleja de la realidad debido al tener consideración simplificada los aspectos geográficos del área de estudio, además de solo poder calcular la dispersión en un primer orden.

Por otra parte, Illumina tiene requerimientos de información sobre el brillo nocturno en las fechas más cercanas al periodo temporal que se quiere estudiar, junto con información geográfica que le da a la modelación una confianza mayor en sus resultados. Esto también viene apoyado por la habilidad del modelo de poder calcular la dispersión en un segundo orden. Pero el uso del software implica una mayor dificultad para el usuario, esto debido a que Illumina no tiene una interfaz de usuario y todo el uso del software es en base a comandos que se deben realizar a mano. El desarrollador, para ayudar al usuario, disponibiliza una guía para facilitar su uso, pero aun así, durante la realización de este trabajo se encontraron dificultades, llevando a ensayos con el software hasta que se pudo utilizar según como se describió en la guía de usuario. Una de las posibles razones por la que, en general, no se selecciona Illumina sobre Skyglow es la necesidad de utilizar el sistema operativo Linux en vez de Windows. No obstante, desde la versión Windows 10, Microsoft da la posibilidad al usuario de instalar un subsistema de Linux dentro de su instalación de Windows, la que disponibiliza al usuario tener características de Linux que permiten el uso de software que originalmente solamente podía ser utilizado en este sistema operativo.

## **7.2 Recopilación de los datos del área de estudio**

Con los resultados obtenidos de los datos del área de estudio, se pudo observar que la geomorfología del Llano de Chajnantor, le permite tener una barrera natural que la protege de los efectos de la luz artificial, de tal forma que los resultados de las modelaciones muestran que los efectos que llegan son mínimos. Con la información que se obtuvo de las modelaciones, se puede considerar que los efectos que San Pedro tiene en el brillo del cielo nocturno son muy bajos, aún a distancias de 15 kilómetros, teniendo además en cuenta a Calama. Estos efectos aislados no son suficiente evidencia para decir que estas comunas son el problema que las organizaciones que tienen sus instalaciones en

el Parque Astronómico Atacama advierten por el aumento del brillo del cielo nocturno, por lo que existe la posibilidad de que otros actores que no fueron abarcados dentro de este estudio sean los posibles constituyentes del problema, o que el conjunto integrado de estos genere estos efectos.

### **7.3 Proponer un recambio de luminarias que permita reducir la contaminación lumínica, evaluada a través del modelo seleccionado**

En la modelación del recambio de luminarias, uno de los efectos que se pudo apreciar fue los efectos que las características y distribución de ciertas lámparas tuvieron al momento de ser modeladas, ya que se esperaba observar una disminución de los efectos de la luz artificial con el solo cambio de las luminarias antiguas por las nuevas, pero en la mayoría de los casos modelados, el alumbrado antiguo mostró tener mejor capacidad de mantener bajo el brillo nocturno, debido a la intensidad que tiene está en el espectro lumínico, en comparación con las demás.

En el caso de las luces LED que se encontraban a un CCT similar, las diferencias de estas pueden ser atribuidas al modelo del diodo que es utilizado en la luminaria en sí, debido a que se podían observar diferencias en los valores que se obtenían de los resultados de las modelaciones. Cabe destacar que se complementó la modelación con otras lámparas, sus resultados no fueron consideradas para este trabajo, sin embargo éstas se pueden encontrar en el anexo 10.1.

En este estudio sólo se consideraron los efectos que la luz artificial genera en el área de estudio, pero esto solo toma en cuenta lo que es el alumbrado público, sin tener en consideración los posibles efectos que son provenientes de otras estructuras, así como la iluminación privada que ha sido instalada por la población. Además de esto, existen técnicas que pueden ayudar a concentrar la iluminación en los lugares que son necesarios, o la posibilidad de tecnologías que permitan el uso de la luz artificial cuando sea necesaria.

Estas posibilidades pueden ser abarcadas en futuros estudios. Complementariamente, en el anexo 10.2 se encuentran los posibles efectos del crecimiento de San Pedro de Atacama con un observador a 15 kilómetros para observar el aumento del brillo del cielo con una expansión con un radio de 2 kilómetros en San Pedro de Atacama, observándose que el efecto es significativo con el escenario actual.

#### **7.4 Evaluación económica del recambio de luminarias**

Para la obtención de la información de los metros lineales que se encuentran en la ciudad de San Pedro de Atacama (anexo 10.3), se utilizó el plano regulador que se encuentra en la página de la municipalidad, en el cual se utilizó el área marcada para los usos de suelo de la comuna, dejando fuera espacios que en las imágenes muestran que ha habido una expansión de la ciudad, la cual no se encuentra considerada dentro del plan.

Considerando las inversiones que se realizaron en 2020 de 57.747.075 CLP contra la inversión que se calculó en este trabajo de 166.046.926 CLP, se muestra que esta proposición es beneficiosa, debido a que, con una cantidad un poco mayor al triple del gasto inicial de recambio realizado anteriormente, se puede realizar una compra siete veces mayor al realizado en ese proyecto.

Debido a la disminución de la cantidad de watts por el recambio de luminarias, se logra una disminución de un 37% de los gastos por electricidad mensual, lo que permitiría una recuperación de la inversión en un corto tiempo.

Por los valores económicos altos para una comuna rural como San Pedro de Atacama, el cambio paulatino permitiría una facilidad en la aplicación de la propuesta pudiendo la municipalidad buscar iniciativas de financiamiento que pueda abrir, al menos parcialmente, la inversión inicial requerida.

## 8 Conclusión

Se analizaron los modelos recomendados por el SEA, lo que permitió entender la teoría utilizada para los cálculos de los modelos y cómo estos obtienen sus resultados para la modelación de la contaminación lumínica.

Se logró seleccionar el modelo matemático más adecuado entre los recomendados por el SEA mediante su aplicación en el área de estudio, tomando en cuenta cómo los resultados se diferencian entre ambos. Además, se realizó una comparación de las características y las dificultades del uso de ambos software, estableciéndose que se utilizaría el modelo Illumina para los siguientes objetivos.

Se pudo proceder a la modelación del área de estudio con un recambio de luminarias, que mostraron una disminución del brillo del cielo nocturno en comparación con los resultados de la modelación antes del recambio.

Se realizó el cálculo de la inversión de capital necesaria para el recambio de luminarias, contando con la cantidad de luces que deben ser compradas en base a la cantidad de metros lineales de calle, además de la contratación de profesionales y maquinarias para la instalación de estas. Junto a los gastos iniciales, se calcularon los gastos operacionales a través del gasto eléctrico de las luminarias de recambio y los costos de mantención anuales.

Los software de modelación utilizados en este trabajo nos permiten simular los efectos de fenómenos para predecir el comportamiento de la luz artificial en la realidad. Esto permite lograr un balance en la salud de las personas y el medio ambiente, junto con la necesidad de la utilización de elementos para la realización de actividades que pueden generar impacto.

## 9 Referencias Bibliográficas

Aubé M., Franchomme-Fosse 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. Proc. SPIE, 5890, Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring, 589012. <https://doi.org/10.1117/12.615405>

Aubé, M., & Kocifaj, M. (2012). Using two light-pollution models to investigate artificial sky radiances at Canary Islands observatories. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425(1), 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20664.x>

Aubé, M., & Simoneau, A. (2018). New features to the night sky radiance model Illumina: Hyperspectral support, improved obstacles and cloud reflection. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 211, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.02.033>

Aubé M., Simoneau A., Munoz-Tunon C., Díaz-Castro J., Serra-Ricart M. (2020). Restoring the night sky darkness at Observatorio del Teide: First application of the model Illumina version 2. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 497. 2501-2516. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa2113>

Aubé M., Simoneau A., Linares A. (2022). Illumina User Guide v2.2. <http://obsand.org/wiki/index.php?n=Prof.IlluminaGuidev22>

Aulsebrook, A. E., Jones, T. M., Mulder, R. A., & Lesku, J. A. (2018). Impacts of artificial light at night on sleep: A review and prospectus. Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 329(8–9), 409–418. <https://doi.org/10.1002/jez.2189>

Bará, S., & Falchi, F. (2023). Artificial light at night: A global disruptor of the night-time environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1870), 20220352. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0352>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). Clima y vegetación Región de Antofagasta. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region2/clima.htm>

Birkes D., Dodge Y. *Alternative Methods of Regression*. EEUU, John Wiley & Sons, 1993, 231p ISBN: 978-0-471-56881-0

Centro de Información de Recursos Naturales. (2016). Clima. II Región de Antofagasta. Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos (SITHA). Ministerio de Agricultura de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/04264c04-63b3-475a-a8ba-d86d10770f2f/content>

Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: Health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives*, 117(1), A20–A27. [https://www.researchgate.net/publication/271020677\\_Why\\_VIIRS\\_data\\_are\\_superior\\_to\\_DMSP\\_for\\_mapping\\_nighttime\\_lights](https://www.researchgate.net/publication/271020677_Why_VIIRS_data_are_superior_to_DMSP_for_mapping_nighttime_lights)

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel. 596 paginas ISBN13: 9788434434981

Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D. (2001). Naked-eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 323, 34–46

Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., & Hsu, F. C. (2017). Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35(1), 62–69.

[https://www.researchgate.net/publication/271020677\\_Why\\_VIIRS\\_data\\_are\\_superior\\_to\\_DMSP\\_for\\_mapping\\_nighttime\\_lights](https://www.researchgate.net/publication/271020677_Why_VIIRS_data_are_superior_to_DMSP_for_mapping_nighttime_lights)

ESA. (s.f.). Historia de la observación terrestre. Eduspace ES. Recuperado de [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMZQYD3GXF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMZQYD3GXF_0.html)

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., 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. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

FlyPix. (s.f.). De los globos a los satélites: la evolución de la teledetección. Recuperado de <https://flypix.ai/es/blog/from-balloons-to-satellites-a-journey-through-the-evolution-of-remote-sensing-and-satellite-imagery-resolution//>

Garstang R. H. (1984). Improved scattering formula for calculations of artificial night-sky illumination. *Observatory* 104, 196-197

Gómez, F. (s.f.). La contaminación lumínica: un problema ambiental y social. Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Recuperado de <https://revista.iaa.csic.es/content/la-contaminaci%C3%B3n-lum%C3%ADnica>

Hudson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

Jechow, A., Hölker, F., & Kyba, C. C. M. (2019). Using all-sky photometry to investigate how nocturnal cloud cover amplifies the effects of light pollution. *Journal of Imaging*, 5(5), 54. <https://doi.org/10.3390/jimaging5050054>

Jechow, A., *et al.* (2020). Measuring light pollution with fisheye lens imagery from a moving boat, a proof of concept. arXiv. <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2011.03441>

Kinzey, B. R., Perrin, T. E., Miller, N. J., Kocifaj, M., Aubé, M., & Lamphar, H. A. (2017). An investigation of LED street lighting's impact on sky glow (PNNL-26411). Pacific Northwest National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1418092>

Kocifaj M. (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. <http://doi.org/10.1364/AO.46.003013>

Kocifaj M. (2014). Night sky luminance under clear sky conditions: Theory vs. experiment. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 139, 43-51

Lakicević, M., Kimeswenger, S., Noll, S., Kausch, W., Unterguggenberger, S., & Kerber, F. (2016). Study of the atmospheric conditions at Cerro Armazones using astronomical data. *Astronomy & Astrophysics*, 588, A32. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527973>

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (2023). Decreto Supremo N° 2: Declara áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1193763>

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Ley N° 21.162: Modifica la Ley N° 19.300. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1133780>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2020). Guía para la gestión de la contaminación lumínica en Chile. <https://mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente (2022). Decreto Supremo N° 1: Establece norma de emisión de luminosidad artificial. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1197027>

Muciza. (s.f.). Contaminación lumínica: El cielo perdido. Recuperado de <https://muciza.com.mx/project/pp-ma-128-ha-contaminacion-luminica-el-cielo-perdido>

Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC). (2014). Manual de buenas prácticas de iluminación para la protección del cielo nocturno. Recuperado de <https://www.opcc.cl>

Perea Moreno, A. J. (2016). Contaminación lumínica: causas, consecuencias y soluciones [Trabajo final de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <http://hdl.handle.net/2117/95964>

Rich, C., & Longcore, T. (Eds.). (2006). Ecological consequences of artificial night lighting. Island Press. ISBN: 9781559631297

Roby, J., & Aubé, M. (2021). LSPDD: Lamp spectral power distribution database. Recuperado de <https://lspdd.org/>

Sánchez de Miguel, A., *et al.* (2022). Light pollution in Spain: A spatio-temporal analysis using all-sky brightness maps and satellite data. arXiv. <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2203.09322>

Servicio de Evaluación Ambiental. (2024). Criterio de evaluación en el SEIA: Criterios para determinar la susceptibilidad de afectar áreas astronómicas (Primera edición). <https://www.sea.gob.cl>

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). (2016, 30 mayo). Estudio de identificación de los estándares básicos de calidad de servicios municipales garantizados (Licitación ID 761-38-LP15) [Informe final]. [https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/identificacion\\_de\\_los\\_estandares\\_basicos\\_de\\_calidad\\_-\\_servicios\\_municipales\\_garantizados\\_1.pdf](https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/identificacion_de_los_estandares_basicos_de_calidad_-_servicios_municipales_garantizados_1.pdf)

Stenvers, D. J., van Dorp, R., Foppen, E., Mendoza, J., Opperhuizen, A. L., Fliers, E., ... Deboer, T. (2016). Dim light at night disturbs the daily sleep-wake cycle in the rat. *Scientific Reports*, 6, 35662. <https://doi.org/10.1038/srep35662>

Vilches Delgado, C. (2022). Climático aeronáutico: FIR Antofagasta [Informe técnico]. Dirección Meteorológica de Chile.

Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063)

## 10 Anexos

### 10.1 Anexo: Resultados de modelaciones de Luces LED no seleccionadas

Las presentes tablas son los resultados obtenidos de modelaciones luces LED las cuales no fueron seleccionadas durante el trabajo debido a que no mostraban mejoras en comparación con las luces de sodio a alta presión.

Tabla 12 A. Resultado modelación Luces LED 3000K Cielo Claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	1,48018E-11	21,95
515	4,33602E-11	21,93
545	6,66462E-11	21,92
575	6,90387E-11	21,92
605	6,27357E-11	21,92
635	4,1511E-11	21,93
665	1,92621E-11	21,95
695	9,53709E-12	21,95
725	6,28067E-12	21,96

Tabla 13 A. Resultados modelación luces LED 3000K cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	4,1707E-11	21,93
515	1,53992E-10	21,86
545	5,41394E-11	21,92
575	3,69908E-10	21,74
605	4,04549E-10	21,72
635	3,14899E-10	21,77
665	1,7004E-10	21,85
695	9,80818E-11	21,90
725	7,42127E-11	21,91

Tabla 14 A. Resultados modelación luces LED 4000K cielo claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	2,00167E-11	21,95
515	5,37459E-11	21,93
545	8,97946E-11	21,90
575	8,6878E-11	21,90
605	6,23978E-11	21,92
635	3,27726E-11	21,94
665	1,32193E-11	21,95
695	6,26857E-12	21,96
725	4,19058E-12	21,96

Tabla 15 A. Resultados modelación luces LED 4000K cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	5,64011E-11	21,92
515	1,90876E-10	21,84
545	3,96034E-10	21,73
575	4,6549E-10	21,69
605	4,0237E-10	21,72
635	2,48611E-10	21,81
665	1,16696E-10	21,89
695	6,44675E-11	21,92
725	4,95162E-11	21,93

Tabla 16 A. Resultados modelación luces LED ambar 2700K cielo claro.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	4,76514E-12	21,96
515	4,66576E-12	21,96
545	4,94882E-11	21,93
575	9,15268E-11	21,90
605	5,42364E-11	21,92
635	1,90707E-11	21,95
665	5,46458E-12	21,96
695	2,00623E-12	21,96
725	9,49796E-12	21,95

Tabla 17 A. Resultados modelación luces LED ambar 2700K cielo nublado.

Onda (nm)	Radiancia (W/sr*m <sup>2</sup> )	Brillo de cielo (mag/arcsec <sup>2</sup> )
485	1,34267E-11	21,95
515	1,65703E-11	21,95
545	2,18264E-10	21,82
575	4,90399E-10	21,68
605	3,49741E-10	21,75
635	1,44669E-10	21,87
665	4,82396E-11	21,93
695	2,06326E-11	21,95
725	1,12228E-10	21,89

## 10.2 Anexo: Resultados de modelación del aumento de contaminación lumínica en base a la expansión de San Pedro de Atacama

A continuación se presentan los resultados de la modelación del aumento de la contaminación lumínica debido a la expansión urbanística de San Pedro de Atacama, tomando una zona circular que se expande 2km por modelación.

Tabla 18 A. Resultados modelación de Expansión (Km) vs Radiancia ( $W/sr \cdot m^2$ ) en distintas ondas (nm).

Onda (nm)	2 km	4 km	6 km	8 km	10 km
485nm	1,84123E-12	7,5238E-12	1,72166E-11	3,50837E-11	6,18581E-11
515nm	2,17771E-12	8,89303E-12	2,03093E-11	4,13314E-11	7,26155E-11
545nm	3,19452E-11	1,3047E-10	2,97688E-10	6,05394E-10	1,06151E-09
575nm	6,59303E-11	2,69492E-10	6,14599E-10	1,24935E-09	2,18778E-09
605nm	4,5843E-11	1,87438E-10	4,27209E-10	8,68035E-10	1,51789E-09
635nm	1,69427E-11	6,91232E-11	1,57167E-10	3,18922E-10	5,55837E-10
665nm	1,93861E-12	7,89158E-12	1,79042E-11	3,62877E-11	6,30598E-11
695nm	3,94534E-13	1,61684E-12	3,68342E-12	7,48043E-12	1,30552E-11
725nm	1,25928E-11	5,1688E-11	1,17823E-10	2,39335E-10	4,17829E-10

Tabla 19 A. Resultados modelación de Expansión (Km) vs Brillo del cielo (mag/arcsec<sup>2</sup>) en distintas ondas (nm).

Onda	2 km	4 km	6 km	8 km	10 km
485nm	21,96	21,96	21,95	21,94	21,92
515nm	21,96	21,95	21,95	21,93	21,91
545nm	21,94	21,88	21,78	21,62	21,42
575nm	21,92	21,80	21,62	21,35	21,04
605nm	21,93	21,84	21,71	21,50	21,25
635nm	21,95	21,92	21,86	21,77	21,64
665nm	21,96	21,95	21,95	21,94	21,92
695nm	21,96	21,96	21,96	21,96	21,95
725nm	21,95	21,93	21,88	21,81	21,71

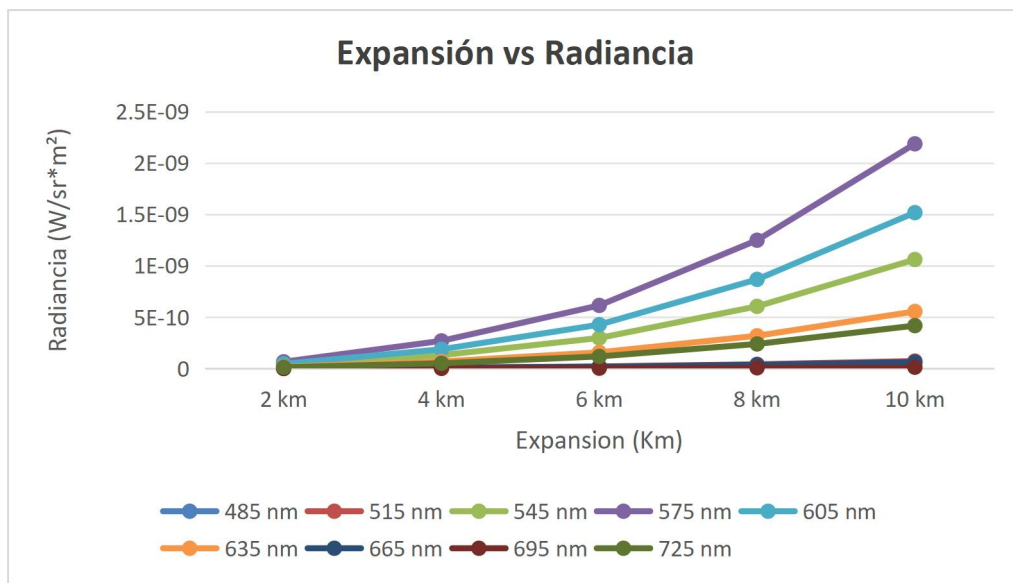


Figura 23 A. Gráfico Expansión vs Radiancia total.

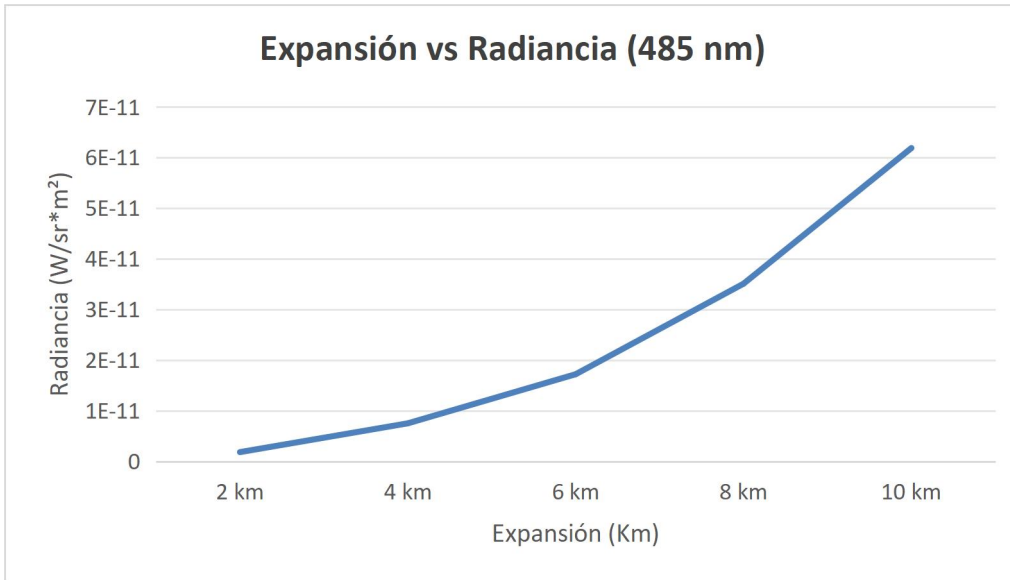


Figura 24 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 485 nm

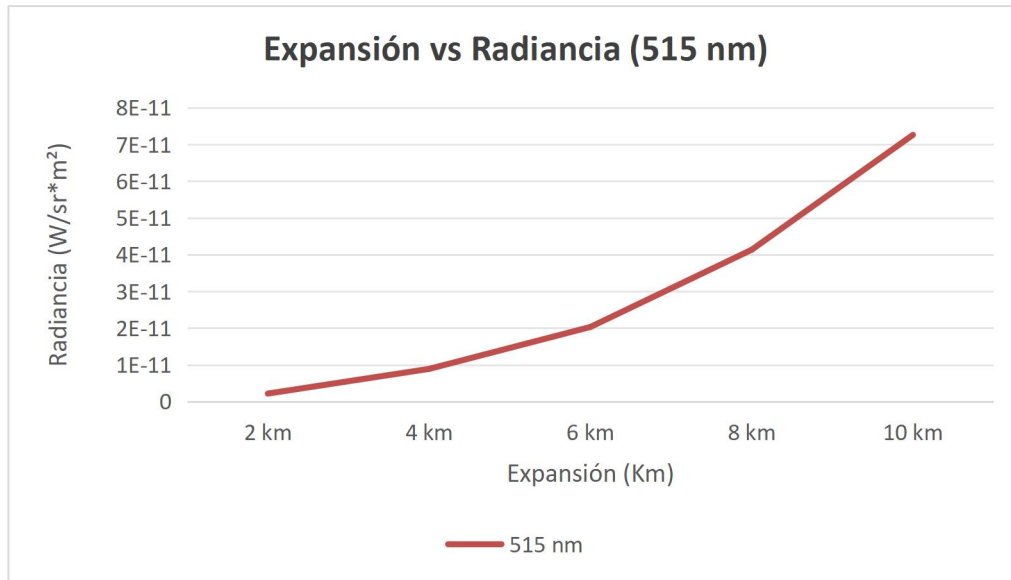


Figura 25 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 515 nm.

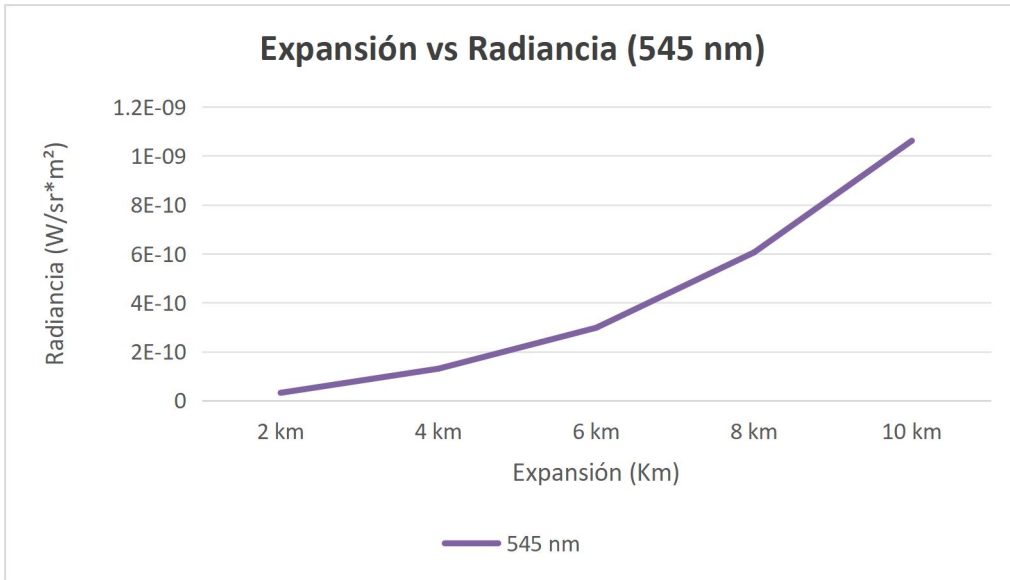


Figura 26 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 545 nm.

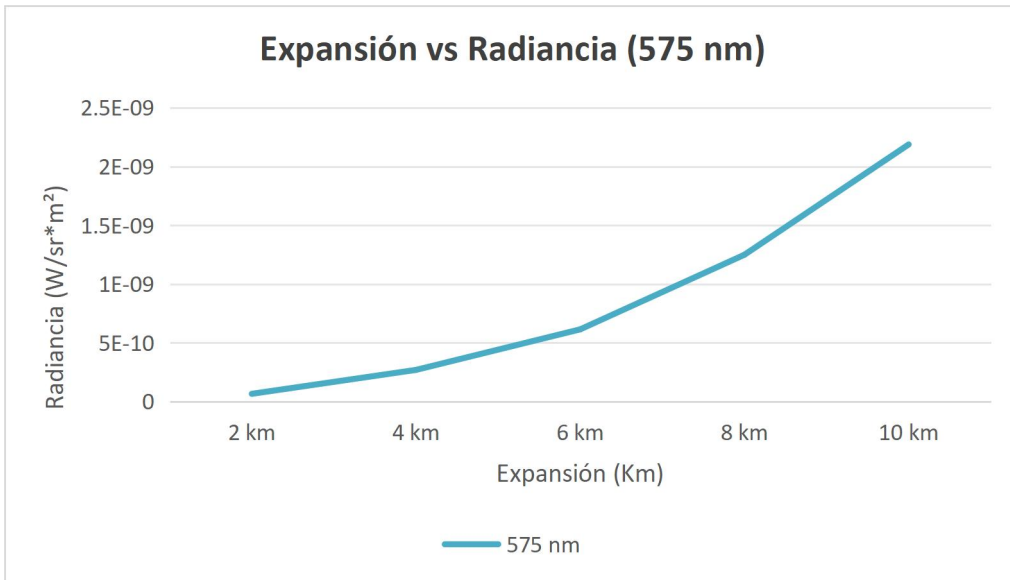


Figura 27 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 575 nm.



Figura 28 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 605 nm.

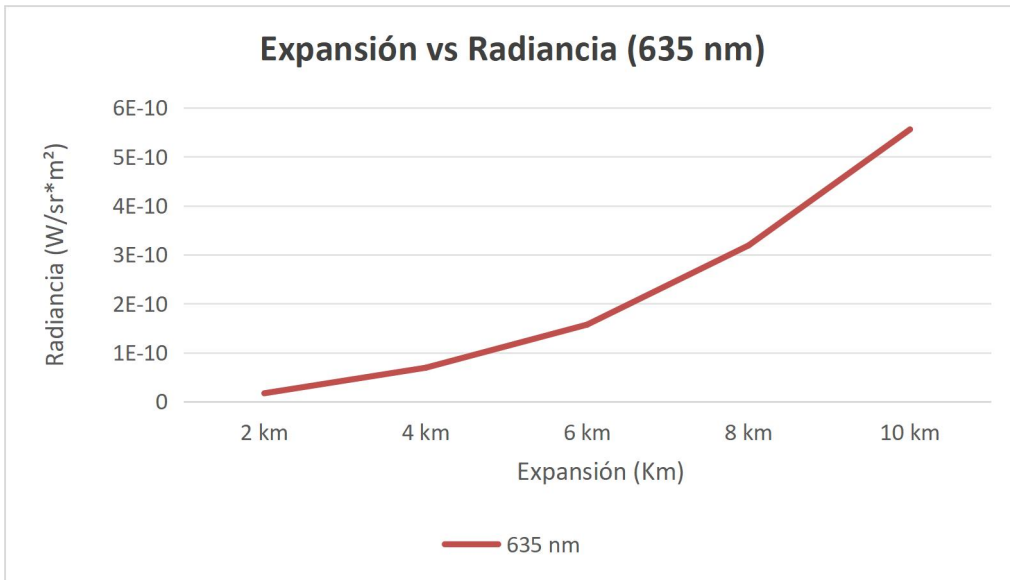


Figura 29 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 635 nm.

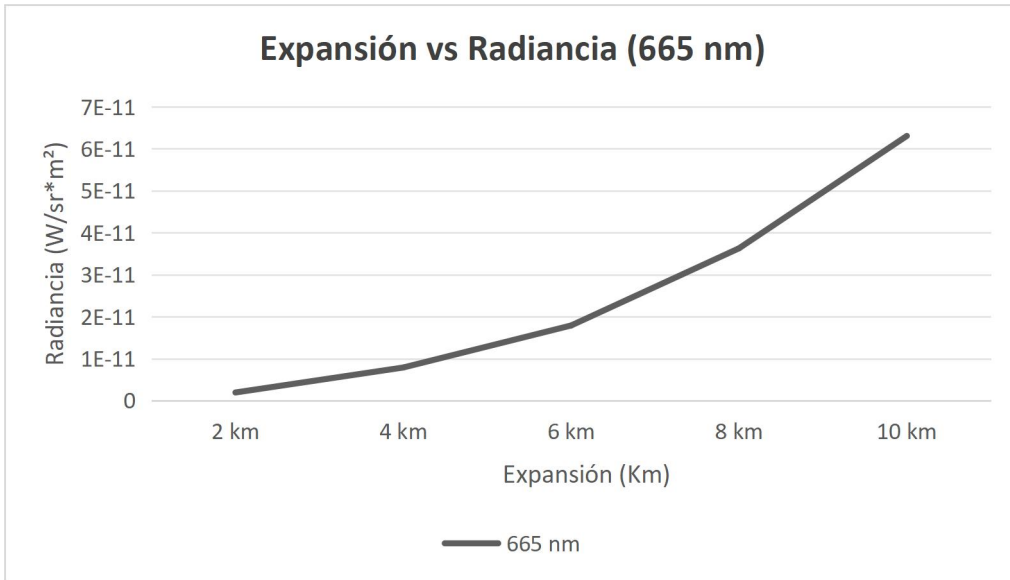


Figura 30 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 665 nm.



Figura 31 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 695 nm.

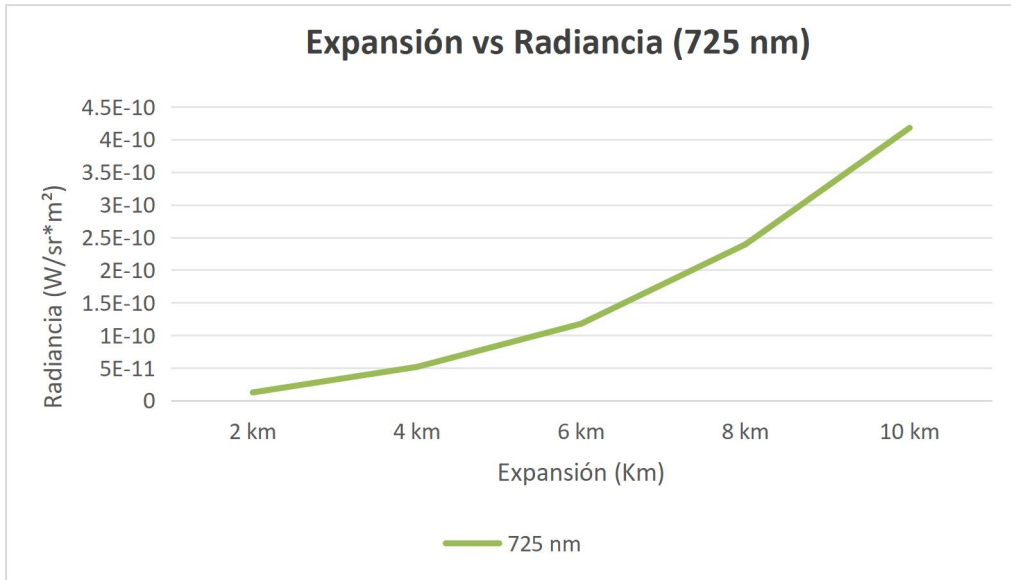


Figura 32 A. Gráfico Expansión vs Radiancia en 725 nm.

### 10.3 Anexo: Mapa para el cálculo de metros lineales de San Pedro de Atacama

El mapa del plano regulador de San Pedro de Atacama superpuesto en Google Earth Pro, el cual se utilizó para poder medir los metros lineales de calle que se encuentran en la comuna.

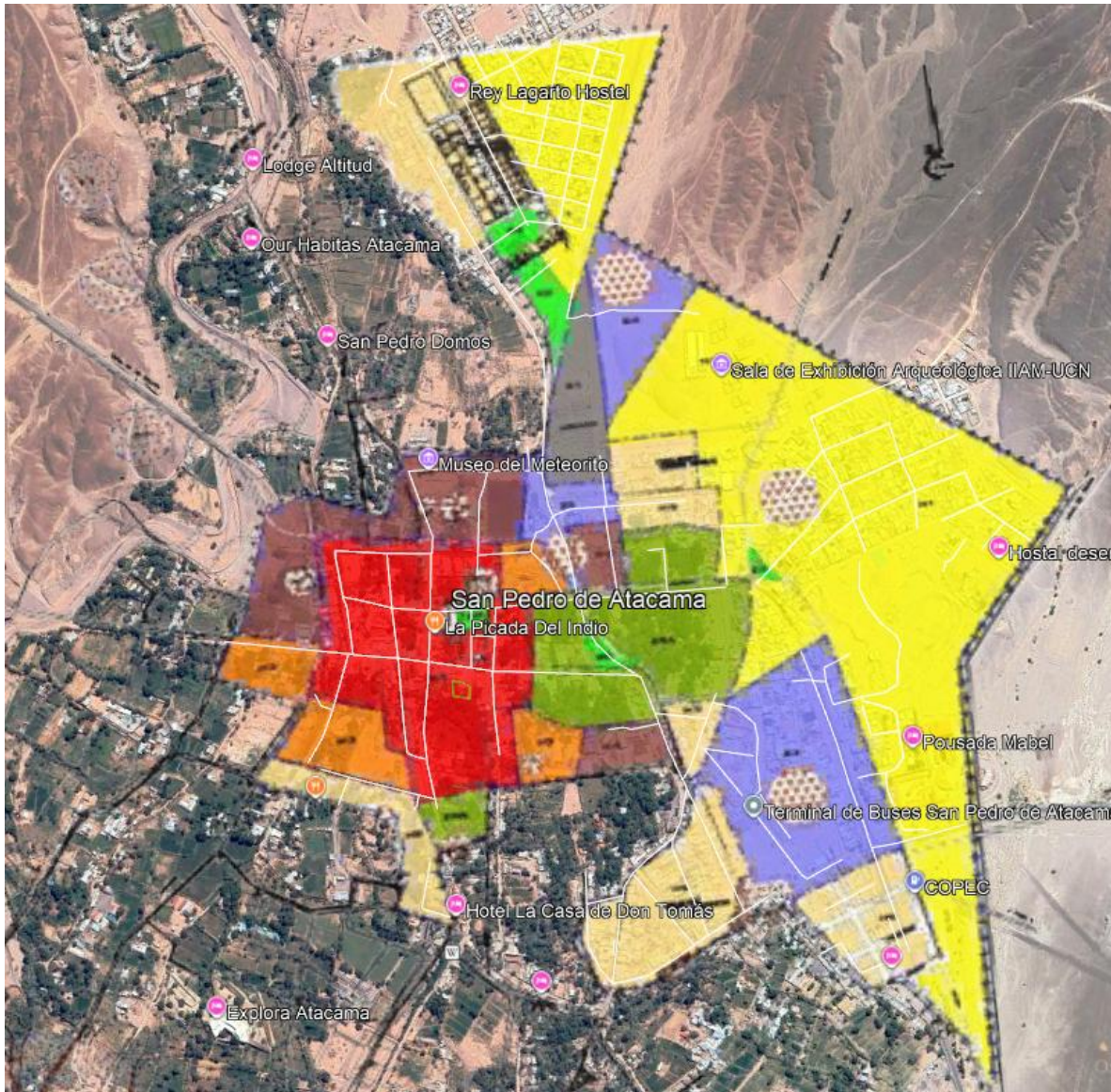


Figura 33 A. Superposición del plano regulador en Google Earth.