

# Propuesta de Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica

Comisión Asesora Ministerial de Áreas con Valor Científico  
y de Investigación para la Observación Astronómica.

04 de febrero de 2021

## Resumen ejecutivo

El laboratorio natural del desierto de Chile entrega uno de los mejores cielos del planeta para el estudio del Universo. Esta tremenda ventaja comparativa, unida a una primera coordinación de actores institucionales realizada por el Estado de Chile durante el siglo XX, fue la que atrajo la llegada de consorcios internacionales con gran infraestructura para la astronomía a nuestro país. Desde hace ya más de 60 años, se han instalado en las regiones de Antofagasta y Coquimbo los observatorios más grandes del mundo. Con una inversión extranjera que superará en esta década los 8.000 millones de dólares, el país se transformará en la primera potencia mundial para la observación astronómica en telescopios ópticos e infrarrojos.

Los beneficios que entrega el desarrollo científico del laboratorio natural se han extendido aceleradamente. La política inicial y visionaria que entrega un porcentaje del tiempo de observación de los telescopios a la comunidad científica nacional, ha permitido el crecimiento exponencial de esta, que actualmente abarca una masa crítica de más de 1000 personas, repartidas en más de 18 universidades a lo largo del país, logrando la participación de los grupos nacionales en descubrimientos a nivel mundial. En las últimas décadas, varias instituciones han armado laboratorios de astroingeniería, mediante los cuales han podido participar en la construcción de instrumentación para los grandes telescopios, con la consecuente generación de un recurso técnico altamente capacitado en otras disciplinas. De esta manera, la ventaja comparativa se transforma en una ventaja competitiva.

Sin embargo, la generación continua y creciente de dichos beneficios, depende directamente de la sustentabilidad y sostenibilidad en el tiempo del laboratorio natural, y en el caso de la astronomía, el aumento de la contaminación lumínica se ha transformado en un peligro que en el corto o mediano plazo puede dejar a Chile fuera de la competencia internacional.

El trabajo de esta Comisión se enmarca en la Ley N° 21.162, de 2019, que modificó la Ley de Bases Generales de Medio Ambiente y la ley que creó el Ministerio Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. La misión recibida fue definir criterios para establecer un conjunto de “áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica” y hacer una propuesta de cuáles son éstas en Chile. Este cometido contribuirá a proteger nuestro laboratorio natural, según establece la modificación a la Ley de Bases Generales de Medio Ambiente, frente a la amenaza de nuevos proyectos que pudieran introducir contaminación lumínica. Al mismo tiempo, por iniciativa del Ministerio de Medio Ambiente, estas áreas gozarán de una protección especial en la nueva Norma de Contaminación Lumínica.

Para realizar esta tarea, la Comisión solicitó insumos de información a los observatorios presentes en Chile; a las universidades con unidades académicas activas en astronomía; y a expositores nacionales e internacionales, expertos en materias de contaminación lumínica. Estos insumos de información se usaron para levantar un catastro de los observatorios profesionales instalados en Chile hasta el momento, así como de otros sitios de interés para el desarrollo de los mismos o para la ejecución de tareas de apoyo a la investigación astronómica realizada en Chile. El resultado claro fue que estos sitios de interés astronómico se encuentran

distribuidos principalmente en tres aglomeraciones, que se denominan: Antofagasta Costa, Antofagasta Interior y Atacama-Coquimbo.

Luego, la Comisión definió los criterios para evaluar cada uno de los grupos definidos anteriormente, esperando que estas áreas tuvieran una evaluación positiva en: Infraestructura para la observación astronómica; Condiciones geográficas y atmosféricas; Producción científica; Impacto en la comunidad científica nacional; Potencial científico futuro; Sinergia con planes regionales; y Sinergia con iniciativas nacionales e internacionales. Se elaboró una descripción de las áreas identificadas, ilustrando cómo cada una de ellas cumple con estos criterios.

Por último, se tomaron en cuenta las recomendaciones internacionales sobre los radios de protección para zonas de observación astronómica, así como también las mediciones de contaminación lumínica de los observatorios en Chile, para determinar un radio de protección de 150 kilómetros alrededor de cada observatorio. No obstante, dada la complejidad de fiscalizar e implementar la norma únicamente en base a la geometría generada por el radio de protección, la Comisión propone, acogiendo una sugerencia del Ministerio de Medio Ambiente, utilizar las divisiones comunales como fronteras de las áreas de protección. De esta manera, toda comuna que tenga alguna parte de su territorio dentro del radio de protección para un observatorio, estará sujeta completamente al área de protección.

El resultado final del proceso descrito es que la Comisión propone que la Región de Antofagasta, con excepción de la comuna de Tocopilla; la región de Atacama con excepción de las comunas de Chañaral y Diego de Almagro; y la región de Coquimbo, con excepción de la comuna de Los Vilos, sean consideradas como Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica.

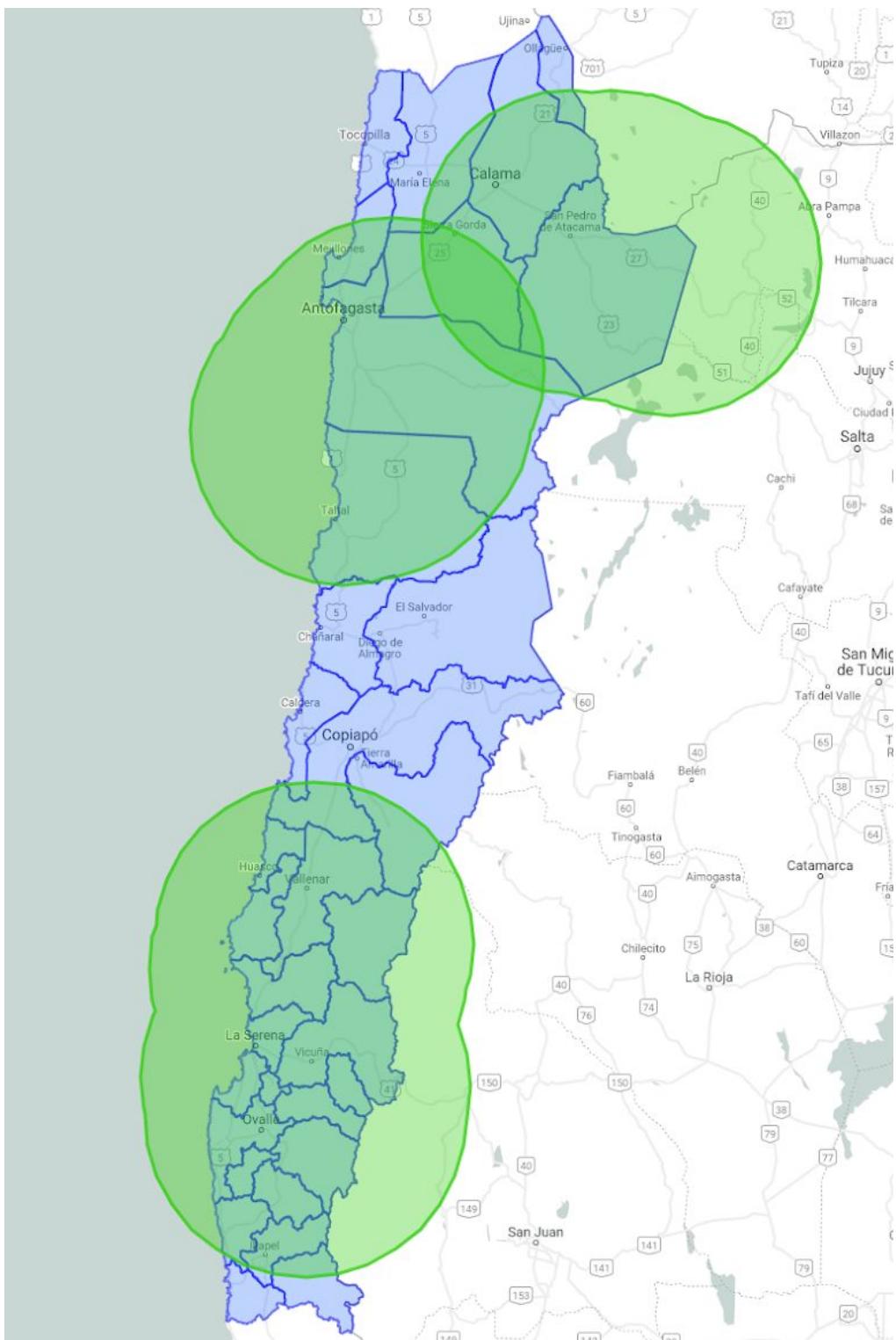


Figura resumen: “Áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica” propuestas por la Comisión Asesora Ministerial de Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica. Éstas son áreas que, en el marco de la Ley 21.162, la Comisión considera que deben gozar de una protección especial frente a la amenaza de la contaminación lumínica, por su especial interés para el desarrollo de investigaciones astronómicas de primer nivel mundial.

# Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
<b>2. La Comisión</b>	<b>8</b>
2.1. Conformación	8
2.2. Objetivos	8
<b>3. Marco conceptual de este trabajo</b>	<b>9</b>
3.1. Los cielos del norte de Chile como parte de un laboratorio natural	9
3.2. Infraestructura para grandes ciencias	10
3.3. Contaminación lumínica y nueva norma	12
<b>4. Propuesta de áreas</b>	<b>16</b>
4.1. Tipos de posibles Sitios Astronómicos en Chile	16
4.2. Criterios para calificar como Área Astronómica	17
4.2.1. Criterio general	17
4.2.2. Criterios específicos	17
4.3. Cálculo de un Área Astronómica	19
4.3.1. Radio de un Área Astronómica	20
4.3.2. Consideraciones prácticas para fines de fiscalización	24
4.4. Catálogo de Áreas Astronómicas propuestas	25
4.4.1. Antofagasta Costa	25
4.4.2. Antofagasta Interior	29
4.4.3. Atacama-Coquimbo	33
4.4.4. Propuesta final	37
<b>5. Recomendaciones adicionales</b>	<b>38</b>
5.1. Periodicidad en la revisión de estas áreas	38
5.2. Región de Atacama	38
5.3. Contaminación por constelaciones de satélites	40
5.4. Contaminación en emisión en radio	40
<b>6. Créditos y agradecimientos</b>	<b>42</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>8. Anexo</b>	<b>44</b>

# 1. Introducción

El 11 de julio de 2018 el honorable José Miguel Castro, diputado por la Región de Antofagasta, con asesoría del doctor Eduardo Unda-Sanzana, de la Universidad de Antofagasta, ingresó en la Cámara de Diputadas y Diputados una moción (boletín 11912-12) con objeto de modificar la ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, para exigir la elaboración de un estudio de impacto ambiental en los proyectos que puedan generar contaminación lumínica en zonas de desarrollo astronómico. La moción, que contó también con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, por medio de la subsecretaria Carolina Torrealba y del Director del Programa de Astronomía de la entonces CONICYT, doctor Luis Chavarría, además del Ministerio del Medio Ambiente, de la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS) y de los observatorios internacionales Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), Las Campanas Observatory (LCO), European Southern Observatory (ESO) y Giant Magellan Telescope (GMT), por medio de la Oficina de Protección de los Cielos del Norte de Chile (OPCC), fue votada favorablemente en ambas cámaras, eventualmente dando lugar el 15 de julio de 2019 a la publicación en el Diario Oficial de la Ley N° 21.162.

La Ley N° 21.162 introduce en la Ley N° 19.300 la “luminosidad artificial” como una fuente de contaminación relevante en las “áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica”. El texto refundido de la Ley 19.300 define en su artículo 2, letra d, que “contaminante” es:

*d) Contaminante: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, **luminosidad artificial** o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental;*

mientras que en su artículo 11 especifica que:

*Artículo 11.- Los proyectos o actividades enumerados en el artículo precedente requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes efectos, características o circunstancias:*

[...]

*d) Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y **áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica**, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar;*

Finalmente, la Ley N° 21.162 modifica también el artículo 4 de la Ley N° 21.105, que crea el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (CTCI), en el sentido de agregar a éste la siguiente función:

*Artículo 4º.- Funciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.  
El Ministerio tendrá las siguientes funciones:*

[...]

*r) Proponer al Presidente de la República las áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica, las que serán declaradas por decreto supremo expedido por el Ministerio, que deberá ser suscrito, además, por el Ministro del Medio Ambiente.*

Durante el año 2020 el Ministerio de CTCI, convocó a un grupo de expertos nacionales en astronomía con la misión de hacer una propuesta al ministro de CTCI para cumplir con la función recién descrita. El 7 de septiembre de 2020, a través del Decreto Supremo 16 (DS16) del Ministerio de CTCI, se conformó oficialmente la “Comisión Asesora Ministerial de Áreas con Valor Científico y de Investigación para la Observación Astronómica”, a la que este documento se referirá simplemente como “la Comisión”, dándole cuatro meses desde su primera sesión para llevar a cabo este trabajo. La primera sesión de trabajo de la Comisión tuvo lugar el 6 de octubre de 2020, extendiéndose por tanto su período de actividad hasta el 5 de febrero de 2021. Este documento es el resultado del trabajo de la Comisión en este período.

## 2. La Comisión

### 2.1. Conformación

De acuerdo al DS16 integran la Comisión las siguientes personas, todas desempeñándose en roles profesionales en astronomía en universidades chilenas:

- Eduardo Unda-Sanzana (**presidente**), Universidad de Antofagasta, representante de la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS)
- Amelia Ramírez (vicepresidenta), Universidad de La Serena
- Manuela Zoccali, Pontificia Universidad Católica de Chile
- María Teresa Ruiz, Universidad de Chile
- Ricardo Bustos, Universidad Católica de la Santísima Concepción
- Rodrigo Reeves, Universidad de Concepción

y es también invitada permanente a las reuniones de la Comisión, con derecho a voz:

- Paulina Assmann, SEREMI de la Macrozona Centro Sur, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación

Para efectos de coordinación la Comisión invitó también de manera permanente a sus sesiones, con derecho a voz, a:

- Luis Chavarría, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)
- Victoria Conejeros, Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)

### 2.2. Objetivos

De acuerdo al DS16 la misión de la Comisión es “asesorar al ministro de CTCI en la definición de los criterios y fundamentos que permitan elaborar la propuesta que dicha autoridad debe realizar al Presidente de la República respecto de las áreas que deben ser consideradas con valor científico y de investigación para la observación astronómica en el país”. Tomando en cuenta esta misión y considerando el tiempo disponible, la Comisión decidió plantearse los dos siguientes objetivos específicos:

1. Definir criterios, apoyados en datos cuantificables, para designar una zona como “área con valor científico y de investigación para la observación astronómica”.
2. Basándose en los criterios definidos, proponer zonas para su designación como “área con valor científico y de investigación para la observación astronómica”.

### 3. Marco conceptual de este trabajo

#### 3.1. Los cielos del norte de Chile como parte de un laboratorio natural

Chile cuenta con diversos espacios geográficos que pueden ser calificados como laboratorios naturales. Esto debido a las condiciones únicas entregadas por la combinación de factores como clima, altura, profundidad bajo el nivel del mar, o ausencia de intervención humana, que pueden ser escenarios de desarrollo de ciencia e investigación de clase mundial. Todo lo anterior es alimentado por una larga costa que abarca casi cuarenta grados de latitud, acompañada por la fría corriente de Humboldt y por la presencia constante de la cordillera de Los Andes. Es justamente aquella combinación, la que logra una armonía perfecta entre las regiones de Antofagasta y Coquimbo, para entregar el laboratorio natural del desierto, cuya característica más connotada a nivel internacional son los cielos accesibles más claros y secos del mundo (la calidad de los cielos del norte de Chile solo se compara con las condiciones en la Antártica). De esta manera, por el oeste, las frías corrientes marinas mantienen a baja altura las nubes que se aproximan desde el océano pacífico, mientras que por el este es la cordillera de los andes la que previene la entrada de las nubes desde los países vecinos. La baja nubosidad y humedad proveen de más de 300 noches despejadas al año a las cumbres de la cordillera de la costa y el altiplano.

Los cielos del norte del país, se transformaron así en una ventaja comparativa para la observación del Universo. Lo cual impulsó el interés científico hacia Chile a nivel global y resultó en la llegada de gran infraestructura para la ciencia, la que difícilmente podría ser financiada de manera local (ej. el costo del telescopio Extremely Large Telescope, actualmente en construcción en Cerro Armazones, equivale al financiamiento completo de ANID por casi tres años). Además, el continuo crecimiento y llegada de nuevos observatorios, va a dejar a nuestro país durante esta década, con más de la mitad de la capacidad observational mundial de telescopios ópticos e infrarrojos. Esto último, es un logro impresionante para una nación que tiene solo el 0,25% de la población del planeta y es únicamente posible gracias a la inversión internacional para hacer ciencia en nuestro laboratorio natural.

La llegada de los grandes observatorios hace unos 60 años, vino acompañada de una política visionaria, mediante la cual un porcentaje (10%) del tiempo de observación de los telescopios, estaba reservado para investigadores asociados a instituciones chilenas. Esta política ha logrado establecer, en el transcurso de los años, una comunidad científica que creció desde un par de decenas en la década de 1960 hasta más de mil personas en la actualidad, incluyendo estudiantes, profesores y postdoctorados en más de 18 universidades a lo largo del país (último censo SOCHIAS). Comunidad que además participa activamente en colaboraciones que van empujando la frontera del conocimiento. Como ejemplo, podemos nombrar el proyecto Calán-Tololo, que aportó con información clave para el descubrimiento de la expansión acelerada del Universo, o el aporte del grupo de la Universidad de Concepción en el proyecto *Event Horizon Telescope*, para obtener la primera imagen del horizonte de eventos de un agujero negro supermasivo. De esta manera, la ventaja comparativa se transforma en competitiva, al lograr generar conocimiento local de clase mundial.

El potenciar el desarrollo de la ciencia asociada a los laboratorios naturales no solo atrae capacidades, sino que, por medio de éstas, puede generar también beneficios territoriales a través de externalidades como el desarrollo de economía asociada al laboratorio natural (ej. astroturismo en el caso de los cielos) o el proveer servicios para la infraestructura científica (Guridi et al. 2020). Lograr un impacto positivo en la sociedad por medio de los laboratorios naturales es una tarea que requiere de la colaboración y articulación de diversos actores públicos y privados, incluyendo el sector productivo, academia, representantes de comunidades locales y otras. Los múltiples beneficios del desarrollo científico en torno a un laboratorio natural, se pueden mantener y extender en la medida que existan políticas asociadas a ello, pero principalmente, también a su protección.

### 3.2. Infraestructura para grandes ciencias

La astronomía en Chile se remonta a la época precolombina, donde distintas culturas del norte y sur del territorio utilizaban el Sol y las estrellas para predecir las estaciones del año y poder planear los ciclos de cultivo de la tierra. También crearon sus propias constelaciones, como una forma de traspasar el conocimiento a las nuevas generaciones. Todo lo anterior, utilizando la única infraestructura disponible en ese entonces para poder estudiar el Cosmos, sus ojos.

Hace 60 años que llegaron los primeros grandes observatorios al norte de nuestro país, atraídos gracias al visionario emprendimiento de algunos investigadores como Federico Rutllant, quien pudo convencer a una expedición de Estados Unidos para que viniera a visitar el norte del país y comprobar *in situ* la calidad de los cielos, y también por la contribución estratégica del estado de Chile, que entregó beneficios tributarios a cambio de un porcentaje del tiempo de observación. Es de esta manera, que se construyó el primer gran observatorio en el Cerro Tololo, en 1962, el cual contaba con infraestructura de punta para la época (telescopio de 4 metros de diámetro) y donde se gestó el proyecto Calán-Tololo, uno de los más emblemáticos de la astronomía nacional y mundial, al ser un aporte fundamental para el descubrimiento de la expansión acelerada del Universo, lo cual llevó a Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess a ganar el Premio Nobel de Física en 2011. Pocos años después, en 1964, fue el turno del consorcio de países europeos European Southern Observatory, de construir un nuevo observatorio en el cerro La Silla. De esta manera, los principales observatorios norteamericanos y europeos del hemisferio sur empezaron a estudiar el Universo, desde Chile.

Los excelentes resultados científicos de estos observatorios, sumado a la buena relación con el país anfitrión y a la existencia de una infraestructura ya habilitada, animó la búsqueda de otros lugares para la llegada de las nuevas generaciones de instrumentos y telescopios. Es así como en 1971 se construyó el observatorio en Cerro Las Campanas, con telescopios de 6 metros de diámetro, y desde donde se observó por primera vez un disco protoplanetario (lugar donde se forman los planetas en una estrella joven) en la estrella Beta Pictoris en 1984. Además, en 1987, se descubrió la supernova 1987A (explosión de una estrella vieja), la primera visible a simple vista en más de 400 años, cuyo estudio confirmó la teoría de que los elementos pesados, como por ejemplo el hierro en nuestra sangre, son creados en este tipo de explosiones. Por otra parte, en 1987 en La Silla, entró en operación el telescopio New Technology Telescope, el

primero del mundo en utilizar un espejo principal flexible que se puede deformar para preservar la calidad de la imagen, tecnología que ahora se usa en todos los telescopios modernos.

En 1987 entró en operación el observatorio del cerro Paranal, que con telescopios de 8 metros de diámetro es actualmente el más grande del mundo para la observación en longitudes de onda óptica e infrarroja. Con sus telescopios, se pudo obtener la primera imagen directa de un planeta extrasolar, en el año 2003. También, se pudo confirmar la existencia de un agujero negro super masivo en el centro de nuestra galaxia, al observar la órbita de las estrellas a su alrededor por más de 15 años. Pero esto no es todo, las inigualables características del altiplano chileno dieron pie a la construcción del observatorio ALMA, en 2011, el más complejo y potente del planeta para la observación en longitudes de onda submilimétricas. Con sus 66 antenas actuando como un solo gran telescopio, se han obtenido las primeras imágenes de los lugares donde se están formando planetas dentro de un disco protoplanetario. Como último ejemplo dentro de una larga lista que ha quedado fuera de este texto, está el trabajo del cual tanto el observatorio ALMA como APEX fueron parte en el año 2019, donde su aporte fue fundamental para poder obtener la primera imagen del horizonte de eventos de un agujero negro super masivo al centro de la galaxia M87, proyecto que también cuenta con la participación de científicos nacionales.

Actualmente se encuentran en construcción en Chile varios telescopios de la siguiente generación, entre los cuales podemos destacar: el Giant Magellan Telescope, de 25 metros de diámetro en cerro Las Campanas; el Extremely Large Telescope, en cerro Armazones, que con sus 39 metros de diámetro será el más grande del mundo, con una potencia que permitirá estudiar los gases en las atmósferas de exoplanetas similares a la Tierra; el Vera Rubin, en cerro Pachón, telescopio de barrido que tomará una imagen completa del cielo cada cuatro días, marcando una nueva era en el estudio de fenómenos transientes y del manejo de grandes datos; el Tokio Atacama Observatory, telescopio de 6 metros en el cerro Chajnantor, es el más alto del mundo, construido a más de 5.500 metros de altura, llevando la tecnología a su límite y abriendo el camino para futuros telescopios en longitudes de onda del infrarrojo medio (con estos telescopios, Chile tendrá más del 50% de la capacidad de observación óptica e infrarroja del planeta); y el Cherenkov Telescope Array, ubicado en un área cercana de Paranal, y que será el primer telescopio de rayos gama en Chile y el más grande del mundo, transformando al país en potencia mundial no solo por tener los mayores telescopios, sino que además por tenerlos en un rango que cubre prácticamente todas las longitudes de onda observables desde el planeta.

En total, sumando las instalaciones desde las cuales se produce ciencia a nivel profesional, la cantidad de observatorios en Chile al final de esta década será de más de 20, con una inversión estimada mínima de 8.000 MUSD. Dicha inversión podría seguir expandiéndose, no solo con la llegada de nuevos observatorios, sino que también por la creación de capacidades a nivel nacional, pero especialmente local, que permitan la entrega de servicios para el funcionamiento de esta gran infraestructura, alimentando y manteniendo así el *momentum* del ecosistema CTCI en torno al laboratorio natural.

Sin embargo, todos los beneficios y el potencial que tiene el desarrollo científico en torno a la astronomía, se está viendo amenazado por la contaminación lumínica generada por una mala iluminación de los establecimientos cercanos a los observatorios. Lamentablemente, en estos momentos el primer gran observatorio del país, en el Cerro Tololo, tiene niveles de contaminación tan altos, que ya no se planifica la llegada de nuevos telescopios. De no tomarse en cuenta las recomendaciones respecto de las políticas para la protección de los cielos, la contaminación podrá llegar a todos los lugares donde se encuentran o están construyendo los observatorios, terminando con el principal atractivo para invertir en esta ciencia en Chile.

### 3.3. Contaminación lumínica y nueva norma

La contaminación lumínica se puede definir como iluminación artificial excesiva, mal direccionada u obstructiva. En el caso específico de la astronomía, el exceso de luminosidad y su mal direccionamiento, aumenta el brillo intrínseco del cielo, disminuyendo la capacidad de los telescopios de poder observar los débiles objetos celestes y así realizar investigación científica (Justificación Restricción Espectral y Zonal, Proceso Revisión DS043/2012 MMA, OPCC).

El aumento del brillo del cielo, es producido por la reflexión de la luz emitida desde, por ejemplo, las luminarias de una ciudad o de una industria, con las moléculas que componen la

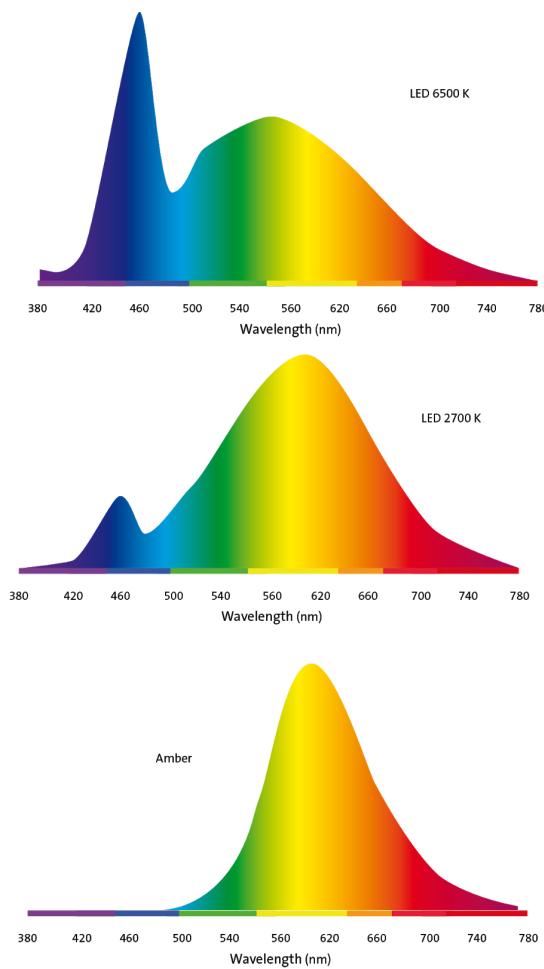


Figura 3.1: Comparación del espectro de iluminación para distintos tipos de luminarias LED. Arriba: LED de 6500 K, luz "blanca" con alta emisión en el rango azul. Centro: LED de 2700 K, luz "cálida" con baja emisión en el rango azul. Abajo: LED ámbar, con muy poca emisión en el rango azul. Fuente: Fagerhult.

atmósfera, como aerosoles, gas y otras partículas. La reflexión de la luz artificial en la atmósfera es emitida en todas las direcciones, y puede ser visible a distancias de hasta 400 kilómetros, dependiendo de la geografía del lugar, tamaño e intensidad de la fuente de iluminación (CIE150, 2017). Es por esta razón, que aunque un observatorio astronómico se encuentre ubicado lejos de una ciudad o fuente de iluminación, el brillo intrínseco del cielo, visto desde el observatorio, será incrementado debido a la contaminación lumínica producida por la mala iluminación de lugares aledaños, ciudades o industrias.

Un factor muy importante al momento de cuantificar la contaminación lumínica, es la longitud de onda de la luz de la fuente emisora. Esto ya que la luz en el rango de longitudes de onda del color azul, interactúa mucho más con las moléculas de la atmósfera, que la luz en el rango de longitudes de onda del color rojo. Esto quiere decir que, mientras más cantidad de luz en el rango del color azul tenga una fuente emisora, mayor será la contaminación lumínica producida por dicha fuente. Este último punto es fundamental para poder entender las causas de la contaminación lumínica, pero más aún, porque entrega una vía de solución para el problema (ver figura 3.1).

Otro factor de peso es la dirección a la que apunta la luz artificial. Existen numerosos casos en los cuales la luz artificial ilumina áreas mucho más amplias de lo que es realmente necesario, produciendo riesgos para la seguridad (como el encandilamiento), perturbaciones ecológicas, molestias visuales y medioambientales, y representando además un desperdicio de energía (CIE126, 1997). En el caso específico de la astronomía, toda luz artificial que ilumine hacia el cielo, o por sobre el horizonte, tendrá un enorme impacto en la generación de contaminación lumínica, además de ser un desperdicio de energía.

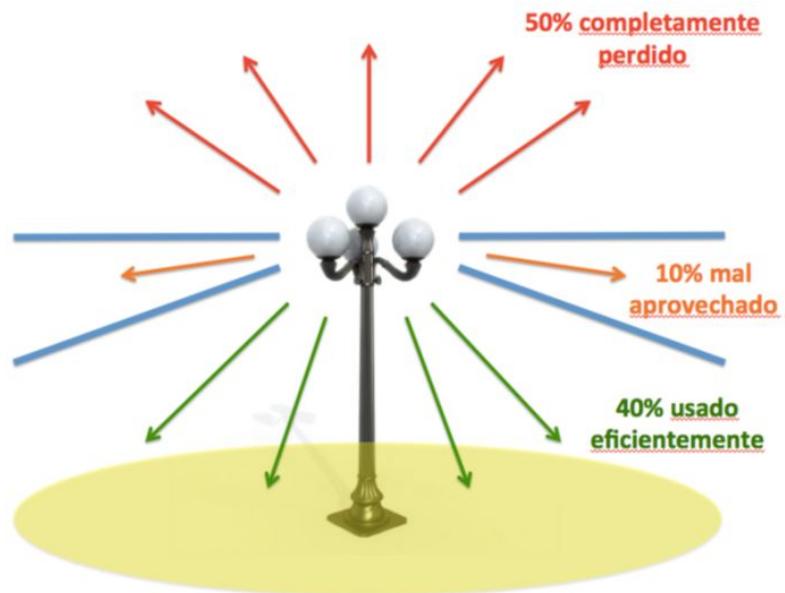


Figura 3.2: Esquema que muestra la cantidad de luz que es desperdiciada debido a un diseño de iluminación ineficiente.

La Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica del año 2012 (D.S. 43), que actúa sobre las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, apunta correctamente a regular los puntos anteriores, incorporando límites en la cantidad de luz emitida y también en el rango de colores. Sin embargo, las nuevas tecnologías de iluminación LED de los últimos años, que han bajado los costos de iluminación y por ende impulsado la iluminación en exceso, sumado al continuo crecimiento de la población e infraestructura (ver figura 3.3 donde se muestra el impacto de la Ruta Algarrobo y figura 3.4 donde se muestra el aumento de la contaminación lumínica en el norte de Chile entre los años 1997 y 2014), han elevado la tasa de contaminación a niveles preocupantes.

A consecuencia de lo anterior, el Ministerio del Medio Ambiente, en conjunto con el Ministerio de CTCI, lidera desde el año 2019 el proceso de revisión de la actual Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica. La nueva versión de la Norma, planea incluir entre sus puntos más importantes el actuar sobre todo el territorio nacional, e incluir la designación de áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica. Este último punto, que además es el propósito de este documento, propone un límite más estricto en la emisión de luz en el rango azul, para toda luminaria que se encuentre dentro de las áreas designadas. Esto puede ser logrado ahora gracias a la misma tecnología LED, la cual permite la emisión de luz en rangos cada vez más discretos.

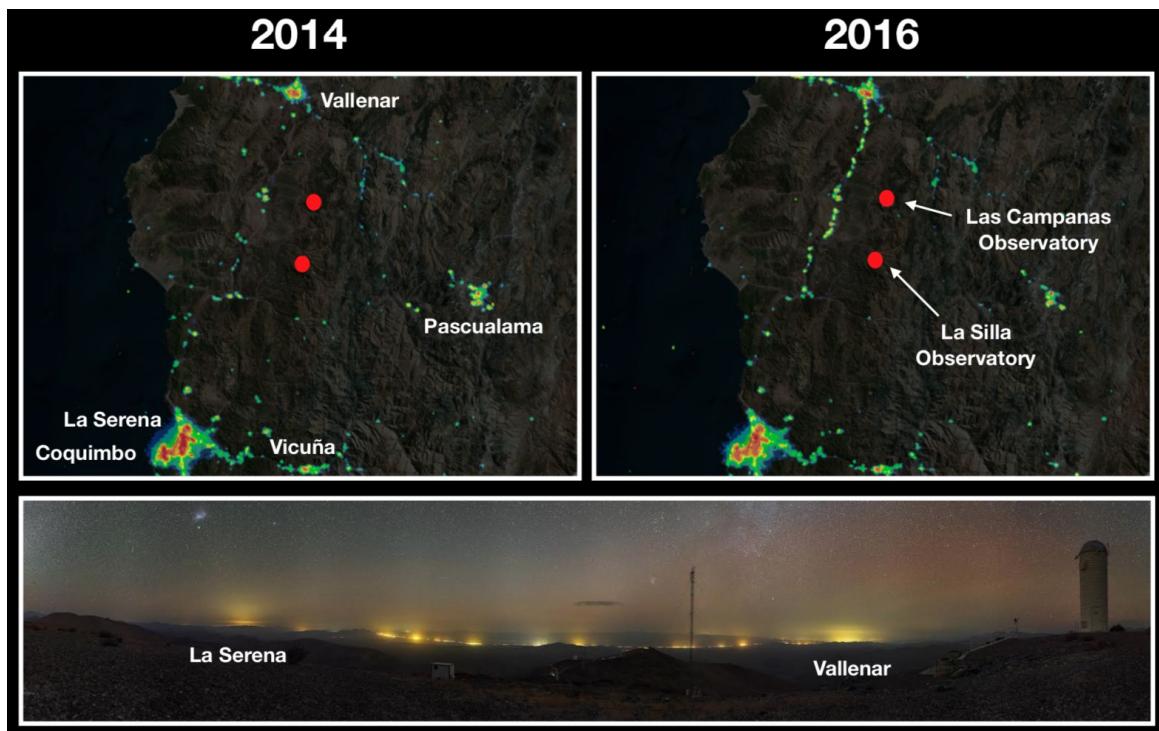


Figura 3.3: Impacto en la contaminación lumínica de la Ruta de Algarrobo entre Vallenar y La Serena. Arriba: imágenes satelitales antes de que la ruta fuera iluminada (izquierda) y después de ser iluminada (derecha), Falchi et al. 2016. Abajo: fotografía de Yuri Beletzky desde el observatorio Las Campanas. Se puede apreciar claramente el brillo del cielo por la iluminación de la ruta, además del brillo de las ciudades de Vallenar y La Serena.

Los requisitos que busca implementar la nueva Norma apuntan a disminuir la contaminación lumínica, pero esto no significa, por ningún motivo, que las personas que habitan dichos lugares tengan que estar a oscuras, sino más bien a lograr un equilibrio entre la iluminación que es realmente necesaria y la protección de un lugar único en el mundo, por medio de la aplicación de diseño y tecnologías innovadoras al servicio de sus habitantes y en beneficio de su salud.

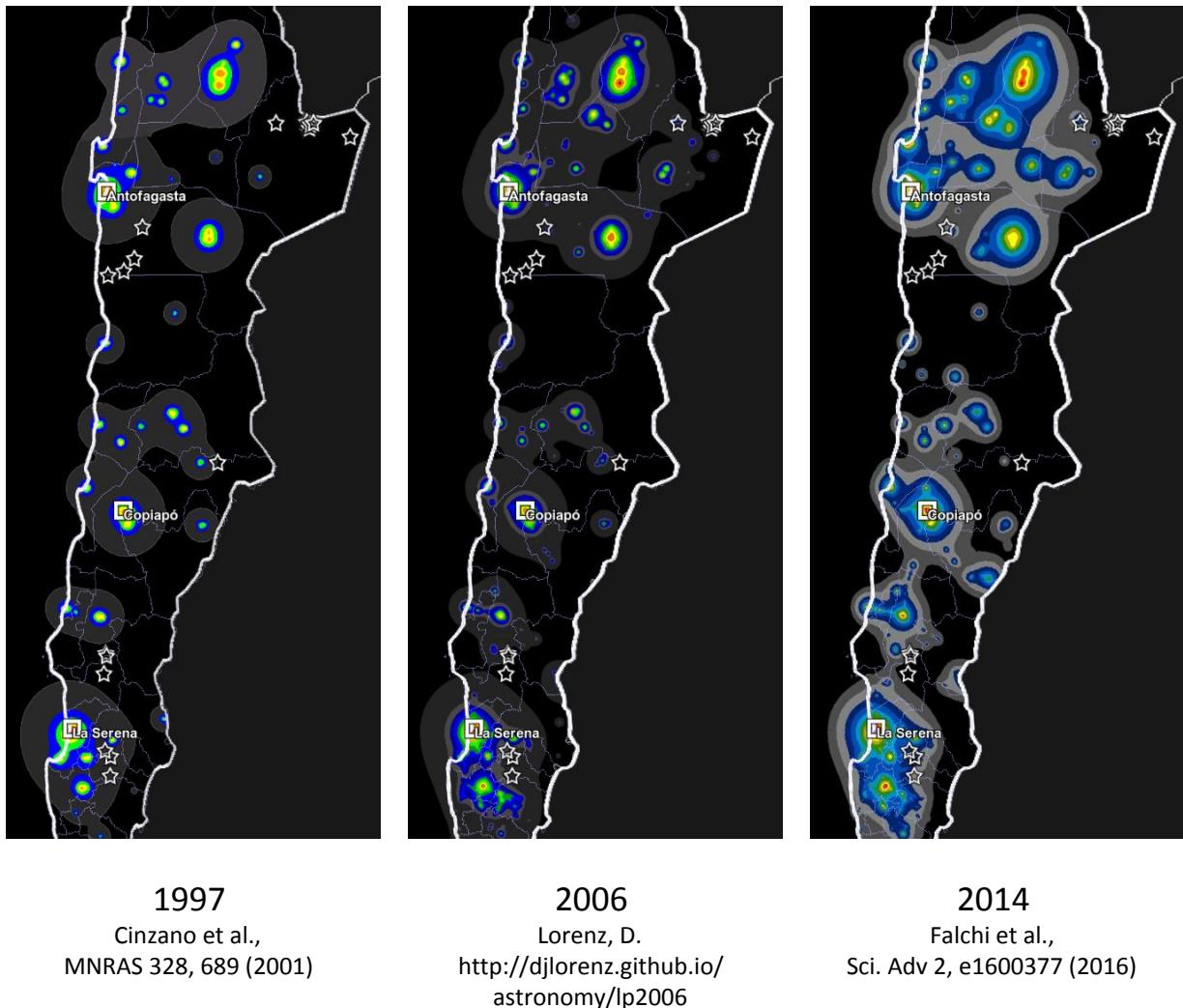


Figura 3.4: Evolución de la contaminación lumínica en el norte de Chile entre los años 1997 y 2014. Los sitios astronómicos (sección 4) están indicados por estrellas en los mapas. Se aprecia cómo aumenta la contaminación lumínica alrededor de los observatorios. El caso de cerro Tololo y Pachón, ubicados a la derecha de La Serena, son los más afectados por la contaminación del cielo.

## 4. Propuesta de áreas

Para proponer las “áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica”, que de aquí en adelante serán llamadas las “Áreas Astronómicas”, la Comisión siguió estos pasos:

- Crear una tipología de “sitios” con valor científico y de investigación para la observación astronómica, los que de aquí en adelante serán llamados “Sitios Astronómicos”.
- Definir criterios para que un área que incluya a uno o más Sitios Astronómicos sea considerada candidata a Área Astronómica.
- Establecer una geometría, validada con criterios técnicos, que precisen la forma y tamaño de un Área Astronómica.
- Presentar un catálogo de Áreas Astronómicas propuestas por la Comisión al Ministerio CTCI, mostrando cómo cada una de las áreas cumple con los criterios establecidos antes.

Las siguientes secciones corresponden al cumplimiento de cada uno de estos pasos.

### 4.1. Tipos de posibles Sitios Astronómicos en Chile

La Comisión reconoce los siguientes tipos de sitios como poseedores de valor científico y de investigación para la observación astronómica en Chile.

- A. **Sitios profesionales activos:** Observatorios científicos activos o en desarrollo activo por parte de una institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera. Son sitios en los que se ejecutan proyectos formales aprobados y/o existen recursos institucionales, públicos o privados comprometidos.
- B. **Sitios profesionales en desarrollo:** Son sitios en los que una institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera, planea el eventual desarrollo de un observatorio científico pero su desarrollo no se encuentra activo actualmente. Se trata de sitios ya caracterizados y con instrumentación inicial formal, o con recursos formalmente asociados a su adquisición, sobre los cuales hay un interés manifiesto de investigadores, validado por su institución, de desarrollar el sitio en una escala de tiempo predecible.
- C. **Sitios semi-profesionales (privados):** Son sitios propiedad de empresas cuyo rubro es el alojamiento de telescopios (“telescope hosting”), que albergan equipamiento científico usado por alguna institución académica y/o de investigación, nacional o extranjera.
- D. **Sitios de gran potencial profesional:** Estos sitios no cuentan con un desarrollo activo y su uso no está formalmente en los planes de ninguna institución, pero existe evidencia de que son sitios de excepcional calidad para la observación astronómica, que podrían ser propuestos por Chile para la instalación de futuros observatorios científicos.

La Comisión realizó las siguientes tareas para informarse sobre sitios que califican en estas categorías:

- Elevó una consulta sobre sitios tipo A, B, C y D a los directores de todos los institutos, centros, departamentos y grupos de astronomía en Chile.
- Remitió una consulta sobre sitios tipo A y B a los directores de los observatorios internacionales presentes en Chile.
- Consultó la base de datos de sitios tipo A facilitada por el Programa de Astronomía de ANID.
- Se entrevistó con un experto en tareas de evaluación de calidad de sitios astronómicos, quien elaboró un reporte sobre sitios tipo D de naturaleza destacable.

En síntesis la Comisión recibió a su entera satisfacción los antecedentes de 25 sitios tipo A, 3 sitios tipo B y 2 sitios tipo C. Esta información se presenta en el Anexo a este documento. Información de varios sitios tipo D fue recibida por la Comisión pero no fue posible confirmar sin ambigüedad las coordenadas exactas de algunos lugares cuya toponimia incierta impide identificarlos inequívocamente sólo en base a su nombre. No obstante, fue posible observar que todos los sitios D propuestos quedaban dentro de un Área Astronómica calculada como se explica en las secciones siguientes.

## 4.2. Criterios para calificar como Área Astronómica

La Comisión definió los siguientes criterios para que un área que incluya a uno o más Sitios Astronómicos sea considerada candidata a Área Astronómica.

### 4.2.1. Criterio general

La definición de una Área Astronómica debe permitir la preservación de excelentes condiciones ya existentes en la misma. Al calcular un nivel de contaminación lumínica media dentro de un Área Astronómica candidata, el valor de la mediana debe ser representativo de condiciones apropiadas para la observación astronómica, entendiendo que las fuentes de contaminación lumínica generarán valores atípicos sobre la mediana dentro de esa área. La Comisión no considerará como candidatas a Áreas Astronómicas aquellas en que las fuentes contaminantes generen los valores normales de la mediana de contaminación lumínica detectados en ella.

### 4.2.2. Criterios específicos

Un Área Astronómica debe contar con, al menos, gran potencial para hacer aportes positivos y de gran importancia en las siguientes dimensiones:

- **Infraestructura para la observación astronómica:** El Área Astronómica debe incluir sitios que actualmente contengan, o que sean capaces de atraer debido a sus características, infraestructura de nivel profesional para la investigación astronómica.
- **Condiciones geográficas y atmosféricas:** El Área Astronómica debe contar con condiciones naturales excepcionales, que faciliten la realización de observaciones astronómicas profesionales de muy alta calidad en alguna porción del espectro electromagnético.

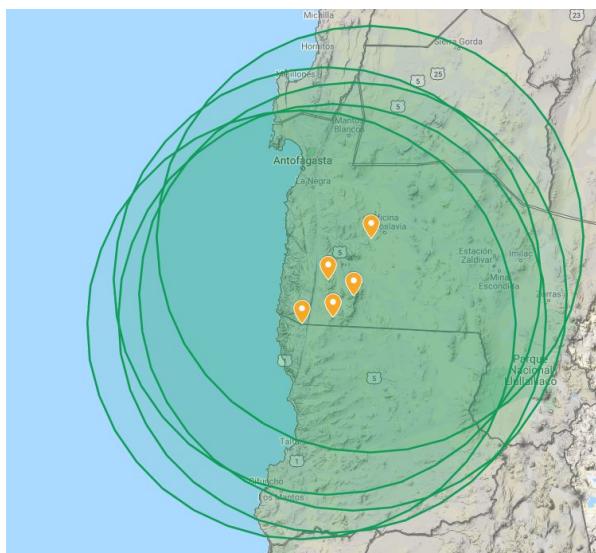
- **Producción científica:** Si el Área Astronómica ya cuenta con sitios que incluyen observatorios científicos, se espera que éstos sean productivos, permitiendo, de manera no excluyente, una o más de las siguientes actividades: publicación de artículos científicos de corriente principal en revistas indizadas de alto impacto; ejecución de proyectos científicos financiados por agencias científicas de alto prestigio; formación de capital humano avanzado en astronomía, a nivel de pregrado y postgrado; desarrollo de nuevas tecnologías.
- **Impacto en la comunidad científica nacional:** Si el Área Astronómica ya cuenta con sitios que incluyen observatorios científicos, se espera que éstos apoyen, cuando menos con una parte de su operación, el desarrollo de una fracción o de toda la comunidad científica nacional. Este apoyo puede traducirse, de manera no exhaustiva y no excluyente, en ofrecer tiempo de observación; realizar contrataciones de profesionales y científicos chilenos; firmar acuerdos con instituciones chilenas en materias de transferencia tecnológica, cooperación científica, colaboración académica u otras.
- **Potencial científico futuro:** El Área Astronómica debe concentrar sitios que puedan seguir siendo aprovechados para uso científico profesional en el futuro, si es que éstos ya incluyen observatorios científicos, o bien que podrán comenzar a ser usados en el futuro, manteniendo esta actividad a largo plazo.
- **Sinergia con planes regionales:** Idealmente la actividad en el Área Astronómica considerada deberá vincularse de manera virtuosa con los planes locales de desarrollo en torno a la astronomía o a sus áreas afines, expresada a través de la Estrategia Regional de Desarrollo, Estrategia Regional de Innovación, u otros documentos de similar alcance que formalicen la vocación regional en relación a la astronomía o sus ciencias afines.
- **Sinergia con iniciativas nacionales e internacionales:** El Área Astronómica deberá contar con sitios en los cuales, a través de mecanismos establecidos por las instituciones chilenas relevantes (típicamente Ministerio CTCI, Ministerio de RREE, sin descontar otros posibles actores institucionales a nivel nacional y regional), sea posible la llegada de proyectos de índole nacional o internacional al territorio.

Finalmente, en el caso de haber concentraciones de sitios, se optará por un criterio de economía en la confección de la propuesta de Áreas Astronómicas, como se explica en la sección siguiente, agrupando bajo una denominación común todas aquellas áreas que, calculadas a partir de la existencia de un Sitio Astronómico, tengan un alto grado de superposición entre sí.

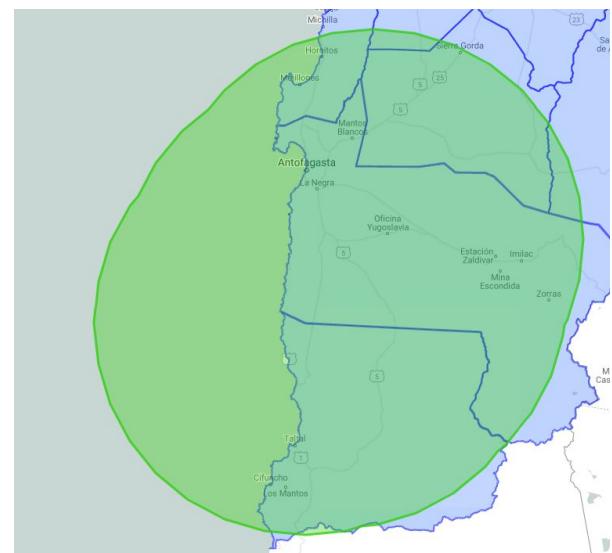
### 4.3. Cálculo de un Área Astronómica

Para definir una propuesta de Áreas Astronómicas usaremos la siguiente metodología:

- Entenderemos que cada punto del listado de Sitios Astronómicos generado antes define de manera independiente una pre-Área Astronómica.
- Una pre-Área Astronómica tiene una forma naturalmente circular debido a que la contaminación lumínica se propaga uniformemente en la atmósfera desde cualquier fuente luminosa y, por lo tanto, la facilidad de la detección de una fuente luminosa desde un Sitio Astronómico es equivalente desde cualquier dirección. Necesitaremos por tanto definir dos parámetros, un centro y un radio, para caracterizar inequívocamente una pre-Área Astronómica.
- El centro de cada pre-Área Astronómica estará dado por las coordenadas geográficas del Sitio Astronómico ya conocido.
- El radio de las pre-Áreas Astronómicas resultará de un análisis del estado del arte de la literatura científica que se refiera a la propagación de la contaminación lumínica a grandes distancias.
- En el caso de haber una superposición mayor a 50% entre dos pre-Áreas Astronómicas las agrupamos en una sola, como una unión de círculos, repitiendo este proceso con todas las que cumplan con esta condición.



Pre-Áreas Astronómicas en el sector costero de Antofagasta.



Área Astronómica Antofagasta Costa

Figura 4.1: Relación entre pre-Áreas Astronómicas y Áreas Astronómicas.

La figura 4.1 ilustra el proceso descrito. En este ejemplo, en que consideramos el sector costero de la Región de Antofagasta, encontramos cinco Sitios Astronómicos. Cada uno de ellos define una pre-Área Astronómica circular individual (panel izquierdo). Como estas pre-Áreas Astronómicas tienen una superposición mayor a 50% las combinamos en un Área Astronómica común que llamaremos “Antofagasta Costa” (panel derecho).

#### 4.3.1. Radio de un Área Astronómica

El límite establecido para determinar que una parte del cielo se encuentra contaminada para fines de observación astronómica profesional, es un brillo de cielo 10% superior al nivel de brillo natural en un ángulo cenital de 45° (Cayrel, 1979). Por otro lado, un cielo prístino para astronomía únicamente permite un exceso de brillo del 1% por sobre el natural. El nivel de brillo natural del cielo, por su parte, es cuantificable, y para efectos de la evaluación de sitios se fijó en un valor de 174  $\mu\text{cd}/\text{m}^2$  (Falchi, 2016).

Para efectos de la protección del cielo nocturno del nocivo efecto de la contaminación lumínica, según las recomendaciones indicadas en el reporte técnico “Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations, 2nd Edition”, de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE 150, 2017), existen dos regiones alrededor de un observatorio astronómico óptico profesional que deben considerarse. Una de ellas es la región ubicada dentro de los 100 km de radio alrededor de un centro astronómico, y donde se permite la iluminación que provendría desde áreas rurales prácticamente deshabitadas. La segunda región es la que se ubica entre los 100 y 300 km de radio alrededor de un centro astronómico, donde se permite la iluminación correspondiente a áreas rurales escasamente habitadas. Si bien esta recomendación de emisión límite de luz artificial parece suficientemente estricta como para limitar la iluminación artificial entorno a los observatorios astronómicos, es necesario compararla con mediciones existentes y modelos con el fin de evaluar e identificar un radio de distancia mínimo. Dicho radio de protección identificaría los posibles núcleos productivos o habitacionales de una nueva instalación que debieran estar sujetos a evaluación ambiental, y así evitar su impacto negativo en el desarrollo de la ciencia astronómica en los observatorios profesionales actuales y futuros situados en el país.

En la figura 4.2 se presenta un conjunto de simulaciones que usa el modelo de contaminación lumínica MSNsRAu (Aubé and Kocifaj, 2012), realizadas para determinar cuantitativamente la distancia a la cual las fuentes lumínicas generan un impacto en los observatorios astronómicos en el Norte de Chile, a la vez evaluando el efecto generado por distintos tipos de tecnologías de iluminación. En la figura se hace una comparación de las predicciones del modelo en dirección a un núcleo urbano contaminante versus datos reales, tomados en las mismas condiciones consideradas para realizar las simulaciones, captados usando una cámara Sky Quality Camera (SQC), especializada para mediciones de contaminación lumínica. Se puede ver el buen ajuste que existe entre los datos reales y las predicciones a baja altura (hasta 60° desde el cenit, o 30° sobre el horizonte) para un perfil de iluminación intrínseco que espectralmente es equivalente al generado por lámpara de LED frías, o blancas (curva naranja en la figura 4.2).

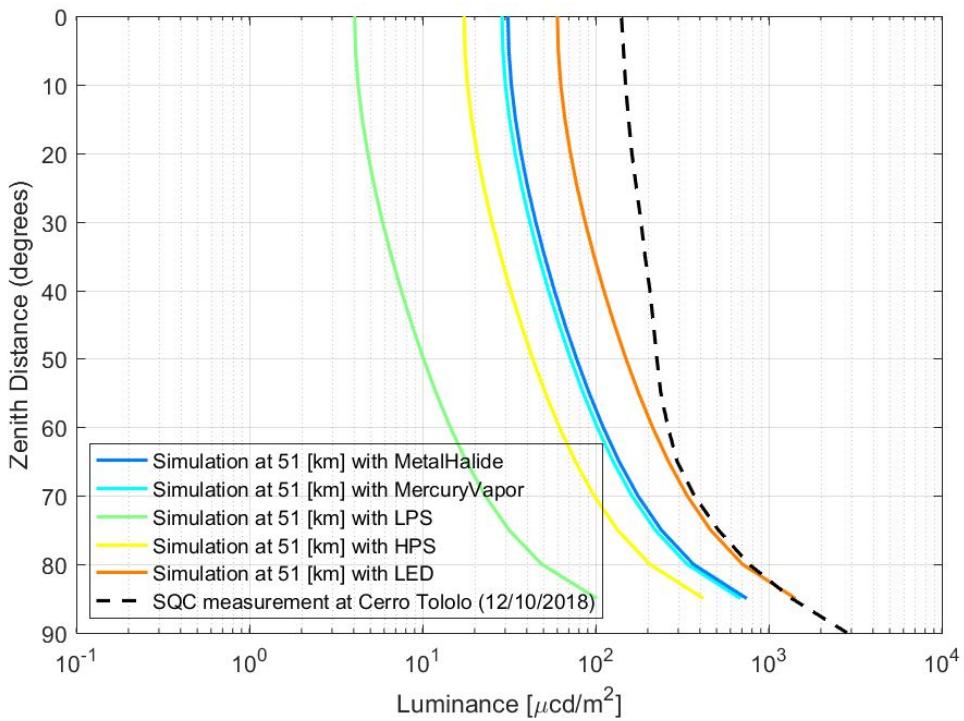


Figura 4.2: Comparación de luminancia simulada considerando diferentes tecnologías de iluminación y el modelo de MSNsRAu (Aubé and Kocifaj, 2012), para un núcleo urbano de medio millón de habitantes (La Serena/Coquimbo) a 51 km de un centro astronómico mayor (Cerro Tololo), versus mediciones reales de una SQC tomada desde el Observatorio Cerro Tololo en dirección al núcleo urbano. Crédito de imagen: Dr. Miguel Martínez-Ledesma (CePIA-UdeC); datos de OPCC.

A mayores elevaciones hay una discrepancia entre el modelo y las mediciones realizadas, y para efectos de este estudio, no se logró determinar con precisión si la razón de la discrepancia es una potencial subestimación del brillo estelar en el programa de análisis de las imágenes de la SQC, o bien los detalles de la implementación del modelo atmosférico utilizado o del perfil de iluminación asumido en el modelo. A pesar de esta discrepancia, se puede considerar que el modelo arroja resultados correctos en bajas elevaciones. De esta manera, podemos establecer un límite inferior a la contaminación por luz artificial que dicho observador experimentaría.

Usando este modelo, se extrajo el incremento del brillo de cielo artificial, generado por una ciudad de 500.000 habitantes e iluminación LED blanca, a diferentes distancias del núcleo urbano, y a diferentes ángulos centrales de observación (figura 4.3). Cabe destacar, que como se aprecia en el mapa de contaminación lumínica World Atlas (Falchi, 2016), esta configuración de núcleo urbano contamina de la misma forma que lo hace una faena minera de orden intermedio. Esto se puede observar en el impacto de contaminación lumínica generado en el Observatorio Paranal (Región de Antofagasta), donde el incremento del brillo de una ciudad de cerca de 400.000 habitantes, Antofagasta en este caso, es comparable al efecto generado por las faenas mineras La Escondida y Zaldívar, ambas ubicadas en la misma dirección visto desde el observatorio, y a la misma distancia del observatorio, apareciendo en la capturas como una sola fuente de emisión (ver figuras 3.4 y 4.4).

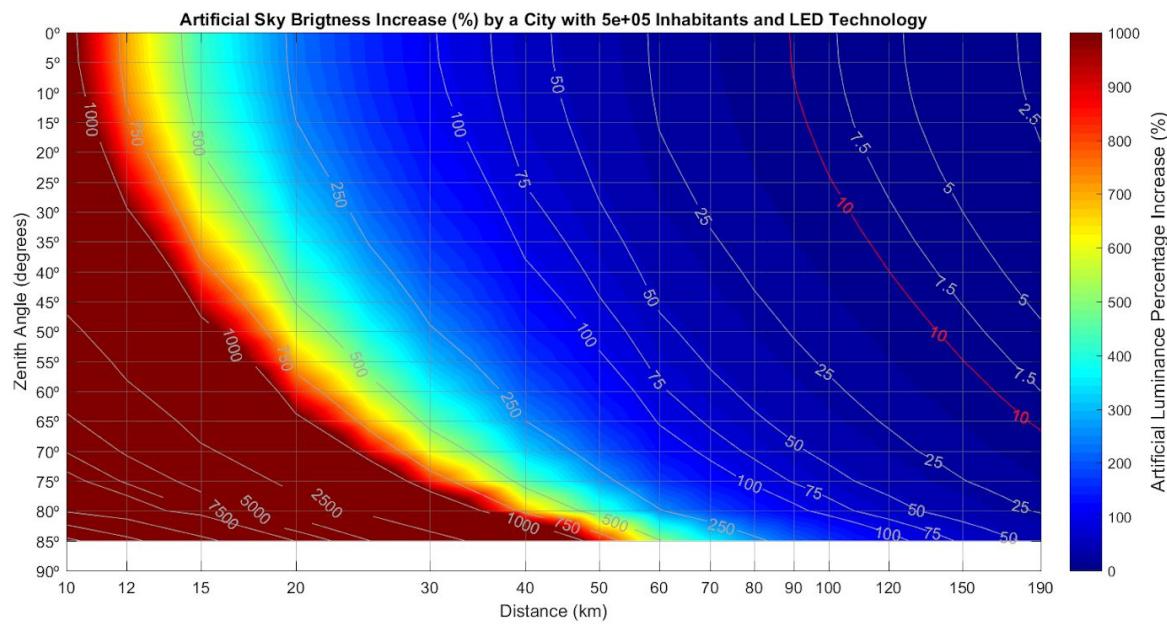


Figura 4.3. Simulación del incremento de luminosidad artificial respecto de la luminosidad natural en función de la distancia. Notar el contorno en rojo, que establece el nivel de contaminación lumínica que define cielo nocturno contaminado por luz artificial. El brillo artificial se ha simulado para una ciudad de medio millón de habitantes, emitiendo en base a un modelo que se ajusta a las mediciones presentadas en la figura 4.2. Crédito de imagen: Dr. Miguel Martínez-Ledesma.

La figura 4.3 muestra que un núcleo urbano como La Serena - Coquimbo, debería estar ubicado a por lo menos 150 km de distancia para no contaminar el cielo utilizable científicamente de un observatorio. Esto es, para que el brillo del cielo no sea menor a un 10% del brillo natural a un ángulo de 45 grados desde el cenit, de acuerdo con las definiciones de luminancia descritas al comienzo de este apartado.

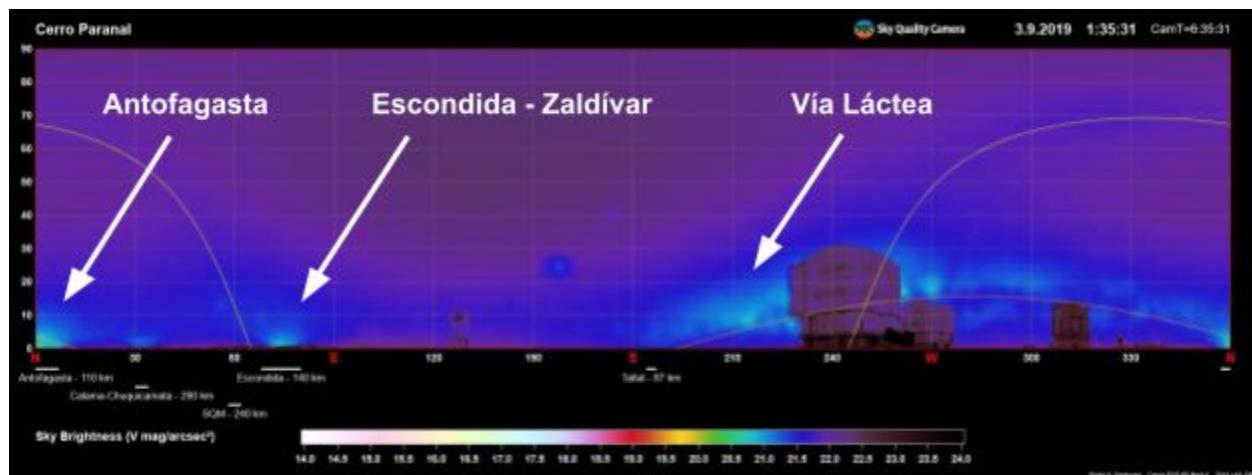


Figura 4.4. Contaminación lumínica observada desde el Observatorio Cerro Paranal. A la izquierda se observa, indicado como manchas celestes, que el brillo del cielo en dirección de Antofagasta y de las empresas mineras Escondida y Zaldívar es similar. A la vez, ese brillo es comparable al de la Vía Láctea, el arco celeste a la derecha de la imagen, que es un objeto de gran interés para la investigación astronómica. Crédito de imagen: OPCC.

Otro importante método de evaluación para estimar la distancia mínima a la cual debería estar una fuente luminosa de un observatorio profesional, es el de ponderación por distancia (Falchi et al. 2020). Este método considera un modelo de propagación de la luz por la atmósfera terrestre, tomando en cuenta sus contribuyentes químicos principales y sus efectos en absorción y dispersión de la luz, y finalmente pondera las contribuciones de los diferentes sitios contaminantes de acuerdo a la distancia del observatorio. Luego, se integra la emisión ponderada en anillos concéntricos centrados en el observatorio, para así generar un gráfico de contribución fraccional a la contaminación lumínica de un sitio, como se presenta en la figura 4.5. En esta, se muestra el resultado de este método para tres sitios astronómicos profesionales: Cerro Tololo, Cerro Paranal y Las Campanas. De la figura, resalta el hecho de que los tres sitios, y en particular los observatorios de Tololo y Las Campanas, tienen un alto nivel de contaminación relativa dentro de un anillo de 100 km de distancia. Sin embargo, Cerro Paranal presenta un nivel de contaminación lumínica relativa que es muy considerable a distancias entre 100 y 150 km, lo que implica que cualquier establecimiento urbano o industrial de magnitud que se sitúe en ese rango, podría contaminar al mismo nivel que una ciudad grande que no tenga control sobre su luminaria.

Al tomar en cuenta los análisis recién descritos, es evidente que el radio mínimo a considerar para proteger un observatorio profesional de la contaminación lumínica, tiene que ser superior a los 100 km. Pero además, considerando las condiciones actuales en la distribución de fuentes contaminantes de acuerdo a su distancia a los observatorios, se propone una distancia de 150 km como razonable en términos de protección, y bien fundamentada respecto de los resultados de modelamiento y mediciones recabados.

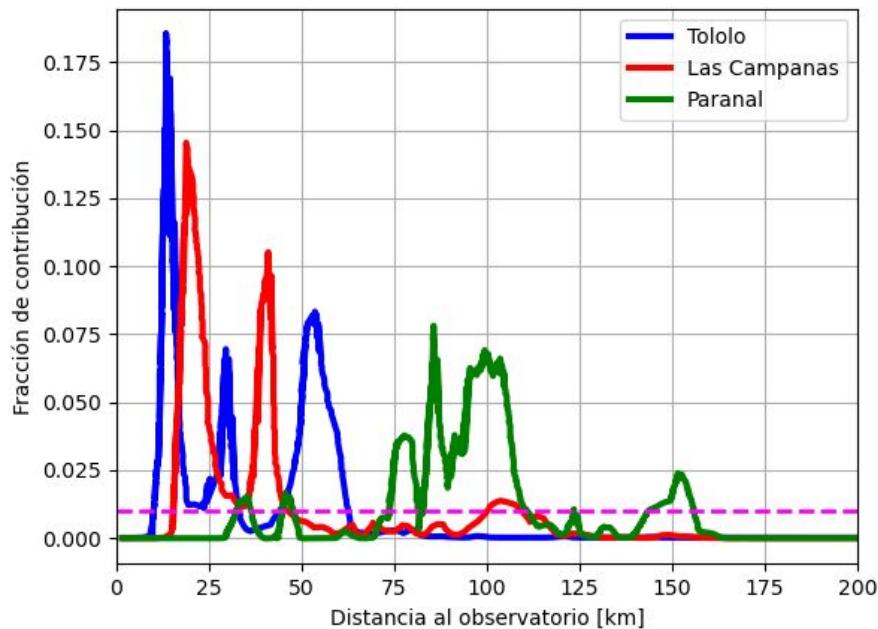


Figura 4.5. Medición de la contaminación lumínica para los observatorios Tololo, Paranal y Las Campanas, usando el método de ponderación por distancia (Falchi et al, 2020). Se incluye el límite de 1% de contaminación lumínica al céñit (línea horizontal segmentada), considerado como el máximo de contaminación permitida para cielos prístinos. Crédito de imagen: Felipe Ramos (ULS) y Pedro Sanhueza (OPCC).

#### 4.3.2. Consideraciones prácticas para fines de fiscalización

Para efectos prácticos de fiscalización, la Comisión propone que los parámetros que definen la forma de las áreas sean usados para buscar la intersección por exceso con divisiones administrativas ya existentes en el territorio nacional. Esto simplificará el trabajo de los fiscalizadores a cargo de aplicar el marco legal que opere en las Áreas Astronómicas. Un análisis del mapa de Chile y sus divisiones político administrativas, sobre el cual la Comisión superpuso un borrador de posibles Áreas Astronómicas, llevó a sus integrantes a la conclusión de que la mejor división a considerar para este fin son las comunas.

## 4.4. Catálogo de Áreas Astronómicas propuestas

### 4.4.1. Antofagasta Costa

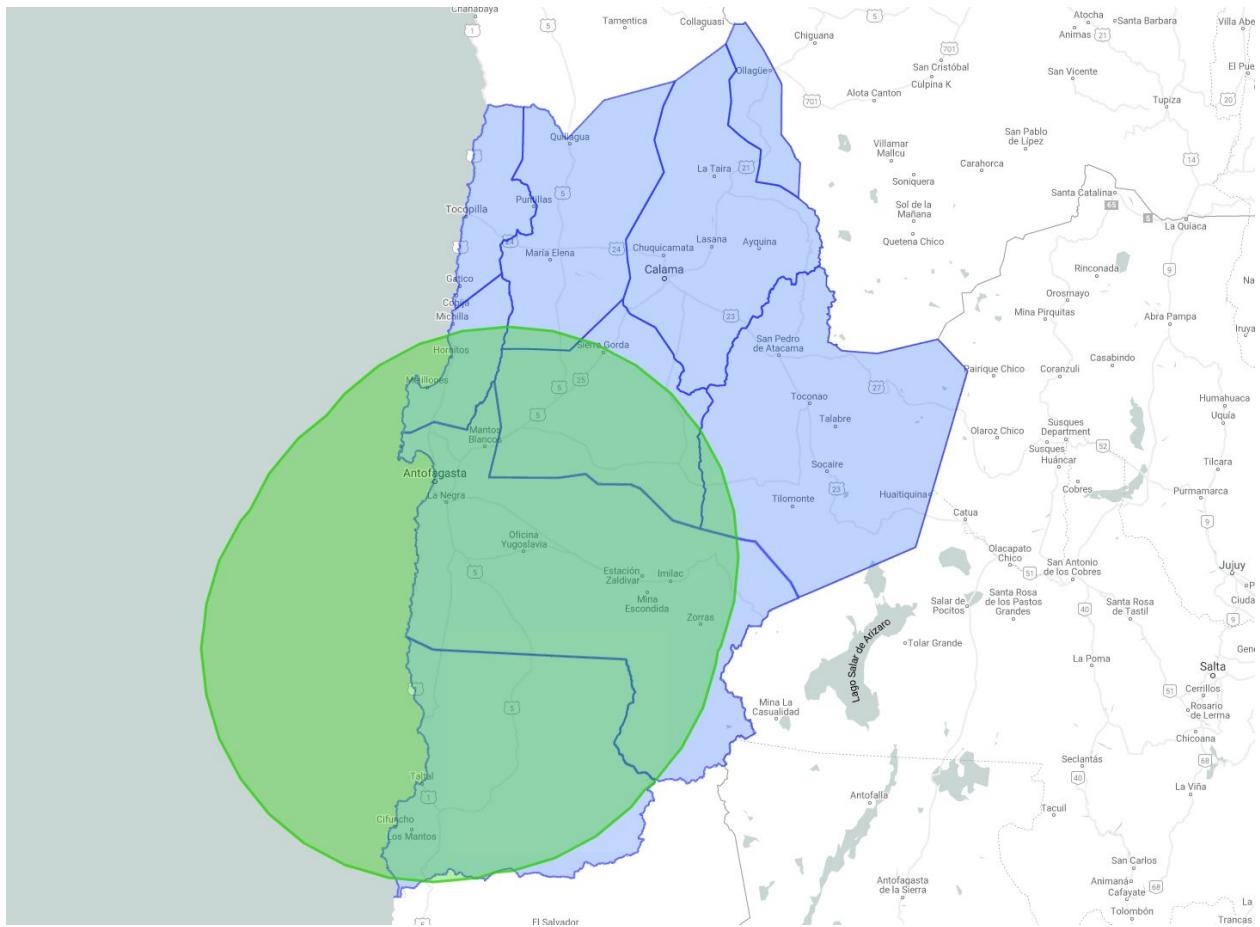


Figura 4.5. En verde se presentan los límites del área Antofagasta Costa.

#### Infraestructura para observación

Esta área concentra las concesiones otorgadas al European Southern Observatory (ESO, [www.eso.org](http://www.eso.org)) para la operación del Very Large Telescope en Cerro Paranal (VLT, [www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/](http://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/)), del Extremely Large Telescope (ELT, [elt.eso.org](http://elt.eso.org), en construcción) en Cerro Armazones, que con 39 metros de diámetro será el telescopio óptico e infrarrojo cercano más grande del mundo, y de varios otros proyectos de consorcios astronómicos extranjeros que han negociado con ESO ocupar espacio en estas concesiones. Dentro de los más notables en esta última categoría podemos mencionar el Cherenkov Telescope Array de rayos gamma (CTA, [www.cta-observatory.org](http://www.cta-observatory.org)), el Next-Generation Transit Survey (NGTS, [www.ngtransits.org](http://www.ngtransits.org)), y el Observatorio Polaco ([araucaria.camk.edu.pl](http://araucaria.camk.edu.pl)). La Universidad de Antofagasta opera desde 2015 el Observatorio Ckoirama, hasta ahora único observatorio del Estado de Chile en las regiones del norte ([www.astro.uantof.cl/research/observatorios/ckoirama-observatory](http://www.astro.uantof.cl/research/observatorios/ckoirama-observatory)).

## Condiciones geográficas-atmosféricas

Las condiciones de la zona han sido reportadas en múltiples estudios de caracterización de sitio que sirvieron como antecedentes para las decisiones sobre el emplazamiento de VLT, ELT y TMT. Al concentrar varias cimas de la Cordillera de la Costa, este sector cuenta con varios cerros de interés presente y futuro para la astronomía: Paranal, Ventarrones, Armazones y Mackenna son sólo una parte de éstos. Algunos parámetros característicos promedios, medidos desde Paranal, son un DIMM seeing promedio de 0.90'', humedad de 12%, vapor de agua precipitable de 2.4 mm, y un 92% de noches útiles al año. Esto ilustra que la atmósfera es seca, estable y transparente, ideal para el trabajo astronómico.

Por otra parte, las condiciones de emisión lumínica del cielo en el área de Paranal, que son características de esta zona en general, fueron medidas en septiembre de 2019, ocupando sensores capaces de cuantificar la emisión detectada a 45° de elevación en la dirección en que se detecta mayor contaminación lumínica desde el sitio en que se encuentra instalado el VLT. El resultado fue 22.08 mag/arcsec<sup>2</sup>, lo que indica una muy buena calidad del cielo pues este valor es aproximadamente el valor nominal de un cielo teóricamente 100% oscuro, sin contribución alguna de contaminación lumínica. Este resultado justifica plenamente un esfuerzo de preservación de las actuales condiciones.

## Producción científica

ESO lleva una estadística rigurosa de las publicaciones en revistas indexadas de corriente principal, originadas con base en datos tomados usando instrumentos instalados en Cerro Paranal.

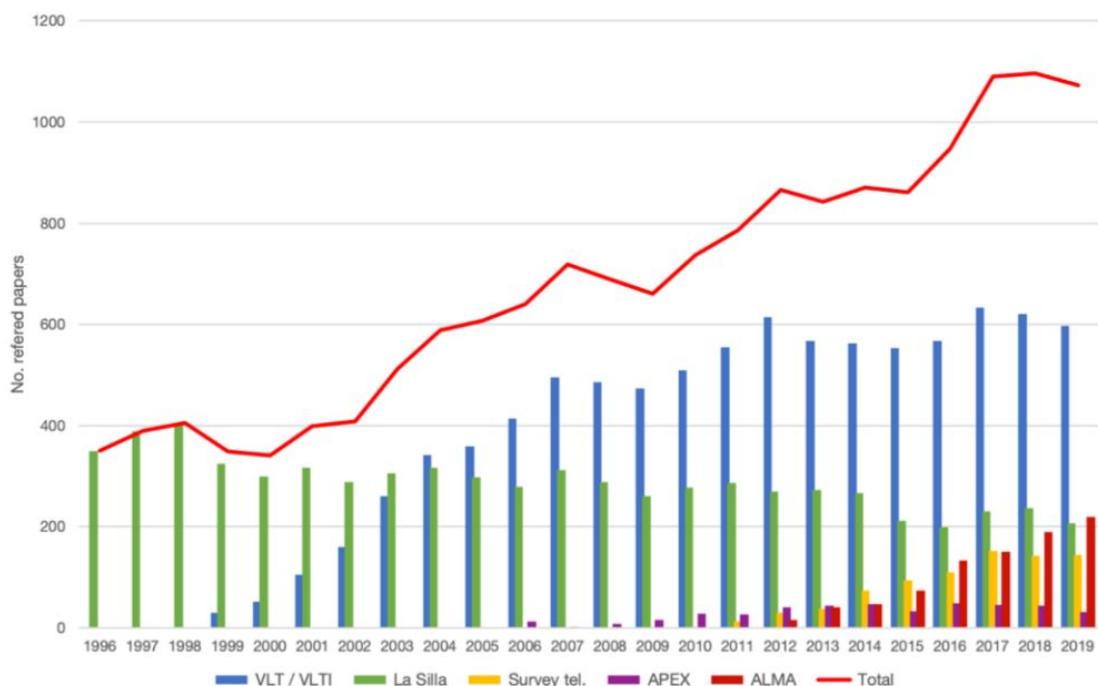


Figura 4.6. Publicaciones de ESO entre 1996 y 2019. Crédito de imagen: European Southern Observatory.

La figura 4.6 ilustra el crecimiento de las publicaciones con referato en distintos observatorios de ESO. Es sencillo ver, observando las barras azules y amarillas, cómo el VLT/VLTI y los telescopios de survey instalados en Cerro Paranal han crecido en productividad entre 1996 y 2019. Esta productividad ha impactado a todas las diversas áreas de la investigación astronómica. El Observatorio Ckoirama, en tanto, ha contribuido también a estudios relevantes sobre contaminación lumínica satelital y sobre exoplanetas, permitiendo la realización de un proyecto FONDECYT, dos proyectos QUIMAL, un proyecto del Comité Mixto ESO-Chile y un proyecto FIC-R del Gobierno Regional de Antofagasta.

#### Impacto en la comunidad científica nacional

Esta zona hace posible algunas de las principales operaciones de ESO, que, al contar con el VLT y el ELT, hace una contribución a la comunidad científica nacional no sólo por medio del tiempo de observación que ofrece a ésta sino también mediante la contratación de 149 miembros de su personal (64% chileno en Cerro Paranal), 40 profesionales (42% chileno), 55 técnicos (58% chileno) y 141 proveedores (100% chileno). Se espera que estos números sean similares una vez que entre en operaciones el ELT en Cerro Armazones.

#### Potencial científico futuro

Esta zona ya cuenta con observatorios astronómicos consolidados, de primer nivel mundial, que han solicitado concesiones a largo plazo y que, de mantenerse las actuales condiciones naturales en la zona, verán justificado mantener su funcionamiento en el futuro. Al VLT, que comenzó a funcionar a fines de los 1990's y que ha generado una gran cantidad de descubrimientos que se han vuelto hitos de la ciencia moderna, se suma que el ELT, actualmente en construcción, recién comenzará sus operaciones en el año 2025 y se espera que tenga como mínimo una vida útil de 50 años. El ELT abordará, en escala de décadas, algunas preguntas fundamentales sobre la dinámica del Universo y la caracterización de posibles mundos habitables, entre otras, lo que mantendrá la vigencia de su producción científica. El CTA, que observará en el rango de rayos gamma, aún no comienza a construirse y también tiene una vida útil esperada de como mínimo varias décadas. Si bien las capacidades de observación astronómica con que contamos en la superficie terrestre se ven complementadas con nuevas generaciones de telescopios espaciales, éstos no son capaces de reemplazar la escala y versatilidad de los telescopios terrestres de modo que no representan una amenaza para los observatorios instalados en la zona.

Por otra parte tanto la Universidad de Antofagasta como la Universidad Católica del Norte se encuentran explorando el desarrollo de nuevos sitios en esta Área Astronómica. La Universidad Católica del Norte, comenzó su desarrollo en astronomía en el año 1995 y operó hasta 2012 un observatorio en el Cerro Armazones, en apoyo de actividades de investigación y docencia, y se halla actualmente explorando posibilidades de desarrollo en el Cerro Ventarrones. La Universidad de Antofagasta, en tanto, inició su desarrollo en astronomía en 2012 y se halla operando el Observatorio Ckoirama, el que apoya actividades de investigación, docencia y vinculación, además de encontrarse explorando posibles avenidas de desarrollo en el Cerro Mackenna.

## Sinergia con planes regionales

El desarrollo económico de la Región de Antofagasta se encuentra guiado principalmente por dos documentos, la “Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020” y la “Estrategia Regional de Innovación 2012-2020”, ambos aún vigentes durante la elaboración del presente reporte. En el primero, bajo el Lineamiento 2, de “Desarrollo Económico Territorial”, se deja explícito el plan de “Potenciar y planificar el desarrollo de nuevos polos turísticos en la Región, incorporando alternativas innovadoras como el etnoturismo, el turismo cultural, científico, gastronómico y astronómico, entre otros.” En el segundo se expresa, mediante los objetivos 1.1 y 1.2, se reitera el interés en el desarrollo del turismo de intereses especiales en astronomía, pero se agregan además expectativa en torno a la formación de capital humano avanzado y a que las PYMEs regionales abastezcan de productos y servicios a la industria astronómica. Es claro que alcanzar estas metas requiere de la preservación de condiciones naturales excepcionales para el turismo de intereses especiales en astronomía, así como de la permanencia de observatorios astronómicos de primer nivel en torno a los cuales florezca la industria de servicios asociados. Cabe notar que el Observatorio Ckoirama, de la Universidad de Antofagasta, ha establecido fuertes sinergias con los planes regionales, se desarrolló siendo una de las metas del Plan Regional de Gobierno para el Sector Económico durante el período 2014-2018, y habiendo sido central para la ejecución de proyectos de innovación financiados por el Gobierno Regional de Antofagasta en 2014 y 2017.

## Sinergia con iniciativas nacionales e internacionales

Gracias a la presencia de ESO, que cuenta con observatorios consolidados y en plena vigencia, es fácil observar sinergias con varias otras iniciativas internacionales, mencionadas al comienzo de esta sección, que facilitan la llegada de nuevos proyectos al territorio por medio de la firma tanto de acuerdos con ESO como, eventualmente, con el Gobierno de Chile, al verse incrementadas las operaciones que se llevan a cabo en las concesiones otorgadas previamente a este consorcio astronómico. ESO ofrece el 10% de tiempo de observación a la comunidad chilena en los telescopios instalados en esta zona, y cautela que los proyectos que se establezcan en su concesión cumplan también con esta expectativa, lo que va en apoyo de iniciativas nacionales de investigación que pueden aprovechar este recurso. Finalmente, ESO ha firmado acuerdos de colaboración con la Universidad Católica del Norte y con la Universidad de Antofagasta, apoyando de este modo al desarrollo de dos universidades nacionales emplazadas en la misma región en la que se encuentra Cerro Paranal.

#### 4.4.2. Antofagasta Interior

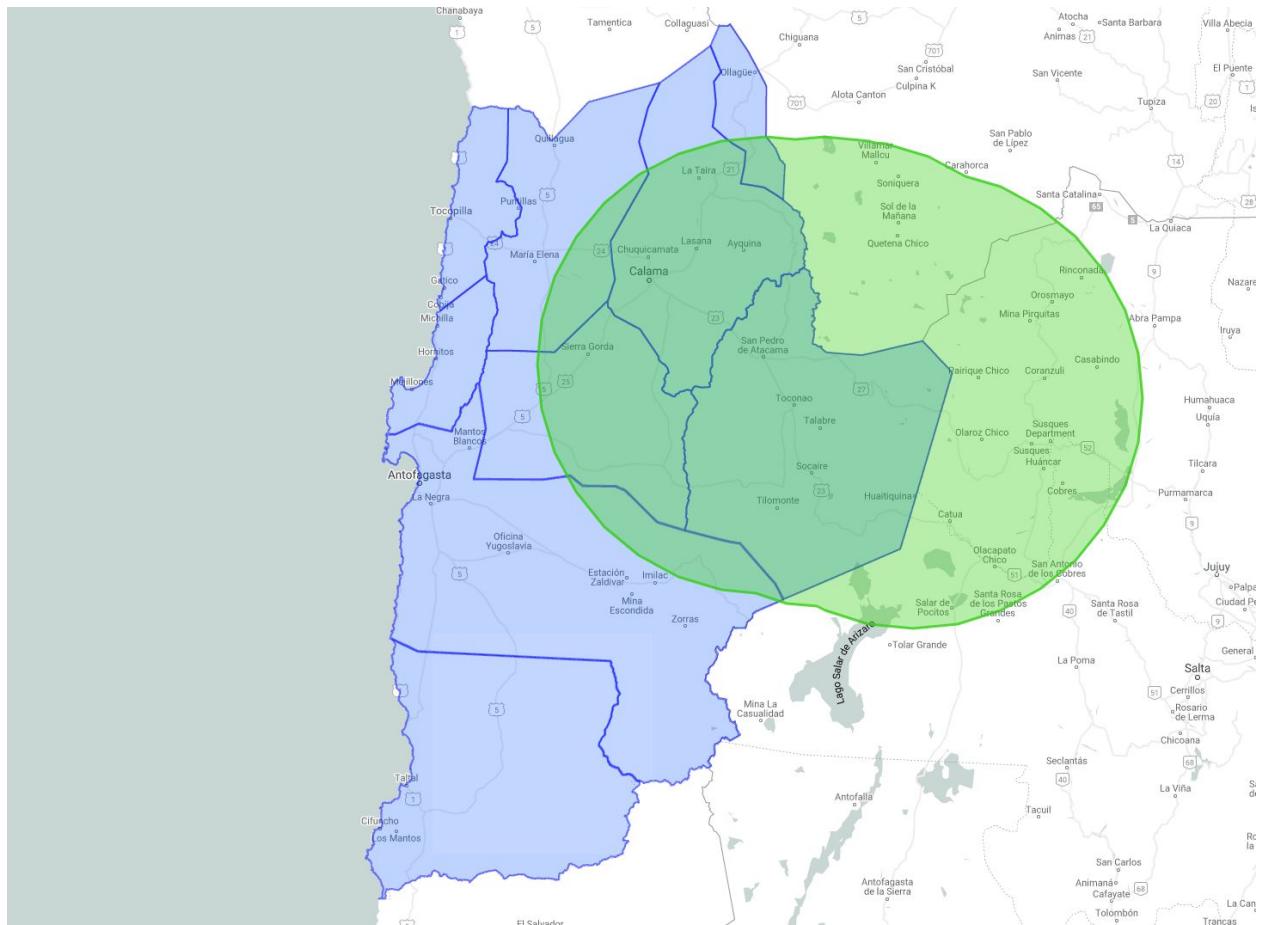


Figura 4.7. En verde se presentan los límites del área Antofagasta Interior.

#### Infraestructura para observación

A mediados de 1990 se logró determinar que la zona del Llano de Chajnantor al este de San Pedro de Atacama y a 5.000 metros de altura presenta condiciones ideales para la observación astronómica en ondas de radio milimétricas y submilimétricas, con un muy bajo contenido de vapor de agua en la atmósfera y alta transparencia del cielo. Así, a finales de esa década se instalaron proyectos como MINT y MAT/TOCO en el Cerro Toco, RLT en el Volcán Sairecabur y CBI ([sites.astro.caltech.edu/~tjp/CBI](http://sites.astro.caltech.edu/~tjp/CBI)) en el Llano de Chajnantor que fueron los precursores de los actuales radiotelescopios que funcionan en el lugar tales como ALMA ([www.almaobservatory.org](http://www.almaobservatory.org)), ACT ([act.princeton.edu](http://act.princeton.edu)), APEX ([www.apex-telescope.org](http://www.apex-telescope.org)), ASTE ([aste.nao.ac.jp](http://aste.nao.ac.jp)), CLASS ([sites.krieger.jhu.edu/class](http://sites.krieger.jhu.edu/class)), Polarbear ([bolo.berkeley.edu/polarbear](http://bolo.berkeley.edu/polarbear)) y NANTEN2 ([www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/en](http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/en)), junto al telescopio temporal infrarrojo mini-TAO. Alrededor del sitio de ALMA en el Llano de Chajnantor, se ha desarrollado el Parque Astronómico de Atacama, administrado por ANID. En esta área se encuentran en construcción los radiotelescopios CCAT-prime ([www.ccatobservatory.org](http://www.ccatobservatory.org)), Simons Observatory ([simonobservatory.org](http://simonobservatory.org)) y el telescopio infrarrojo TAO ([www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/en](http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/en)). Junto

a ellos, también existen otras iniciativas científicas tales como el monitoreo atmosférico realizado por la campaña RHUBC-II del Departamento de Energía de EE.UU. y la estación atmosférica de la Universidad de Santiago, ambas ubicadas en el Cerro Toco.

#### Condiciones geográficas-atmosféricas

Por las condiciones naturales de bajo contenido de vapor de agua del desierto de Atacama y la gran altura de la Cordillera de los Andes sobre los 5.000 metros, el área de Chajnantor posee características particulares e ideales para realizar observaciones de radio en el rango milimétrico y submilimétrico. Cielos de esta calidad se obtienen en escasos lugares en el mundo tales como en Chajnantor, Hawaii y el Polo Sur. Chajnantor presenta mejor calidad que Hawaii y de calidad comparable al Polo Sur, con la ventaja que Chajnantor permite observaciones de una mayor cantidad de cielo de los Hemisferios Sur y Norte, mientras que el Polo Sur está limitado sólo al cielo austral y con enormes dificultades de acceso y de operación. Esta calidad del cielo ha permitido la instalación de grandes radiotelescopios en el lugar, además de mantener activo el interés de instalar nuevos proyectos.

Dada la gran altura de la Cordillera de los Andes, hacia el este del Llano de Chajnantor se produce una protección natural que atenúa la intensidad de las señales de radio proveniente de ciudades como Antofagasta y Calama y las comunicaciones de centros mineros. Junto a esto, el alto aislamiento sin asentamientos humanos ni emisoras de radio en sus alrededores, hace que el área presente muy bajos niveles de interferencia para observar el cielo en bajas frecuencias.

#### Producción científica

Los observatorios instalados en esta área presentan una importante y creciente productividad científica tal como lo muestra la figura 4.6, donde se destaca el observatorio ALMA con más de 700 publicaciones científicas en los últimos 5 años y APEX con más de 150 en los últimos 10 años. Otros observatorios como por ejemplo el radio interferómetro CBI logró 21 publicaciones científicas y CLASS que hasta la fecha lleva 16 publicaciones. Así, se demuestra la alta productividad científica de estos observatorios debido a la calidad de las observaciones realizadas bajo los cielos del área del Llano de Chajnantor.

#### Impacto en la comunidad científica nacional

Los radiotelescopios instalados en esta zona como ALMA, APEX, ASTE y otros, hacen una contribución a la comunidad científica nacional no sólo por el acceso al 10% del tiempo de observación sino también mediante la contratación de personal nacional, manteniendo la tendencia indicada en el punto 4.4.1. Se espera que los nuevos radiotelescopios a instalarse presenten números similares e incluso que promuevan una mayor participación de chilenos, tanto de científicos como de ingenieros, técnicos y proveedores de servicios.

#### Potencial científico futuro

Esta zona ya cuenta con observatorios astronómicos consolidados, de primer nivel mundial, que han solicitado concesiones a largo plazo y que, de mantenerse las actuales condiciones

naturales en la zona, verán justificado mantener su funcionamiento en el futuro. ALMA tiene proyectada una vida útil de 50 años desde su inauguración el año 2013. Los proyectos instalados en el Parque Astronómico de Atacama han estado permanentemente renovando sus concesiones. ACT se instaló el año 2007, Polarbear en 2013 y CLASS en 2016. En el sector de Pampa La Bola, el radiotelescopio ASTE entró en funcionamiento el año 2003 y Nanten2 en 2005. En el Llano de Chajnantor, APEX comenzó sus operaciones el año 2006. Todos ellos aún mantienen sus operaciones y observaciones. CBI/QUIET funcionó en el Llano de Chajnantor desde el año 1999 hasta el 2011. A estos proyectos, se sumarán en los próximos años el Simons Observatory, CCAT-Prime y TAO. Además, se espera que otros observatorios sean atraídos por las condiciones de este sitio como el radio telescopio LCT liderado por U. de Concepción, ATLAST, SWGO y otras iniciativas aún en etapas de planificación dentro de la concesión de ALMA o del Parque Astronómico Atacama.

Por otro lado, el proyecto MARI liderado por la Universidad Católica de la Santísima Concepción logró identificar un sitio ubicado 60 km hacia el este del Llano de Chajnantor con muy bajos niveles de radiointerferencia que permite realizar observaciones de muy alta calidad a frecuencias menores a 1 GHz. De esta forma, el radiotelescopio chileno MIST, financiado con fondos QUIMAL de ANID, se instalará en esta área y observará el cielo entre 50 y 120 MHz durante el año 2021. La Universidad Católica de la Santísima Concepción espera que otros proyectos internacionales se interesen en instalar proyectos en este lugar a medida que sus cualidades se vayan dando a conocer dentro de la comunidad científica internacional.

#### Sinergia con planes regionales

Como se explica en el punto 4.4.1, esta zona también está considerada dentro del plan de desarrollo económico de la Región de Antofagasta.

#### Sinergia con iniciativas nacionales e internacionales

Todos los observatorios instalados en esta área cuentan con sólidas vinculaciones con instituciones y universidades nacionales, tanto a nivel de colaboración científica como en áreas de ingeniería y apoyo técnico. Los proyectos que están actualmente instalados provienen de instituciones y organizaciones internacionales de distintos países tales como: ALMA (NRAO, EE.UU.; ESO, Europa; NAOJ, Japón), ACT (Princeton U., EE.UU.), APEX (ESO, Europa; Instituto Max Planck de Radio Astronomía, Alemania; Observatorio espacial Onsala, Suecia), ASTE (NAOJ, Japón), CCAT-prime (Cornell U., EE.UU.; U. Cologne, Alemania; Consorcio de universidades de Canadá), CLASS (Johns Hopkins U., EE.UU.), NANSEN 2 (Nagoya U., Japón; U. Cologne, Alemania), POLARBEAR (U. California Berkeley, EE.UU.), TAO (U. Tokyo, Japón).

Numerosos estudiantes chilenos de pre y postgrado han realizado prácticas profesionales o desarrollado memorias de título tanto de astronomía como de ingeniería en estos observatorios. Asimismo, algunos de estos estudiantes se han especializado y desarrollado estudios de postgrado en algunas de estas prestigiosas instituciones, generando recursos humanos nacionales altamente calificados, obteniendo puestos de trabajo en universidades tanto en Chile como en el extranjero. Como ejemplo, se puede mencionar que el actual Director del observatorio APEX es un ingeniero de la Pontificia Universidad Católica, quien comenzó

trabajando en el área eléctrica de dicho observatorio, para luego realizar su doctorado en el Instituto Max Planck de Radio Astronomía en Alemania y después volver al país a liderar el observatorio. Asimismo, ingenieros que trabajaron en los radio telescopios RLT, ACT y CBI simultáneamente lograron completar doctorados conjuntos entre universidades chilenas en convenio con las universidades de Boston, Princeton y Caltech y hoy lideran nuevos Laboratorios de Astro-Ingeniería en distintas instituciones nacionales.

#### 4.4.3. Atacama-Coquimbo

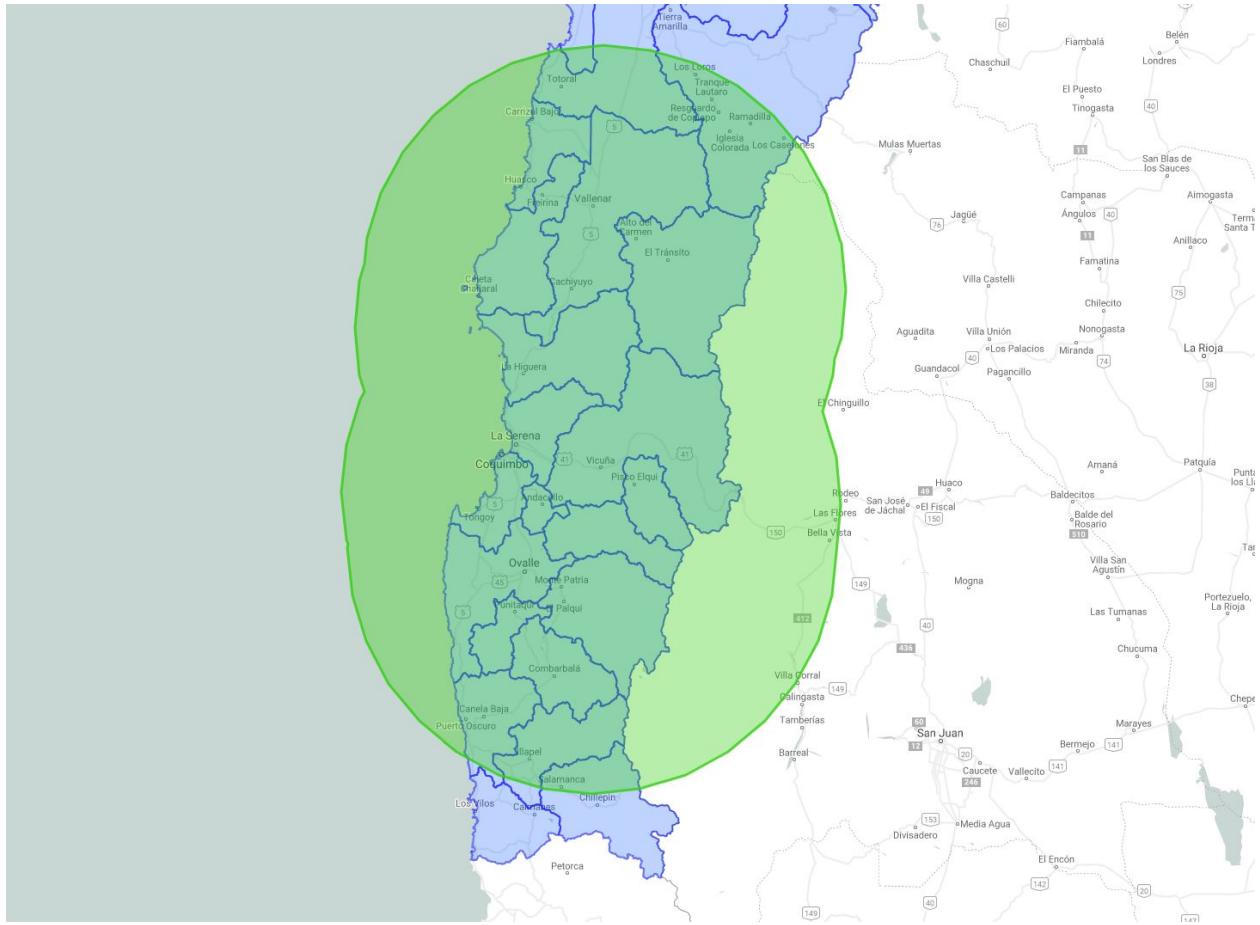


Figura 4.8: En verde se presentan los límites del área Atacama-Coquimbo.

## Infraestructura para observación

En esta área se han instalado varios observatorios internacionales desde que, el 7 de noviembre de 1967, se inaugura el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo. Los principales organismos presentes en esta área son la Asociación de Universidades Norteamericanas para la Investigación en Astronomía (AURA, [www.aura-astronomy.org](http://www.aura-astronomy.org)) a través de dos proyectos principales: NOIRLab (formalmente denominado Laboratorio Nacional de Investigación de Astronomía Óptica-Infrarroja, [www.noirlab.edu/public](http://www.noirlab.edu/public)) y el Observatorio Vera Rubin (en construcción, antes conocido como LSST, [www.lsst.org](http://www.lsst.org)); el Observatorio Gemini Sur ([www.gemini.edu](http://www.gemini.edu)), operado por un consorcio de países (Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Australia, Brasil, Argentina y Chile), el cual también opera el telescopio Gemini Norte, ubicado en Hawái; el Telescopio Astrofísico de Investigación del Sur (SOAR, [www.soartelescope.org](http://www.soartelescope.org)); el Observatorio Las Campanas ([www.lco.cl](http://www.lco.cl)), operado por la Institución Carnegie de Washington, que albergará próximamente al Telescopio Gigante Magallanes (GMT), y que será parte de la nueva generación de telescopios extremadamente grandes ([www.gmto.org](http://www.gmto.org)); y el Observatorio

La Silla ([www.eso.org/sci/facilities/lpo](http://www.eso.org/sci/facilities/lpo)), que fue el primer observatorio de la Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Austral (ESO).

#### Condiciones geográficas-atmosféricas

La zona tiene una geografía montañosa, que comprende varias cumbres aptas para la actividad astronómica, estudiadas y aprovechadas para tal fin desde mediados del siglo XX. Cerro Tololo se ubica a 80 km al este de la ciudad de La Serena a 2.200 metros sobre el nivel del mar. El Observatorio Las Campanas se ubica en realidad en cerro Manqui, cercano al cerro Las Campanas, 160 kilómetros al norte de La Serena, entre los límites de las regiones de Atacama y Coquimbo, a 2.380 metros sobre el nivel del mar. El complejo La Silla también se encuentra a 160 kilómetros al norte de La Serena, entre los límites de las regiones de Atacama y Coquimbo, a 2.400 metros sobre el nivel del mar.

#### Producción científica

Dada la existencia de observatorios consolidados, esta área genera una productividad científica destacada tanto en cantidad como en calidad.

Telescopio/Observatorio	Publicaciones con referato, 2010-2020
Magallanes (6.5m)/Las Campanas	1843
du Pont (2.5m)/Las Campanas	437
Swope (1m)/Las Campanas	351
Gemini (8m)/GEMINI	1146
Blanco (4m)/CTIO	1252
SOAR (4m)/CTIO	512
La Silla (3.6m)/ESO	2277
<b>Total</b>	<b>7818</b>

Número de publicaciones con referato originadas en el uso de los telescopios en los últimos 10 años (hasta agosto de 2020).

Dentro de las 7818 publicaciones aquí registradas, hay presente un alto número de astrónomos chilenos entre los autores, consecuencia natural de las asignaciones de tiempo para integrantes de la comunidad nacional.

#### Impacto en la comunidad científica nacional

Si bien en la década de 1960 se participó arduamente acompañando a las expediciones en busca de los lugares adecuados para instalarse, ahora Chile está presente en consejos y mesas técnicas de planificación de los megaproyectos astronómicos en desarrollo en esta área. Por ejemplo, entre los miembros internacionales del Directorio de AURA se encuentran dos instituciones chilenas: la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile. Algo

similar sucede con el Observatorio ESO. Gracias a los acuerdos firmados para la instalación de los observatorios internacionales en ésta y en otras áreas ingresan aportes pecuniarios anuales para el crecimiento de la astronomía chilena, como por ejemplo el Fondo del Comité Mixto ESO - Gobierno de Chile. Éste asignó 450 millones de pesos chilenos en el año 2020 para financiar diferentes actividades relacionadas con la astronomía, incluidos puestos de posdoctorado y puestos para académicos universitarios. Entre 2013 y 2020 ha asignado un promedio de 180 millones de pesos chilenos anuales para financiar cuatro nuevos puestos de posdoctorado cada año. En el mismo período asignó 80 millones de pesos chilenos anuales para financiar entre 1 y 2 nuevos puestos de profesores por año.

A octubre del 2020 AURA cuenta con un total de 281 trabajadores, de los cuales 224 (80%) son chilenos y 57 son de otros países. LCO, junto con el proyecto en construcción del GMT, tiene un total de 121 personas contratadas, siendo el 92% de ellos de nacionalidad chilena. El Observatorio La Silla tiene un total de 17 personas contratadas, sólo uno extranjero.

Estos proyectos serán aprovechados por los estudiantes actuales de licenciaturas, magíster y doctorados de astronomía y ciencias afines, a través de programas establecidos por los mismos observatorios. AURA ofrece en promedio 20 pasantías anuales para estudiantes, a nivel de título profesional, tesis de pregrado y posgrado, de ingeniería y astronomía. LCO ofrece prácticas profesionales de varias ramas de la ingeniería, además de pasantías y apoyo a tesis en programas de postgrado. ESO cuenta con un programa de becas de estudio (11 plazas en Chile), ofreciendo hasta 5 puestos por año para estudiantes de doctorado, para realizar hasta dos años de sus estudios en ESO-Chile en colaboración con una institución de investigación (universidad u otra institución de investigación); al menos una beca está reservada para un estudiante afiliado a una universidad chilena. Asimismo, ofrece un programa de becas postdoctorales de ESO (21 plazas en Chile), de las cuales cada año se otorgan alrededor de 5 en Chile a científicos jóvenes que completaron recientemente su doctorado. Finalmente, también ofrece alrededor de 5 pasantías anuales de corta duración (a nivel de pregrado o maestría) en las oficinas de Vitacura, con la posibilidad de visitas de trabajo a los sitios del observatorio.

#### Potencial científico futuro

En la región de Atacama-Coquimbo hay proyectos en construcción que impactarán fuertemente en el modo de hacer ciencia, tanto en las estrategias de trabajo, en el almacenaje de petadatos y en disponibilizar en forma amigables esos datos a la comunidad. Dos de los más importantes proyectos futuros son la construcción del Observatorio Vera Rubin que, a través del Simonyi Survey Telescope, ejecutará el Legacy Survey of Space and Time (en 2015 anunciado como el Gran Telescopio de Exploración Sinóptica, con sigla LSST por su nombre en inglés), que mediante un telescopio de 8,4 metros y una cámara de 1,6 metros y de tres billones de píxeles, capturará imágenes de todo el cielo visible, durante 10 años; y el Giant Magellan Telescope (GMT), que comenzó a construirse en noviembre de 2015 en el Cerro Las Campanas en la Región de Atacama, a 2.400 msnm. Este telescopio observará poco después de la explosión del Big Bang, cuando se formaron las primeras estrellas y galaxias, permitiendo investigar los orígenes de los elementos que constituyen nuestro planeta y al ser humano. Asimismo, buscará rastros de procesos biológicos en planetas fuera de nuestra galaxia.

## Sinergia con planes regionales

En el Año Internacional de la Astronomía 2009 por la IAU (Unión Internacional de Astronomía), la Región de Coquimbo se identificó con la definición que plantea que uno de los aportes de la astronomía a la comunidad es en la Calidad de Vida, entendiendo que se puede mejorar por medio de la conservación, protección y puesta en valor del patrimonio natural y cultural asociado a la visión del cielo. En 2019 se estableció en la Estrategia Regional de Desarrollo, Región de Coquimbo 2020 (sección 2.2) que el Astroturismo es uno de sus lineamientos. Esto reconoce no sólo el impacto de la astronomía internacional sino el aporte social que entrega la experiencia de ver el cielo nocturno. En esta línea de acción se ha financiado y co-financiado desde 1998, entre aportes públicos y privados, la instalación de numerosos observatorios semi-profesionales, para aficionados y de turismo de intereses especiales centrado en lo astronómico (<http://turismoregiondecoquimbo.cl/que-hacer/astroturismo>).

El 9 de agosto de 2015, en la Asamblea General de la IAU en Honolulu, Hawaii, la Asociación Internacional de Cielo Oscuro (IDA) anunció que el sitio del Observatorio AURA en el Valle de Elqui sería designado como el primer Sky Sanctuary en el mundo. El sitio es conocido como el Santuario del Cielo Oscuro Gabriela Mistral. Finalmente, durante más de diez años, el equipo de Divulgación y Educación de AURA ha sido miembro activo de la Mesa de Educación para el Desarrollo Sustentable (EDS), liderada por el Ministerio de Medio Ambiente junto con más de otras 18 instituciones científicas, publicando un plan anual que contiene eventos y actividades para promover la ciencia y la educación a docentes y estudiantes de la Región de Coquimbo, donde la astronomía y la protección del cielo oscuro son un componente relevante.

## Sinergia con iniciativas nacionales e internacionales

Carnegie tiene acuerdos en curso con varias instituciones chilenas, particularmente con la Universidad de Chile y la Universidad Diego Portales, y muchos contratos con empresas e instituciones locales. Actualmente AURA tiene un convenio de cooperación con la Universidad de La Serena, las ciudades de Vicuña, La Serena y Hurtado; ESO sostiene un convenio de colaboración con la Universidad Católica del Norte. Además AURA es miembro activo del consorcio Red Universitaria Nacional (REUNA), contribuyendo al desarrollo de redes de fibra óptica de ancho de banda gigabit de última generación entre La Serena, Santiago y redes de Internet académicas extranjeras, y ayudando activamente a mejorar la conectividad entre la academia y algunos de los actores más relevantes en el desarrollo de la ciencia, la investigación y la tecnología del país. AURA ayudó a la creación y desarrollo del primer observatorio municipal en Chile, el Observatorio Mamalluca, que ha servido como modelo para instalaciones similares en Chile. Finalmente, las “Cumbres Chile-EE.UU” sobre educación y divulgación en astronomía, impulsadas por AUI, AURA, Carnegie Institution for Science, los observatorios de Estados Unidos en Chile, la Embajada de Estados Unidos, la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos, ANID y la Fundación Imagen de Chile dieron pie a una serie de Cumbres de Educación en Astronomía actualmente organizadas por ANID.

#### 4.4.4. Propuesta final

Considerando la descripción de cada Área Astronómica presentada en las secciones 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3, así como la consideración práctica expuesta en 4.3.2, la Comisión propone que las siguientes comunas sean consideradas integrantes de este primer Catálogo de Áreas Astronómicas, quedando los límites de las éstas definidos en términos prácticos por los límites de las comunas listadas a continuación.

##### Región de Antofagasta

- Antofagasta
- Calama
- María Elena
- Mejillones
- Ollagüe
- San Pedro de Atacama
- Sierra Gorda
- Taltal

##### Región de Atacama

- Alto del Carmen
- Caldera
- Copiapó
- Freirina
- Huasco
- Tierra Amarilla
- Vallenar

La sección 5.2 contiene recomendaciones adicionales respecto a comunas de la Región de Atacama que podrían gozar de una consideración especial a pesar de no haber sido incluidas en el catálogo.

##### Región de Coquimbo

- Andacollo
- Canela
- Combarbalá
- Coquimbo
- Illapel
- La Higuera
- La Serena
- Monte Patria
- Ovalle
- Paihuano
- Punitaqui
- Río Hurtado
- Salamanca
- Vicuña

## 5. Recomendaciones adicionales

El proceso de confección de esta propuesta dio a los integrantes de la Comisión una ocasión sin precedentes para reflexionar sobre la continuidad futura de este proceso, sobre los efectos de la contaminación lumínica en Chile, y sobre nuevas amenazas relacionadas ante las cuales se hace urgente actuar. Recogemos en este apartado los elementos centrales de estas reflexiones, como base para posteriores tomas de decisiones en nuestro país.

### 5.1. Periodicidad en la revisión de estas áreas

Es posible que en los próximos años otras zonas del territorio cumplan con los criterios que cumplen las Áreas Astronómicas propuestas en el presente documento, aunque la actual geografía y distribución demográfica de Chile lleva a la Comisión a pensar que muy probablemente el eventual anuncio de nuevos proyectos astronómicos mayormente fortalecerá los argumentos por los cuales un área deba mantenerse en el catálogo presentado en este documento en vez de dar lugar a la adición de un Área Astronómica completamente nueva. Dado esto:

**La Comisión sugiere que la revisión de las zonas que integran el catálogo de Áreas Astronómicas sea un ejercicio periódico solicitado por el Ministerio CTCI, siguiendo un método similar al usado para definir las que integran la presente versión del catálogo, y que se realice en concurrencia con la periódica revisión de la norma de contaminación lumínica en Chile (i.e. aproximadamente cada 4 años).**

### 5.2. Región de Atacama

Durante el proceso de confección del presente documento estuvo en evaluación una pre-Área Astronómica adicional, llamada tentativamente “Atacama Interior”, que se presenta en la figura 5.1. La Comisión estimó que los argumentos para considerarla en el catálogo de Áreas Astronómicas tienen una fuerza que es aún limítrofe, dependiendo fundamentalmente de un proyecto en desarrollo por parte de la Universidad de Atacama. La Comisión opina que, de concretarse tal proyecto, y tras exhibir sus primeros resultados, se configurará una situación que ameritará incluir el área en el catálogo.

Por otra parte, en el caso de las comunas de Chañaral y Diego de Almagro, en la Región de Atacama, el grado de intersección entre el Área Astronómica Antofagasta Costa y los límites comunales es muy bajo. Aunque la Comisión no definió un porcentaje mínimo de intersección entre ambos límites para considerar una comuna como parte del listado en la sección 4.4.4, en otros casos en que la intersección fue baja el criterio usado fue el de incluir a la comuna debido a que se halla inserta en una zona de activo desarrollo de observatorios y otros proyectos de interés para la investigación astronómica. Tal condición no se cumple claramente en las comunas de Chañaral y Diego de Almagro. En vista de esto, pero considerando que, como se ha

planteado antes, la Región de Atacama podría ver en el futuro un desarrollo de proyectos de investigación astronómica de importancia:

Dado lo anterior:

**La Comisión recomienda que la pre-Área Astronómica “Atacama Interior”, que agregaría al presente catálogo de Áreas Astronómicas a las comunas Chañaral y Diego de Almagro, se mantenga en observación, y que todo esfuerzo posible sea hecho por las autoridades de gobierno, en el marco de sus atribuciones, para preservar las condiciones naturales de la zona, a pesar de no hallarse ésta recomendada para inclusión en la presente versión del catálogo de Áreas Astronómicas.**

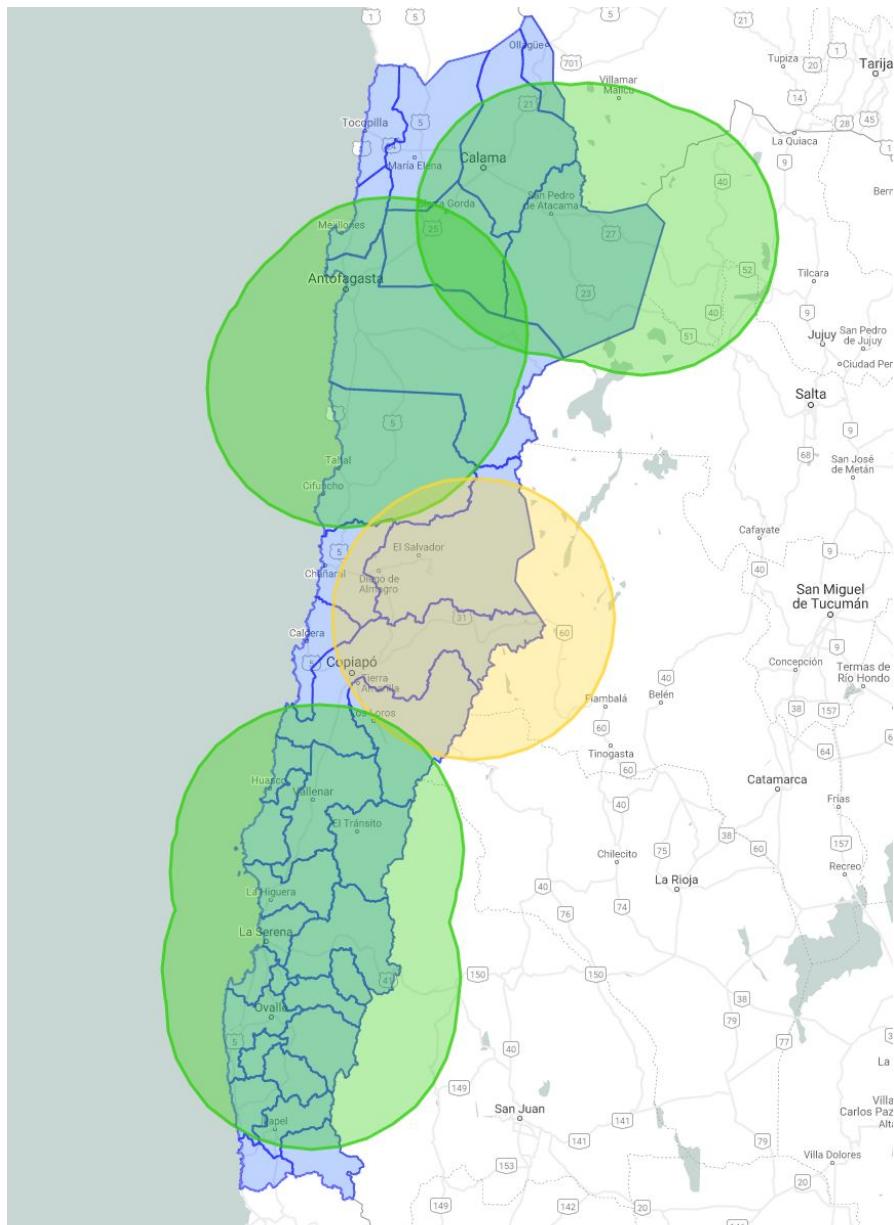


Figura 5.1: En amarillo se presentan los límites de la pre-Área Astronómica Atacama Interior.

### 5.3. Contaminación por constelaciones de satélites

Durante el año 2019 se instaló la preocupación en la comunidad científica por el efecto que pudieran tener en las observaciones astronómicas los satélites de varias anunciatas “megaconstelaciones satelitales” de comunicaciones, que podrían alcanzar del orden de 100 mil nuevos objetos orbitando a la Tierra dentro de pocos años. De concretarse, esto producirá que en una década los cielos se poblarán de 10 veces más satélites que todos los puestos en órbita desde 1957 a la fecha. Cualquier protección que la Comisión pueda recomendar sobre fuentes de contaminación lumínica terrestre verá reducida su efectividad si prolifera sin regulación nuevas fuentes espaciales. La comunidad internacional ha organizado dos conferencias (Walker 2020a, 2020b), una de ellas en colaboración con la Organización de Naciones Unidas (ONU), de modo de generar un set de recomendaciones para gobiernos y la industria, basadas en análisis científicos y técnicos del efecto que los satélites tendrán en las observaciones astronómicas. La comunidad científica chilena participó en este esfuerzo a través del involucramiento de sus integrantes en la organización de estas conferencias, además, generando estudios de referencia publicados en revistas indizadas (Tregloan-Reed 2020a, 2020b). Eventualmente, estas conferencias dieron lugar a un documento que, a la fecha de la confección del presente reporte, está pendiente de ser enviado al Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) de ONU, el “Dark and Quiet Skies for Science and Society - Report and recommendations” y su extracto, el “Recommendations to Keep Dark and Quiet Skies for Science and Society”, también llamado el “Conference Room Paper” (CRP).

**La Comisión recomienda que el Gobierno de Chile copatrocine la presentación del CRP ante COPUOS y que promueva la adopción de sus recomendaciones por parte de otros Estados Miembros de ONU. No obstante, sugiere que los representantes diplomáticos de Chile presten atención a la elegibilidad que los grupos de investigación chilenos tengan para recibir financiamiento, en caso de generarse un fondo en virtud de la recomendación 30 del documento.**

### 5.4. Contaminación en emisión en radio

La protección para la contaminación lumínica contribuye significativamente a preservar la calidad de los cielos chilenos para las observaciones astronómicas. Asimismo, para las observaciones de radiotelescopios resulta relevante proteger los cielos de la contaminación en las ondas de radio y microondas. En la zona de Antofagasta Interior, donde están instalados los radioobservatorios ALMA, APEX, ACT y otros, la Subsecretaría de Telecomunicaciones ha otorgado un Permiso de Servicio Limitado de Telecomunicaciones mediante las Resoluciones Exentas No. 3075 y 3076 del año 2013, renovables cada diez años, que limita la emisión de ondas de radio mayores a 31.3 GHz en una zona de protección con un radio de 30 km y una zona de coordinación de 120 km centrado en el Llano de Chajnantor. Para futuros radiotelescopios que hagan observaciones a frecuencias menores a 31.3 GHz, resulta necesario extender el Permiso de Servicio Limitado hacia estas frecuencias y evitar la proliferación de emisoras y radiocomunicaciones que deterioren la calidad del cielo en estas frecuencias en la

zona. Junto a esto, se debe sumar la contribución de nuevas tecnologías tales como 5G y los sistemas de radares anticolisión en vehículos, que pueden resultar nocivas y contaminantes a los radioobservatorios que observan en las frecuencias de emisión de estos equipos.

**La Comisión recomienda que la contaminación lumínica considere junto a la óptica e infrarroja también a las radiofrecuencias y que sea incorporada permanentemente dentro de las políticas públicas de protección y control de las contaminación en áreas alrededor de los observatorios, considerando a instituciones como la Subsecretaría de Telecomunicaciones del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.**

Por otra parte resulta de gran importancia participar en la discusión a nivel global sobre la contaminación producida por las constelaciones satelitales descritas en el punto 5.3, tanto por sus adversos efectos sobre las imágenes obtenidas por los telescopios ópticos como por la contaminación en ondas de radio que producen la transmisión de las señales emitidas por los satélites cuando pasan por sobre los observatorios. Un tipo de protección sería poder limitar la transmisión de señales de estos satélites mientras hacen su paso sobre el área de los radioobservatorios.

**Tal como se indica en el punto 5.1, esta situación refuerza la recomendación que realiza la Comisión para que el Gobierno de Chile copatrocine la presentación del CRP ante COPUOS y se adopten sus recomendaciones por parte de los Estados Miembros de ONU.**

## 6. Créditos y agradecimientos

El trabajo de la Comisión no hubiera sido posible sin la generosa colaboración de numerosos investigadores y profesionales que entregaron insumos de información que fueron fundamentales para los análisis y conclusiones entregados en las páginas precedentes.

La Comisión reconoce y agradece particularmente los aportes de:

- John Barantine, International Dark-Sky Association.
- Miguel Martínez-Ledesma, Laboratorio CePIA, Universidad de Concepción.
- Felipe Ramos, Universidad de La Serena.
- Ángel Otárola, European Southern Observatory.
- Pedro Sanhueza, Oficina de Protección de la Calidad del Cielo (OPCC).

Las simulaciones y cálculos presentados en la sección 4.3 son principalmente trabajo de los doctores Felipe Ramos y Miguel Martínez Ledesma, usando datos de la OPCC.

Las figuras presentadas para ilustrar el alcance de las Áreas Astronómicas fueron generadas por Eduardo Unda-Sanzana con ayuda de las herramientas Google Maps, Map data ©2019 Google; Snazzy Maps, CC0 1.0 Universal; JSFiddle; KML4Earth; y Earth Point.

## 7. Bibliografía

- Aubé M., and Kocifaj M., 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 422, 819
- Cayrel, R. (1979). 50. Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites. Transactions of the IAU, 17(1), 215-223. doi:10.1017/S0251107X00010798
- Falchi, F. et al., “The new world atlas of artificial night sky brightness”, Science Advances, vol. 2, no. 6, pp. 1600377–1600377, 2016. doi:10.1126/sciadv.1600377.
- Falchi, F., and Bará, S., “A linear systems approach to protect the night sky: implications for current and future regulations” (2020) R. Soc. open sci.7201501  
<http://doi.org/10.1098/rsos.201501>
- Guridi, Jose, et al. 2020. *Natural laboratories as policy instruments for technological learning and T institutional capacity building: The case of Chile's astronomy cluster*. Research Policy 49, 103899
- Oficina de Protección de los Cielos del norte de Chile, OPCC, Justificación Restricción Espectral y Zonal, Proceso Revisión DS043/2012 MMA
- Pollard, N. et al. “CIE 150:2017 Guide On The Limitation Of The Effects Of Obtrusive Light From Outdoor Lighting Installations, 2nd Edition.” (2017).
- Tregloan-Reed, Jeremy, et al. 2020. *Astronomy & Astrophysics* 637 (May): L1.  
[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2020/05/aa37958-20/aa37958-20.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/05/aa37958-20/aa37958-20.html).
- Tregloan-Reed, Jeremy, et al. 2021. “Optical to NIR magnitude measurements of the Starlink LEO Darksat satellite and effectiveness of the darkening treatment.” Accepted in *Astronomy and Astrophysics* TBA (TBA): TBA.  
[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2020arXiv201101820T/EPRINT\\_PDF](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020arXiv201101820T/EPRINT_PDF).
- Walker, Constance, ed. 2020b. *Dark and Quiet Skies for Science and Society - Report and recommendations*. N.p.: International Astronomical Union.  
<https://www.iau.org/static/publications/dqskies-book-29-12-20.pdf>.
- Walker, Constance, ed. 2020a. *Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations*. Vol. 52. N.p.: Bulletin of the American Astronomical Society. <https://aas.org/sites/default/files/2020-08/SATCON1-Report.pdf>.

## 8. Anexo

Sitios Astronómicos considerados por la Comisión, ordenados por tipo y de norte a sur:

Nombre del sitio	Tipo (ver sección 4.1)	Latitud	Longitud
Simons Observatory	A	-22.952942	-67.807059
Polarbear	A	-22.958057	-67.786008
ACT	A	-22.958578	-67.787868
CLASS	A	-22.959705	-67.787144
NANTEN2	A	-22.969894	-67.703091
ASTE	A	-22.971608	-67.70327
CCAT-p	A	-22.98547	-67.739799
TAO	A	-22.986497	-67.742382
APEX	A	-23.005657	-67.758123
ALMA	A	-23.027671	-67.754781
TARP-04	A	-22.958059	-67.784285
LCT	A	-23.028506	-67.761665
UCSC - MARI	A	-23.148872	-67.24072
UA - Ckoirama	A	-24.0893	-69.9306
ELT	A	-24.589124	-70.191606
Paranal	A	-24.627639	-70.404366
UDA - Maricunga	A	-26.848292	-69.035678
Las Campanas	A	-29.018214	-70.690962
GMTO	A	-29.048181	-70.682795
La Silla	A	-29.256044	-70.737123
CTIO	A	-30.168839	-70.805721
SOAR	A	-30.237737	-70.733162
Gemini	A	-30.2404	-70.736234
LSST	A	-30.244721	-70.7477
UV - Calle Larga	A	-32.86634	-70.61502
UCN - Ventarrones	B	-24.352222	-70.225
UA - Mackenna	B	-24.4505	-70.048
UCh - El Roble	B	-32.976389	-71.013056
Privado - SpaceObs	C	-22.952722	-68.180194
Privado - El Sauce	C	-30.471916	-70.763984