



INSTITUTO DE INGENIEROS
C H I L E

**DESARROLLO DE COMPETENCIAS
TECNOLÓGICAS A RAÍZ DEL INCREMENTO
EN LA CAPACIDAD DE OBSERVACIÓN
ASTRONÓMICA EN CHILE
OPORTUNIDADES PARA LA INGENIERÍA**



INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (UPADI)
Miembro de la Federación Mundial de Organización de Ingenieros (FMOI) (WFEO)
Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Luis Nario Matus

Primer Vicepresidente

Germán Millán Pérez

Segundo Vicepresidente

Dante Bacigalupo Marió

Secretario

Juan Carlos Barros Monge

Prosecretaria

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Tesorero

Iván Álvarez Valdés

Protesorera

Ximena Vargas Mesa

DIRECTORIO 2018

Renato Agurto

Iván Álvarez

Elías Arze

Dante Bacigalupo

Marcial Baeza

Juan Carlos Barros

Sally Bendersky

Juan E. Cannobbio

Silvana Cominetti

Alex Chechilnitzky

Raúl Demangel

Álvaro Fischer

Roberto Fuenzalida

Rodrigo Gómez

Tomás Guendelman

Diego Hernández

Carlos Mercado

Germán Millán

Rodrigo Muñoz

Ricardo Nanjarí

Luis Nario

Ricardo Nicolau del Roure

Humberto Peña

Mauricio Sarrazin

Alejandro Steiner

Miguel Ropert

Manuel Ruz

Ximena Vargas

René Vásquez

Jorge Yutronic

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADEMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACION CHILENA DE SISMOLOGIA E INGENIERIA ANTISISMICA, **ACHISINA**.

Presidente: Rodolfo Saragoni H.

ASOCIACION INTERAMERICANA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL - CAPITULO CHILENO, **AIDIS**.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA, **SOCHID**.

Presidente: José Vargas B.

SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA, **SOCHIGE**.

Presidente: Daniela Pollak A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA DE TRANSPORTE, **SOCHITRAN**.

Presidente: Juan Carlos Herrera M.

PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER

Presidente: Alfonso Barraza San M.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA, **SOCHEDI**.

Presidente: Mario Letelier S.

COMISIONES DEL INSTITUTO

INGENIEROS EN LA HISTORIA PRESENTE.

Presidente: Ricardo Nanjarí R.

INGENIERÍA Y DESASTRES.

Presidente: Silvana Cominetti C.

ANÁLISIS DE ESPECIALIDADES DE LA INGENIERÍA CIVIL EN CHILE

Presidente: Iván Álvarez V.

ORDENAMIENTO TERRITORIAL.

Presidente: Rodrigo Gómez A.

INGENIERÍA Y ÉTICA

Presidente: Elías Arze C.

POLÍTICAS PÚBLICAS DE INFRAESTRUCTURA.

Presidente: Germán Millán P.

PROSPECTIVAS DE LA INGENIERÍA.

Presidente: Jorge Yutronic F.



INSTITUTO DE INGENIEROS
CHILE

DESARROLLO DE COMPETENCIAS TECNOLÓGICAS A RAÍZ DEL INCREMENTO EN LA CAPACIDAD DE OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA EN CHILE

OPORTUNIDADES PARA LA INGENIERÍA

Presidente

Juan Carlos Barros Monge

Participantes

Lucas A. Cieza

Rodrigo Gómez Álvarez

Ricardo Nanjarí Román

Pedro Toledo Correa



GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

Asociaciones, organizaciones y centros de investigación chilenos

AIUC:	Centro de Astro-Ingeniería de la Universidad Católica
CATA:	Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines
CONAMA:	Comisión Nacional del Medio Ambiente
CONICYT:	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
MAS:	Instituto Milenio de Astrofísica
NLHPC:	Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento
OPCC:	Oficina para la protección de la calidad de los cielos del norte de Chile
SOCHIAS:	Sociedad Chilena de Astronomía

Asociaciones, organizaciones y centros de investigación extranjeros

AS:	Academia Sinica in Taiwan
AURA:	Association of Universities for Research in Astronomy
CIW:	Carnegie Institution of Washington
ESA:	European Space Agency
ESO:	European Southern Observatory
KASI:	Korea Astronomy and Space Science Institute
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
NINS:	National Institutes of Natural Sciences (Japan)
NOAO:	National Optical Astronomy Observatory
NRAO:	National Radio Astronomy Observatory
NRC:	National Research Council (Canada)
NSC:	National Science Council (Taiwan)
NSF:	National Science Foundation

Centros de observación astronómica y proyectos astronómicos

ACT:	Atacama Cosmology Telescope
ALMA:	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
APEX:	Atacama Pathfinder Experiment
ASTE:	Atacama Submillimeter Telescope Experiment
CLASS:	Cosmology Large Angular Scale Surveyor
CCAT:	Cerro Chajnantor Atacama Telescope
CTIO:	Cerro Tololo International Observatory
E-ELT:	European Extremely Large Telescope
GMT:	Giant Magellan Telescope
HST:	Hubble Space Telescope
JWST:	James Webb Space Telescope
LCO:	Las Campanas Observatory

LSST:	Large Synoptic Survey Telescope
NANTEN2:	Japanese for southern sky, 南天 nan = south, ten = heaven, sky)
NTT:	New Technology Telescope
POLARBEAR:	Polar Bear Project
QUIET:	Q/U Imaging Experiment
SMARTS:	Small & Moderate Aperture Research Telescope System
SOAR:	Southern Astrophysical Research
TAO:	Tokyo Atacama Observatory
UHERO:	University of Hawaii Economic Research Organization
VISTA:	Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy
VLT:	Very Large Telescope ¹
VLTi:	Very Large Telescope Interferometer (VLTi)
VST:	VLT Survey Telescope

Universidades chilenas

PUC:	Pontificia Universidad Católica de Chile
UA:	Universidad de Antofagasta
UCH:	Universidad de Chile
UCN:	Universidad Católica del Norte
UCSC:	Universidad Católica de la Santísima Concepción
UDA:	Universidad de Atacama
UDEC:	Universidad de Concepción
UDP:	Universidad Diego Portales
ULS:	Universidad de La Serena
UMCE:	Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación
UNAB:	Universidad Nacional Andrés Bello
UTFSM:	Universidad Técnica Federico Santa María
UV:	Universidad de Valparaíso

Universidades extranjeras

ANU:	Universidad Nacional de Australia
USP:	Universidad de Sao Paulo en Brasil

¹ VLT, más que un telescopio, es un conjunto de ocho telescopios instalados en el Observatorio Astronómico de Cerro Paranal: cuatro telescopios unitarios, de 8,2 m y cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros.



INDICE

AGRADECIMIENTOS	6
PRÓLOGO	7
PREÁMBULO	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivo	10
1.2 Alcance y resultados esperados	11
1.3 Metodología de trabajo	11
2. OBSERVATORIOS, TECNOLOGÍAS Y MODOS DE OBSERVACIÓN	12
2.1 Observatorios y rangos de observación	12
2.2 Observatorios espaciales y observatorios terrestres	13
2.3 Espejos y antenas	13
2.4 Instrumentos científicos y componentes ópticos	14
2.5 Tecnologías de observación	15
2.6 Gestión de datos	16
2.7 Modos de observación	16
3. INFRAESTRUCTURA PARA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA	18
3.1 Polos de observación astronómica	18
3.2 Principales observatorios en operación	20
3.3 Observatorios en construcción	21
3.4 Posibles observatorios proyectados a futuro	22
4. RECURSOS HUMANOS PARA LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA	23
4.1 Dotación de astrónomos	23
4.2 Formación de futuros astrónomos	23
4.3 Productividad de astrónomos	25
4.4 Centros de desarrollo tecnológico	26
4.5 Proyectos desarrollados por centros de desarrollo tecnológico	29
4.6 Formación y número de ingenieros	29
5. ACUERDOS DE COLABORACIÓN	30
5.1 Aportes del Estado de Chile	30
5.2 Beneficios recibidos	31
5.3 Evolución de los acuerdos	31
5.4 Oportunidades para la ingeniería	32

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS	33
6.1 Ciclo de vida de un proyecto	33
6.2 Etapa de proyecto	33
6.3 Etapa de operación y actualización de instalaciones	36
6.4 Financiamiento de proyectos astronómicos	37
6.5 Costos de inversión	38
6.6 Costos de operación	39
6.7 Inversión realizada y proyectada	40
7. REQUERIMIENTOS DE BIENES Y SERVICIOS	41
7.1 Requerimientos y perfiles	41
7.2 Avance científico	42
7.3 Desarrollo de nuevas tecnologías	43
7.4 Tecnologías Consolidadas	43
7.5 Bienes y servicios no diferenciados	44
8. OPORTUNIDADES PARA LA INGENIERÍA CHILENA	45
8.1 Oportunidades en la etapa de proyecto	45
8.2 Oportunidades en la etapa de operación	46
8.3 Oportunidad de formar nuevas empresas o realizar spin-off	47
8.4 Gestión de grandes volúmenes de datos	50
8.5 Observatorios turísticos	51
9. PRINCIPALES CONCLUSIONES	52
10. PROPUESTAS Y ACCIONES	55
11. BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	59
Anexo I: Glosario	59
Anexo II: Ejemplo de instrumentos de telescopios ópticos (VLT)	60
Anexo III: Principales proyectos desarrollados por los centros tecnológicos	61
Anexo IV: Organizaciones integrantes de consorcios astronómicos	64
Anexo V: Aporte de los integrantes de ALMA	65
Anexo VI: Ejemplo instituciones participantes en desarrollo de instrumentos astronómicos	67
Anexo VII: Observatorios turísticos	68



AGRADECIMIENTOS

El Instituto de Ingenieros de Chile hace un especial reconocimiento a aquellas personas que aceptaron la invitación a compartir sus visiones e informar a la Comisión sobre los problemas, retos, fortalezas y debilidades del tema objeto de estudio de la Comisión. Ellos son: Fernando Selman Rossi, Leopoldo Infante Lira, Álvaro Urzúa Marín, Ricardo Finger Camus y Gabriel Rodríguez García-Huidobro.

También corresponde dejar constancia del reconocimiento del Instituto a cada uno de los integrantes de la Comisión, los Ingenieros: Juan Carlos Barros Monge, Rodrigo Gómez Álvarez, Ricardo Nanjarí Román, Pedro Toledo Correa y el Astrónomo: Lucas A. Cieza, por su asistencia y colaboración en las sesiones de trabajo y en la redacción del presente informe.

Finalmente, un reconocimiento al Ingeniero Sr. Raúl Uribe Sawada, director de la Revista y Anales del Instituto, quien en su calidad de editor de las publicaciones de nuestra Corporación colaboró en la revisión del material que integra el presente informe. Se hace extensivo este reconocimiento al Sr. Carlos Gauthier Thomas, por el apoyo prestado al trabajo de la Comisión y al Sr. Uribe en su labor.

PRÓLOGO



Es un hecho reconocido que hoy, gracias a las excepcionales condiciones climáticas del norte de Chile y a los acuerdos suscritos entre el Estado de Chile y los consorcios de universidades e instituciones educacionales europeas y norteamericanas que se han instalado en el país, Chile es considerado, por diferentes astrónomos, como la capital mundial de la astronomía terrestre, actualmente el 40% de la capacidad de observación astronómica mundial se encuentra radicada en el país y se estima que ésta aumentará a 70%, cuando entren en operación los observatorios que están en etapa de proyecto.

Esta situación es vista por diferentes actores como una oportunidad única que debe ser aprovechada en beneficio del país, pero no existe consenso respecto de cuál es la oportunidad que debería ser aprovechada, ya que la respuesta a esta pregunta, dependerá de la visión particular de cada una de las entidades a las que se les consulte: universidades, centros de investigación, Gobierno, centros de observación astronómica, asociaciones académicas, gremiales o de empresarios, entre otras.

Los ingenieros, que utilizamos el conocimiento científico para dar respuesta a las necesidades de la sociedad y de las personas, vemos esta capacidad de observación como un recurso natural de alto valor, como lo fue en el pasado el salitre y recientemente el cobre, recurso que puede ser utilizado para desarrollar competencias tecnológicas únicas, que vayan en beneficio de la sociedad.

Con el objeto de identificar y analizar, desde la perspectiva de la ingeniería y de los ingenieros chilenos, las oportunidades que podría representar este hecho se formó en el Instituto de Ingenieros de Chile, un grupo de trabajo integrado por profesionales, en su mayor parte ingenieros, no necesariamente especialistas en astronomía, que luego de diferentes reuniones de trabajo y análisis, elaboraron este documento para ser presentado a las autoridades de Gobierno, centros de desarrollo tecnológico, asociaciones profesionales y de empresarios, centros de estudios, poder legislativo y judicial, entre otros.

Esperamos con este documento iniciar una primera conversación, desde el Instituto de Ingenieros de Chile hacia la sociedad, que permita aprovechar el incremento en la capacidad de observación astronómica terrestre en Chile mediante el desarrollo de competencias tecnológicas que aporten al trabajo de los astrónomos y que vayan en beneficio de la ingeniería, de los ingenieros y de la sociedad chilena.



PREÁMBULO

La astronomía es considerada una de las ciencias más antiguas; ha acompañado al hombre a través de la historia. Se cree que tuvo sus orígenes cuando las civilizaciones dejaron de ser nómadas y empezaron a convertirse en sedentarias. El interés por la observación astronómica surgió inicialmente, debido a la necesidad del hombre de entender los ciclos de la naturaleza para sobrevivir frente a los cambios climáticos y posteriormente, por la necesidad de buscar respuesta a las preguntas que se ha planteado desde sus orígenes.

La observación astronómica unida al desarrollo de instrumentos y equipos especializados, ha permitido al hombre entender de mejor manera el Universo. Hoy en día, la teoría más aceptada de la formación del universo establece que el origen de la Tierra comenzó hace 13.800 millones de años, en una gran explosión de energía que dio origen al tiempo, el espacio y a los primeros átomos del Universo. Una estimación realizada por Kornreich indica que, luego de miles de millones de años de evolución cósmica existen más de 100.000 millones de galaxias, cada una de las cuales alberga más de 100.000 millones de estrellas², en cada una de las cuales probablemente existen uno o más planetas similares a la Tierra.

El conocimiento del Universo es reciente. Hasta el año 1920, se creía que el Universo observable no se extendía más allá de la Vía Láctea. Su dimensión real se conoció hace menos de cien años, luego del Gran Debate³ entre Heber Curtis y Harlow Shapley en 1920, sobre la naturaleza galáctica o extra galáctica de las nebulosas espirales. Diez años después, Edwin Hubble determinó que el Universo se expandía y que las galaxias se alejaban entre ellas. En el año 1995, se descubrió el primer planeta que giraba en torno a una estrella de tipo solar⁴. Hoy se conocen miles de estos planetas “extrasolares”.

Los descubrimientos recientes más relevantes han ocurrido, en gran medida, gracias a las observaciones astronómicas realizadas en el norte de Chile. En el año 1998, por observaciones de supernovas distantes realizadas en Chile, se supo que el Universo no sólo se expandía, sino que el ritmo de esta expansión se aceleraba con el tiempo. Por este trabajo, la Real Academia Sueca de las Ciencias les otorgó el Premio Nobel de Física 2011, a los investigadores estadounidenses Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess. La Real Academia Sueca atribuye gran parte de ese hallazgo al desarrollo de métodos para medir las distancias en el cosmos⁵, realizado por los astrónomos chilenos Mario Hamuy y José Maza⁶.

En el año 2006, gracias a las posibilidades que entrega el interferómetro⁷ del Very Large Telescope de ESO (VLT), un grupo de astrónomos pudo conocer cómo giran los discos alrededor de las estrellas tipo B⁸, pregunta que fue planteada desde el descubrimiento de la primera de estas estrellas, Gamma Cassiopeiae, por el astrónomo italiano Angelo Secchi, hace ya 140 años.

² David Kornreich, Profesor Asistente de Física y Astronomía de la Universidad de Ithaca College, Nueva York.

³ https://opod.nasa.gov/diamond_jubilee/debate20.html

⁴ Michel Mayor y Didier Queloz (1995). «A Jupiter-mass companion to a solar-type star». *Nature* 378. 355-359.

⁵ <http://ciperchile.cl/2011/10/05/chileno-que-descubrio-la-expansion-del-universo-%E2%80%99Cnos-tienen-convenientemente-bien-idiotizados%E2%80%9D/>

⁶ En el libro *el 4% del universo*, el periodista y escritor estadounidense Richard Panek plantea que el rol de Chile en el descubrimiento de la energía oscura ha sido a menudo pasado por alto y que el resultado obtenido por el grupo de norteamericanos fue posible, gracias a los datos obtenidos por los astrónomos chilenos, los que les fueron facilitados con el compromiso de no publicarlos, compromiso que no respetaron. <https://www.anip.cl/astronomos-chilenos-fueron-claves-en-como-se-entiende-hoy-el-universo>

⁷ Tecnología en la que se combinan las señales de dos o más telescopios individuales consiguiendo que éstos operen como una sola unidad, con un diámetro de espejo equivalente a la distancia entre los telescopios.

⁸ Estrellas muy brillantes, masivas y con una alta temperatura que rotan a alta velocidad, expulsando masa por sus polos a través de un fuerte viento estelar y que están rodeadas por un disco de materia a la altura de su ecuador

En el año 2016, también por observaciones realizadas en Chile, se descubrió que una de las estrellas más cercanas al sol, Próxima Centauri, albergaba un planeta, denominado Próxima b que tiene una temperatura en su superficie que permite la existencia de agua en estado líquido, por lo que podría ser el lugar más próximo a la tierra que albergaría vida fuera del Sistema Solar.

Las condiciones naturales del norte de Chile y los compromisos de uso de tiempo de observación, establecidos en los acuerdos suscritos con los observatorios internacionales que se han instalado en el país, han permitido que nuestro país sea un actor relevante en la astronomía mundial. En las próximas décadas, utilizando la nueva generación de telescopios que hoy se encuentran en construcción, podremos buscar vida en los planetas vecinos, y en un futuro no muy lejano, en términos astronómicos, es probable que la humanidad esté en condiciones de conocer alguno de estos planetas.

La astronomía genera grandes posibilidades y oportunidades para desarrollar competencias tecnológicas que podrían permitir que la ingeniería y los ingenieros locales desarrollen bienes y servicios, de alto valor agregado, que incluso podrían trascender a otros sectores de la economía, como la industria minera, de alimentos o de energía, además de constituir desafíos atractivos para las nuevas generaciones de ingenieros.

Este documento representa una primera mirada del Instituto de Ingenieros de Chile hacia un área nueva en la que convergen ciencia e ingeniería y en la que se vislumbran interesantes posibilidades para que la ingeniería y los ingenieros chilenos, profesionales que han aprendido a agregar valor a los recursos naturales, lo sigan haciendo, en una economía basada en el conocimiento⁹.

⁹ Sector de la economía que utiliza el conocimiento como elemento fundamental para generar valor y riqueza por medio de su transformación a información. Abarca entre otros, rubros tales como: educación, investigación y desarrollo, alta tecnología, informática, telecomunicaciones, robótica, nanotecnología e industria aeroespacial.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social de Chile ha estado históricamente ligado a la explotación de sus recursos naturales. A principios del siglo XX, el salitre tuvo un importante rol en la transformación del país, posteriormente, la exportación de celulosa, salmónes, alimentos y cobre, permitieron mejorar el ingreso y las condiciones de vida de la población, proceso en el que la ingeniería y los ingenieros chilenos tuvieron una participación importante.

El norte de Chile posee condiciones climáticas privilegiadas que lo han convertido en uno de los mejores lugares del mundo para la observación astronómica. Esta condición y los diferentes convenios suscritos a partir del año 1963 entre el Estado de Chile y los Consorcios Internacionales de Observación Astronómica han permitido, al establecerse en ellos tiempos de observación para astrónomos locales, un desarrollo sin precedentes de la astronomía nacional.

Actualmente, el 40% de la capacidad de observación astronómica global se encuentra radicada en Chile. Se estima que cuando estén terminados los proyectos: Giant Magellan Telescope (GMT), Large Synoptic Survey Telescope (LSST) y European Extremely Large Telescope (E-ELT), esta capacidad aumentará a 70%. Chile, en la opinión de los especialistas, se ha ganado el nombre de “capital mundial de la astronomía terrestre”.

A la fecha se han invertido MUS\$ 2.640¹⁰ en la construcción de observatorios astronómicos y existe una inversión proyectada para los próximos años de MUS\$ 3.230. Al igual que lo que ocurre con proyectos en otras áreas de la economía, intensivas en tecnología, como son minería y energía, la mayor parte de esta inversión corresponde a equipos y componentes diseñados y fabricados por proveedores globales en el extranjero, que ingresan al país como productos terminados.

La historia de Chile nos demuestra que, a pesar de tener recursos naturales únicos y profesionales preparados, no hemos sido capaces de desarrollar la tecnología que necesitamos para explotar estos recursos y nos hemos limitado a comprarla a los países más desarrollados.

Ante este escenario, de incremento en la capacidad local de observación astronómica mundial y considerando nuestra historia, resulta imperativo aprovechar las oportunidades que se presentan para desarrollar capacidades científicas y tecnológicas que permitan al país formar parte del descubrimiento del universo y beneficiarse del conocimiento que se deriva de él, tanto directo como indirecto.

1.1 Objetivo

El Instituto de Ingenieros de Chile se ha caracterizado desde sus orígenes, en el año 1888, por su visión de largo plazo, su contribución al desarrollo del país y su compromiso con la formación de ingenieros. En virtud ello y en el escenario planteado anteriormente, su Directorio tomó la decisión de crear una comisión de trabajo con el objetivo de identificar y analizar las oportunidades que representa para la ingeniería y los ingenieros chilenos, el haberse convertido en la “capital mundial de la astronomía terrestre”, considerando los diferentes ámbitos en los que la ingeniería actúa, tales como: servicios de ingeniería, suministro de equipos y componentes, servicios de construcción, montaje y puesta en marcha, servicios de mantenimiento de equipos e instalaciones, desarrollo de nuevas empresas de base tecnológica y formación de ingenieros.

¹⁰ Astronomy in Chile Development of the Chilean Astronomical Community and Projections. Mónica Rubio Ph.D. Director Astronomy Program CONICYT. http://web.sofoja.cl/ppt/O4_MRubio.pdf

1.2 Alcance y resultados esperados

Considerando lo indicado anteriormente como objetivo de la Comisión, esta abordó los siguientes temas: desarrollo, capacidades instaladas y futuras de la astronomía en Chile, acuerdos de colaboración del Estado de Chile con los Centros Astronómicos Internacionales, características de los proyectos astronómicos, requerimientos de bienes y servicios, oportunidades para la ingeniería nacional y conclusiones.

Como resultado del trabajo, se espera presentar a las autoridades de Gobierno, centros de desarrollo tecnológico, asociaciones profesionales y de empresarios, centros de estudios, Poder Legislativo y Judicial, entre otros, un conjunto de propuestas y recomendaciones que permitirían aprovechar las capacidades actuales y futuras de observación astronómica, en beneficio de la ingeniería, de los ingenieros y de la sociedad chilena.

1.3 Metodología de trabajo

Una vez formado el grupo de trabajo, se fijaron reuniones periódicas de la Comisión; en las sesiones de trabajo se recibió a académicos, ejecutivos de empresas, profesionales y funcionarios de Gobierno relacionados con el tema, los que hicieron presentaciones sobre sus áreas de especialización. Ellos son: Fernando Selman Rossi, Astrónomo del European Southern Observatory (ESO), Leopoldo Infante Lira, director del Centro de Astro-Ingeniería de la Universidad Católica (AIUC), Álvaro Urzúa Marín, Gerente General de AXYS, Ricardo Finger Camus, docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile y Gabriel Rodríguez García-Huidobro, Director de Energía, Ciencia y Tecnología e Innovación del Ministerio de Relaciones Exteriores. Las exposiciones realizadas por los invitados contribuyeron a las discusiones, reflexiones y aportes que siguieron por parte de los miembros permanentes.

El trabajo realizado requirió entender la labor de un astrónomo, conocer los instrumentos y tecnologías que utiliza en su actividad, identificar la infraestructura física y los recursos humanos disponibles y requeridos, las instituciones en las que ellos se forman y en las que trabajan, conocer los acuerdos suscritos entre el Estado y los consorcios astronómicos, las principales características de los proyectos astronómicos y sus requerimientos de bienes y servicios, para identificar las oportunidades que se pueden presentar para la ingeniería nacional y, al contrastar éstas con las capacidades disponibles, realizar propuestas que permitirían aprovechar las capacidades actuales y futuras de observación astronómica.

2. OBSERVATORIOS, TECNOLOGÍAS Y MODOS DE OBSERVACIÓN

Los astrónomos estudian la física del universo e investigan estrellas, planetas, galaxias y otros cuerpos celestes, buscando respuestas a algunas preguntas que se ha planteado el hombre desde sus inicios como pueden ser, el origen del universo o la existencia de vida en otros planetas. Para realizar su trabajo, requieren datos que obtienen utilizando diferentes tipos de telescopios e instrumentos y distintas tecnologías y modos de observación, como se explica a continuación.

2.1 Observatorios y rangos de observación

Los astrónomos, dependiendo del fenómeno que deseen observar, utilizan diferentes tipos de telescopios, los que utilizan todo el rango del espectro electromagnético¹¹, desde los rayos gamma¹² hasta las ondas de radio¹³ y diferentes tipos de telescopios, los que se pueden dividir en dos grandes grupos: ópticos e infrarrojos (OIR) y milimétricos o radiotelescopios. Los telescopios ópticos e infrarrojos recogen la luz mediante espejos, y los milimétricos o radiotelescopios, utilizan antenas parabólicas. Dependiendo del rango de observación en el espectro se definen los instrumentos que serán utilizados en la observación astronómica.

La astronomía óptica se orienta al rango de longitudes de onda de luz visible, desde 400 nm a 700 nm, en tanto que la astronomía infrarroja se orienta al rango de longitudes de onda desde 700 nm a 1 mm; dependiendo de la longitud de onda, existen diferentes sub denominaciones: astronomía infrarroja cercana, para longitudes de onda comprendidas entre 1 y 5 μm , astronomía infrarroja media, entre 5 μm y 25-40 μm y astronomía infrarroja lejana, desde 25-40 μm a 200-350 μm . La astronomía milimétrica o radioastronomía se orienta al rango de longitudes de onda superiores a 1 mm.

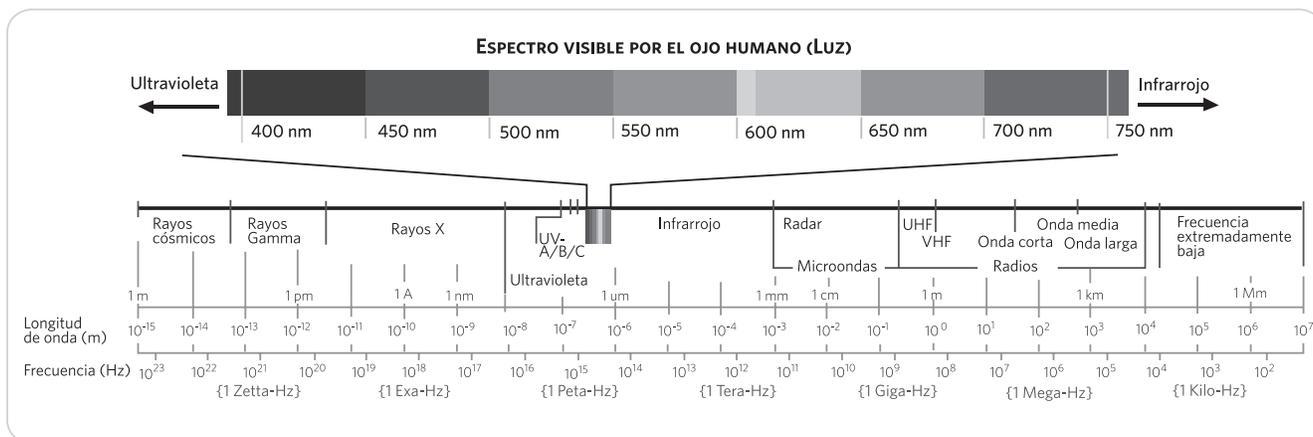


Figura 1: Espectro electromagnético¹⁴

¹¹ Radiación electromagnética que emite o absorbe un cuerpo y que permite su identificación. Se puede analizar ésta utilizando espectroscopios que, además permiten determinar su longitud de onda, frecuencia e intensidad.

¹² Tipo de radiación electromagnética de alta energía que se genera, entre otras razones, en fenómenos astrofísicos de alta energía, como explosiones de supernovas o núcleos de galaxias activas.

¹³ Tipo de radiación electromagnética de alta energía que puede ser creada por fenómenos naturales tales como relámpagos, o por objetos astronómicos.

¹⁴ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-es.svg

Una de las características más importantes de un telescopio es su resolución. Esta es una condición de diseño que indica la capacidad que tiene un instrumento de mostrar, de forma individual, dos objetos que se encuentran muy juntos.

La resolución se mide en segundos de arco¹⁵ y depende de la longitud de onda en la que opera y del diámetro del espejo o antena; cuanto mayor sea la resolución, mayor es la capacidad del telescopio para mostrar separadamente a dos cuerpos celestes vecinos¹⁶.

2.2 Observatorios espaciales y observatorios terrestres

La atmósfera terrestre absorbe una parte importante de la radiación electromagnética, en ciertas longitudes de onda, particularmente, los rayos gamma y rayos X. La observación astronómica se realiza, analizando las ondas electromagnéticas, por lo que es imposible observar desde la tierra espectros en las bandas absorbidas por la atmósfera. Esta debe realizarse a través de sondas, satélites o telescopios espaciales. La turbulencia atmosférica¹⁷ además, disminuye la resolución de los observatorios terrestres y con ello la calidad de las imágenes obtenidas. Los telescopios terrestres se ven afectados también por factores meteorológicos y por la contaminación lumínica¹⁸ que ocasionan las ciudades cercanas. Estas limitaciones han incentivado la construcción de telescopios espaciales que han entregado información muy valiosa del cosmos, el más conocido de ellos es el Telescopio Espacial Hubble (Hubble Space Telescope o HST), que fue lanzado al espacio el 24 de abril de 1990, tiene un espejo de 2,4 m de diámetro y tuvo un costo inicial, en el momento de su lanzamiento al espacio, de MUS\$ 1.500. Este telescopio fue por décadas, el instrumento óptico de mayor resolución.

Los observatorios espaciales, si bien permiten obtener imágenes con mayor resolución y no sufren la contaminación lumínica de las ciudades cercanas, tienen un costo mayor que el de los observatorios terrestres y presentan mayores dificultades para el mantenimiento y actualización de los equipos e instrumentos instalados en ellos. El Telescopio Espacial James Webb (James Webb Space Telescope o JWST), a modo de ejemplo, actualmente en desarrollo y que se espera que suceda en el año 2020 al HST tiene un presupuesto estimado de MUS\$9.000¹⁹, es decir, 53,37% más que lo que se ha invertido a la fecha en construcción de observatorios astronómicos en el país (MUS\$ 2.640) sumado a lo que está proyectado a invertirse en los próximos años (MUS\$ 3.230).

2.3 Espejos y antenas

El componente principal de un observatorio astronómico es el espejo, en el caso de un observatorio óptico e infrarrojo o las antenas, en el caso de un observatorio milimétrico o radiotelescopio. Estos son componentes de alta precisión, fabricados a la medida para cada proyecto, por empresas altamente especializadas, usualmente originarias de los países miembros del consorcio astronómico.

¹⁵ Un segundo de arco equivale 1/60 de un minuto de arco, el que equivale a 1/60 de un grado. Un grado se define como 1/360 de un círculo. De esta forma, un segundo de arco equivale a 1/1.296.000 del arco de un círculo.

¹⁶ El indicar que un telescopio o radiotelescopio tiene una resolución de 1 segundo de arco significa que esta es la mínima separación que deben tener dos cuerpos celestes para que puedan ser observados individualmente.

¹⁷ Agitación de la atmósfera que se caracteriza por un cambio repentino en la dirección e intensidad del viento en una corta distancia en sentido vertical.

¹⁸ Esta tiene como consecuencia una disminución en el brillo del cielo nocturno, por reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y en las partículas del aire urbano, disminuyendo la visibilidad de las estrellas y de otros objetos celestes.

¹⁹ <https://www.scientificamerican.com/article/is-the-james-webb-space-telescope-too-big-to-fail/>

Espejos

El elemento principal en un telescopio óptico o infrarrojo es el espejo. Este es un elemento de alta precisión que, debido a las restricciones del proceso de fabricación y transporte, debe ser fabricado en varias piezas, las que se ensamblan posteriormente y actúan como un solo espejo. El límite actual en la fabricación de espejos de una sola pieza o monolíticos, es de 8,2 metros de diámetro; por ello, los telescopios de mayor diámetro se fabrican por segmentos hexagonales que se disponen de manera tal que el total de ellos forman una superficie equivalente a la de un espejo monolítico. A modo de ejemplo, el observatorio Keck, ubicado en Hawaii, tiene un espejo de 10 m. de diámetro y está compuesto por 36 segmentos individuales que operan como un solo espejo²⁰ y el proyecto European Extremely Large Telescope (E-ELT), que será en el momento que inicie su operación en el año 2024, el telescopio óptico más grande del mundo, considera un telescopio de 39 metros de diámetro que será construido en base a 798 segmentos hexagonales de 1,4 metros y 5 centímetros de espesor que trabajarán juntos, como un espejo de una sola pieza.

Un aspecto relevante en la fabricación del espejo es la rugosidad de su superficie. El Giant Magellan Telescope (GMT), a modo de ejemplo, que está en proceso de construcción en el norte de Chile, estará formado por siete espejos de 8,4 m de diámetro cada uno y la rugosidad de cada uno de los ellos será de no más de 19 nanómetros (0,000000019 metros). Para dimensionar la suavidad requerida de la superficie del espejo, si supusiéramos que el diámetro del espejo fuera del tamaño de todo Chile, las máximas rugosidades que existirían en su superficie deberían ser del orden de 1 centímetro²¹.

Antenas

Los observatorios milimétricos o radiotelescopios utilizan antenas para captar la radiación proveniente de los objetos astronómicos, cada una de las cuales tiene una gran superficie reflectante que captura la radiación proveniente de los objetos astronómicos distantes y la focaliza en un detector que mide esta radiación. A diferencia de lo que ocurre con la superficie reflectora de un telescopio, los platos no requieren tener un acabado tan preciso como el espejo de un telescopio, pero deben tener una superficie reflectante lisa.

Las antenas del proyecto Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), 66 en total, tienen una superficie con una rugosidad máxima de 25 micrómetros (0,000025 metros), además, deben poder dirigirse y posicionarse con gran precisión, apuntando con una resolución angular de 0,6 arcosegundos²².

2.4 Instrumentos científicos y componentes ópticos

Los telescopios utilizan para la observación del espacio, además de espejos y antenas, sofisticados instrumentos científicos, diseñados para observar, un rango específico del espectro electromagnético, con una determinada resolución. Entre estos se encuentran, entre otros, cámaras CCD²³, que transforman una señal luminosa en una señal eléctrica o

²⁰ Fuente: <http://www.keckobservatory.org/about>

²¹ Andrés Jordán Académico del Instituto de Astrofísica de la U. Católica de Chile. <http://www.emol.com/noticias/Tecnologia/2016/05/18/800245/Columna-de-Astronomia--Los-espejos-gigantes-que-estudian-el-cosmos.html>

²² Un arcosegundo es una unidad de medida angular que equivale a 1/60 del minuto de arco y a 1/3600 del grado sexagesimal

²³ CCD o Charge Coupled Device, es un dispositivo que permite transformar una señal luminosa en una señal eléctrica. Este dispositivo hizo posible sustituir la fotografía convencional por la fotografía digital, a partir de los años 80.

espectrógrafos que permiten conocer las características de un objeto distante, analizando su espectro electromagnético. Estos instrumentos son fabricados usualmente por consorcios tecnológicos relacionados con los países socios del consorcio astronómico. En el Anexo II se adjunta, a modo de referencia, un conjunto de instrumentos utilizados en el Very Large Telescope (VLT).

Además de los espejos, antenas e instrumentos, los telescopios requieren para su operación diferentes componentes ópticos tales como espejos secundarios, lentes, filtros, redes de difracción, prismas o cronógrafos, entre otros.

2.5 Tecnologías de observación

El desarrollo de los modernos y más poderosos telescopios ha requerido desarrollar nuevas tecnologías de observación, para aumentar la resolución y la capacidad de análisis de los datos recopilados, como las que se indican a continuación.

Óptica activa y adaptativa

Uno de los grandes avances tecnológicos de las últimas décadas en la astronomía, ha sido el desarrollo de las ópticas activa y adaptativa. Ellas han permitido por ejemplo que, telescopios terrestres de 10 metros de diámetro tengan una resolución 4 veces superior a la del Hubble Space Telescope (HST), de 2,4 metros de diámetro, por una fracción de su costo. El uso de esta tecnología permitirá que el observatorio European Extremely Large Telescope (E-ELT), actualmente en construcción, tenga una resolución 16 veces mayor que la del HST, con un costo de inversión 20% menor y que sea factible instalar observatorios astronómicos terrestres de alta resolución, en sitios astronómicos de baja turbulencia, como el Desierto de Atacama.

Óptica activa

Los telescopios ópticos reúnen las ondas del espectro electromagnético utilizando un espejo primario. Mientras mayores sean las dimensiones de éste, mayor será la captación de ondas y mayor será la información que se podrá obtener en cada observación. La evolución de los telescopios ha seguido la tendencia de tener cada vez espejos primarios de mayor diámetro. El problema que se presenta es que para que el espejo mantenga su forma al desplazarse el telescopio, es necesario hacerlo más grueso y pesado, con lo que empieza a perder precisión. La óptica activa es una tecnología que permite resolver este problema, incorporando pistones llamados “actuadores” que ajustan la forma del espejo durante las observaciones permitiendo mantener la calidad de la imagen²⁴.

Óptica adaptativa

La atmosfera de la tierra es turbulenta y, aun en los mejores lugares del mundo para la observación astronómica, las imágenes recibidas se distorsionan. Esto puede resolverse efectuando observaciones desde el espacio, pero el alto costo de operar un telescopio espacial en relación con utilizar un telescopio terrestre limita el tamaño de éstos; por ello, los astrónomos se centraron en desarrollar la tecnología de óptica adaptativa. Esta tecnología ha permitido resolver este problema, mediante el uso de un sistema de espejos deformables, controlados computacionalmente, que pueden corregir en tiempo real las distorsiones causadas por la turbulencia de la atmósfera terrestre lográndose de esta forma imágenes tan nítidas como las tomadas en el espacio²⁵.

²⁴ http://www.eso.org/public/teles-instr/technology/active_optics/

²⁵ http://www.eso.org/public/chile/teles-instr/technology/adaptive_optics/

Interferometría

Considerando que, mientras más grande sea el espejo o la antena de un telescopio, mejor será su resolución y que el aumentar su tamaño es una tarea técnica compleja, los astrónomos han desarrollado una tecnología llamada interferometría en la que combinan las señales de dos o más telescopios individuales y consiguen que éstos operen como una sola unidad, con un diámetro de espejo equivalente a la distancia entre los telescopios²⁶.

Espectroscopía

Los astrónomos analizan los planetas, estrellas y galaxias a través de las ondas electromagnéticas recibidas en un telescopio, las que son divididas en sus diferentes componentes o longitudes de onda. Esta técnica, que recibe el nombre de espectroscopía, es una de las principales herramientas que tienen los astrónomos para conocer las principales propiedades de estrellas, planetas y galaxias distantes, tales como su composición química y movimiento.

2.6 Gestión de datos

Los telescopios que se encuentran en operación generan una gran cantidad de datos que deben ser recibidos, almacenados y decodificados. El observatorio ALMA genera actualmente un Terabyte (TB) de datos al día. Este está compuesto por 66 antenas: cincuenta y cuatro de 12 m. de diámetro y doce de 7 m. de diámetro. En su máxima resolución, todas las antenas apuntan hacia el mismo objeto celeste. Para recibir las ondas de radio y generar imágenes detalladas, se deben procesar los datos recopilados por las antenas que pueden estar separadas entre ellas hasta 16 kilómetros. El procesamiento de datos es realizado por el correlacionador²⁷ de ALMA, que es uno de los súper computadores más poderosos del mundo. Utiliza 134 millones de procesadores, puede realizar hasta 17.000 billones de cálculos por segundo²⁸ y se encuentra ubicado en el sitio de operaciones de ALMA, en el Desierto de Atacama, a 5.000 metros de altura.

El Large Synoptic Survey Telescope (LSST), una vez que empiece a operar, será capaz de examinar en pocos días, la totalidad del cielo visible y generará una cantidad tan grande de datos, 30 terabytes (TB) por noche, en el año 2022 que será necesario desarrollar una industria que sea capaz de gestionar éstos.

2.7 Modos de observación

Las observaciones que efectúan los astrónomos se realizan el día y hora que les han sido asignados. El tiempo de observación, al estar establecido en convenios internacionales, se asigna en llamados a concurso semestrales en los que los investigadores presentan sus propuestas para la evaluación de un comité de asignación de tiempo de observación, que sigue las reglas de elegibilidad para el uso del tiempo que tiene cada telescopio²⁹. En paralelo a ello la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS), con la finalidad de ayudar a los comités de asignación de tiempo de observación de cada observatorio, elabora y mantiene actualizada una lista blanca de los investigadores que pueden tener acceso al tiempo de telescopio que le corresponde a la comunidad chilena.

²⁶ <http://www.eso.org/public/chile/teles-instr/technology/interferometry/>

²⁷ Súper computador que recibe las señales de las distintas antenas, las mezcla y guarda los datos, los que serán posteriormente descargados y analizados por los científicos.

²⁸ <http://www.almaobservatory.org/es/comunicados-de-prensa/listo-el-supercomputador-que-permite-a-alma-funcionar-como-un-poderoso-telescopio/>

²⁹ <http://www.sochias.cl/tiempo-de-observacion/acceso-a-tiempo-de-observacion>

Existen diferentes modos en los que los astrónomos pueden realizar sus observaciones, dependiendo del tipo de interacción que tengan con el operador del instrumento. Estos modos se pueden clasificar en: observación con interacción local, observación con interacción remota y observación sin interacción³⁰.

En la medida en que exista una mayor interacción entre el investigador y el operador del instrumento, la observación tendrá un mayor costo por la logística asociada pero el astrónomo puede, al tener una mayor interacción con el operador del telescopio, modificar su plan de observación. Al tener el astrónomo una menor interacción con el operador es posible hacer un uso más eficiente del telescopio programando las observaciones según las condiciones atmosféricas del momento, pero no es posible modificar el plan de observación.

Observación con interacción local

Este es el modo tradicional de observación astronómica; el astrónomo se desplaza a las instalaciones en las que realizará la observación y efectúa ésta, en el horario que le ha sido asignado, con la ayuda del personal técnico del observatorio. Esta observación la puede hacer a través del mismo telescopio o en una sala de control cercana. En este modo de observación el científico tiene el control total del instrumento durante el tiempo de observación. El telescopio es operado por un miembro del equipo del observatorio, que sigue las indicaciones del astrónomo.

Observación con interacción remota

En este modo de observación, el astrónomo controla la observación sin necesidad de estar presente en el observatorio. Esto lo puede hacer conectándose con la sala de control y dando instrucciones directamente al operador del instrumento, quien controla su movimiento o manteniendo él, el control del instrumento, sin necesidad de interactuar con el operador.

Observación sin interacción

En este modo de observación, el operador del instrumento realiza las acciones necesarias para cumplir con el plan de observaciones solicitado por el astrónomo en su programa de observación o bien, el instrumento funciona automáticamente, sin la intervención del operador, siguiendo el plan de observación definido.

³⁰ Cameron Partners. *Estudio de nuevos negocios y spin-offs a partir de la astroingeniería*. Santiago, Chile (2013).

3. INFRAESTRUCTURA PARA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

En la actualidad se encuentran operando en Chile, más de una docena de observatorios astronómicos, que van desde pequeños telescopios de pocos centímetros de diámetro, hasta los telescopios ópticos y radiotelescopios más avanzados del mundo. A estos se deben sumar los que se encuentran en construcción y los que están en etapa de proyecto.

3.1 Polos de observación astronómica

El desarrollo de la capacidad de observación astronómica terrestre se ha concentrado en tres regiones: Antofagasta, Atacama y Coquimbo, como se indica a continuación.

Antofagasta

En la región de Antofagasta, se distinguen dos polos de desarrollo astronómico: en la costa y hacia el interior.

En la costa se encuentran Cerro Paranal y Cerro Armazones. En Cerro Paranal, está el Observatorio Cerro Paranal, que es administrado por el European Southern Observatory (ESO) y alberga el Very Large Telescope (VLT), que está constituido por cuatro telescopios de 8,2 metros de diámetro y cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros de diámetro, un interferómetro, el Very Large Telescope Interferometer (VLTI), dos telescopios de survey o sondeo³¹, el VST (VLT Survey Telescope), de 2,6 metros de diámetro y el VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), de 4,1 metros. En Cerro Armazones, está proyectado construir el European Extremely Large Telescope (E-ELT)³².

Hacia el interior, en la Comuna de San Pedro de Atacama, se ubica el llano de Chajnantor que tiene condiciones únicas para la observación del Universo, cielos excepcionalmente claros y transparentes y fácil acceso. En una planicie ubicada a más de 5.000 m de altura, se creó el Parque Astronómico de Atacama. En diferentes sectores de este parque: Cerro Toco, Pampa La Bola, Cerro Chajnantor y Llano de Chajnantor, se han instalado diferentes tipos de observatorios, según se indica:

En el Cerro Toco, se localiza el Atacama Cosmology Telescope (ACT), el proyecto POLARBEAR y el Cosmology Large Angular Scale Surveyor (CLASS), de la Universidad Johns Hopkins. En Pampa la Bola, opera el Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)³³ y el NANTEN2³⁴. En el Llano de Chajnantor se encuentran en operación, los reflectores de ALMA³⁵, Atacama Pathfinder Experiment (APEX)³⁶ y el telescopio miniTAO³⁷. En este mismo sector, está proyectada la instalación de los siguientes telescopios: Tokyo Atacama Observatory (TAO)³⁸, Q/U Imaging Experiment (QUIET)³⁹ y Cerro Chajnantor Atacama Telescope (CCAT)⁴⁰.

³¹ Los telescopios de sondeo (survey) están diseñados para tomar de forma rápida, imágenes de grandes áreas del cielo, creando archivos de imágenes que serán utilizados por los astrónomos en el futuro.

³² <http://www.eso.org/public/astronomy/projects/e-elt.html>

³³ http://www.nro.nao.ac.jp/%7Easte/index_e.html

³⁴ <http://www.astro.uni-koeln.de/nanten2/node/25>

³⁵ <http://www.almaobservatory.org/en/technology>

³⁶ <http://www.apex-telescope.org/>

³⁷ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/intro/intro4.html>

³⁸ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/>

³⁹ <http://quiet.uchicago.edu/>

⁴⁰ <http://www.submm.org/>

Atacama

En la región de Atacama, se encuentra el Observatorio Las Campanas⁴¹ (Las Campanas Observatory o LCO), que opera desde el año 1969, mediante un acuerdo de colaboración con la Universidad de Chile, bajo el auspicio del Ministerio de Relaciones Exteriores y es administrado por la Carnegie Institution de Washington⁴² (CIW). En este observatorio están instalados los telescopios Magallanes de 6,5 m, Du Pond, de 2,5 m, y Swope⁴³ de 1,0 m. Está en construcción el telescopio Giant Magellan Telescope (GMT)⁴⁴, de 24,5 m.

Coquimbo

En la región de Coquimbo se pueden distinguir tres sectores en los que se han instalado observatorios: Cerro Tololo, Cerro Pachón y Cerro La Silla.

— Cerro Tololo

En Cerro Tololo, se encuentra el Cerro Tololo International Observatory (CTIO)⁴⁵, este opera desde el año 1967, luego de la compra realizada por la Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) de la Estancia El Totoral, para ser utilizada como observatorio astronómico. Está ubicado a 500 km al norte de Santiago, y a 52 Km al interior de La Serena. Los principales telescopios que operan en este observatorio son el telescopio de 4,0 m Víctor Blanco y los telescopios Small & Moderate Aperture Research Telescope System (SMARTS) de 1,5m, 1,3m, 1,0m, y 0,9 m⁴⁶

— Cerro Pachón

Cerro Pachón está ubicado 10 km al sureste de Cerro Tololo y en él están instalados los telescopios Gemini South⁴⁷ y Southern Astrophysical Research (SOAR)⁴⁸. Estos son operados también por el CTIO. Está en construcción en este sitio, el telescopio de 8,4 m Large Synoptic Survey Telescope (LSST)⁴⁹.

— Cerro La Silla

En Cerro La Silla, se encuentra el Observatorio La Silla⁵⁰ que es operado por el European Southern Observatory (ESO) y fue el primer observatorio que tuvo ESO en Chile, en la década de los sesenta.

El observatorio está ubicado a 600 kilómetros al norte de Santiago. Los principales telescopios que operan en este observatorio son el telescopio 3,6 m ESO reflector y el telescopio de 3,5 m New Technology Telescope (NTT)⁵¹

⁴¹ <http://www.lco.cl/>

⁴² <http://obs.carnegiescience.edu/>

⁴³ <http://www.lco.cl/telescopes-information/magellan/>, <http://www.lco.cl/telescopes-information/irenee-du-pont/>, <http://www.lco.cl/telescopes-information/henrietta-swoppe/>

⁴⁴ (<http://www.gmto.org/>)

⁴⁵ <http://www.ctio.noao.edu/noao/>

⁴⁶ <http://www.ctio.noao.edu/telescopes/60/1-5m.html>, (<http://www.ctio.noao.edu/telescopes/50/1-3m.html>), (<http://www.astro.yale.edu/smarts/smarts1.0m.html>), (<http://www.ctio.noao.edu/telescopes/36/0-9m.html>)

⁴⁷ <http://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites>

⁴⁸ <http://www.soartelescope.org/about-soar>

⁴⁹ <http://www.lsst.org/lsst/public>

⁵⁰ <http://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla.html>

⁵¹ <http://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/36.html>, <http://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/ntt.html>

3.2 Principales observatorios en operación

Los observatorios astronómicos más importantes que se encuentran actualmente en operación son los siguientes:

ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

ALMA, con una inversión de 1.300 millones de dólares, es actualmente el mayor radio observatorio astronómico terrestre. Está compuesto por 66 antenas de alta precisión ubicadas en el llano de Chajnantor, a 5.000 metros de altitud en el norte de Chile. La separación máxima de sus antenas llega a los 16 km.

En su configuración más extendida, ALMA alcanza una resolución espacial de 20 milisegundos de arco. La resolución angular más alta que puede alcanzar es de unos 0,05 segundos de arco, muy superior a la resolución del Large Millimeter Telescope (LMT), ubicado en México, que es actualmente el telescopio de plato único, y movable, más grande del mundo, que es aproximadamente de 8,5 segundos de arco.

Este observatorio pertenece a una asociación internacional formada por el Observatorio Europeo Austral⁵² (ESO), la Fundación Nacional de Ciencia de EE. UU.⁵³ (NSF), los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales de Japón⁵⁴ (NINS), el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá⁵⁵ (NRC), la Academia Sinica de Taiwán⁵⁶ (AS) y el Instituto Coreano de Ciencia Espacial y Astronomía⁵⁷ (KASI).

Gemini South

El telescopio Gemini South, con una inversión de 300 millones de dólares, cuenta con instrumentos ópticos e infrarrojos y con un espejo de 8,1 m de diámetro. Es gemelo del telescopio Gemini North que está ubicado en la Isla Grande de Hawaii. Gemini South se localiza a 80 km de La Serena en Cerro Pachón, a 2.700 metros de altura sobre el nivel del mar. Gemini South es un proyecto internacional en el que participan: EE.UU, Canadá, Brasil, Argentina, y Chile como país huésped. Es administrado por la Asociación de Universidades para la Investigación en la Astronomía⁵⁸ (AURA), bajo un acuerdo de cooperación con la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos⁵⁹ (NSF).

Magallanes

Los telescopios Magallanes, que tuvieron un costo de construcción de 100 millones de dólares, son dos telescopios ópticos gemelos, de 6,5 m de diámetro, que están situados en el Observatorio Las Campanas (LCO), en Atacama. Los telescopios son operados por la Institución Carnegie de Washington (CIW) y cuentan con la participación de importantes universidades de EE. UU, como la Universidad de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, la Universidad de Chicago y la Universidad de Arizona.

⁵² *European Southern Observatory*

⁵³ *National Science Foundation*

⁵⁴ *National Institutes of Natural Sciences (Japan)*

⁵⁵ *National Research Council (Canada)*

⁵⁶ *Academia Sinica in Taiwan*

⁵⁷ *Korea Astronomy and Space Science Institute*

⁵⁸ *Association of Universities for Research in Astronomy*

⁵⁹ *National Science Foundation*

VLT: Very Large Telescope

El VLT se encuentra ubicado en el desierto de Atacama, en Cerro Paranal, a 2.635 metros de altura y cuenta con una docena de instrumentos que operan en longitudes de onda óptica e infrarroja. Tuvo un costo de inversión de 700 Millones de Euros, es el principal observatorio terrestre para la astronomía europea y es considerado el observatorio óptico más productivo y avanzado del mundo. Consta de cuatro telescopios unitarios, cada uno de ellos con un espejo primario de 8,2 metros de diámetro y cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros de diámetro.

Los telescopios unitarios y los auxiliares pueden funcionar independientemente o en forma conjunta para formar un interferómetro⁶⁰ gigante, el Very Large Telescope Interferometer (VLTi). Este permite ver detalles con 25 veces más precisión que la que se obtendría con telescopios individuales de mayor tamaño.

Telescopios menores

Además de los grandes telescopios mencionados anteriormente se encuentra en operación en Chile, una serie de telescopios ópticos de 1 a 4 m de diámetro, incluidos el telescopio Víctor Blanco (4,0 m) del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (CTIO), el telescopio Southern Astrophysical Research (SOAR) de 4,1 m, de Cerro Pachón, El New Technology Telescope (NTT) del observatorio La Silla (3,6 m) y una decena de telescopios de 1 a 2 m de diámetro. A estos telescopios, hay que sumar radiotelescopios, como el APEX (12 m), ASTE (10 m) y NANTEN-2 (4 m), todos ubicados entre los 4.800 y los 5.100 metros de altura, cerca de ALMA.

3.3 Observatorios en construcción

Los observatorios astronómicos más importantes que se encuentran actualmente en construcción son los siguientes:

E-ELT Extremely Large Telescope

El E-ELT que tendrá un costo de más de 1.000 millones de Euros; tendrá un espejo primario segmentado de 39 metros de diámetro y será el telescopio óptico e infrarrojo más grande del mundo. Este proyecto de ESO empezará sus operaciones a mediados de la próxima década en el Cerro Armazones, cercano al Cerro Paranal donde actualmente se encuentra el VLT. Su espejo primario consistirá en 798 espejos individuales de forma hexagonal.

GMT: Giant Magellan Telescope

El GMT, es un proyecto de telescopio de grandes dimensiones que tendrá un costo cercano a los 1.000 millones de dólares y está programado para ser terminado a mediados de la próxima década. Se compondrá de siete segmentos primarios de 8,4 metros de diámetro, tendrá el poder de resolución de un espejo primario de 24,5 metros de diámetro y la superficie de recolección de luz de un espejo de 22 metros. El telescopio se construirá en el observatorio las Campanas, donde ya se encuentran los telescopios Magallanes de la Institución Carnegie de Washington (CIW).

⁶⁰ La interferometría en una tecnología en la que se combinan las señales de dos o más telescopios individuales consiguiendo que éstos operen como una sola unidad, con un diámetro de espejo equivalente a la distancia entre los telescopios.

El proyecto cuenta con la participación de varias universidades de EE. UU, la Universidad de Sao Paulo en Brasil (USP), la Universidad Nacional de Australia (ANU) y el Instituto Coreano de Ciencias y el Espacio (KASI).

LSST: Large Synoptic Survey Telescope

El LSST, con un costo de 700 millones de dólares, será un telescopio de 8,4 metros, capaz de examinar la totalidad del cielo visible en pocos días de observación. El telescopio se construirá en Cerro Pachón y entrará en funcionamiento a mediados de la próxima década.

El LSST estará equipado con la cámara digital más grande jamás construida, de 3,2 giga pixeles y producirá del orden de 1 petabyte⁶¹ de datos al año, por lo que se espera que la parte más complicada del proyecto sea la administración y el manejo eficiente de esta gran cantidad de datos.

El telescopio es financiado por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) y el Departamento de Energía de EE. UU. y entre sus instituciones miembros figuran un gran número de universidades norteamericanas y algunas empresas privadas, como Google.

3.4 Posibles observatorios proyectados a futuro

Los siguientes observatorios están proyectados para ser construidos en Chile, pero aún no se ha asegurado su financiamiento:

CCAT: Cerro Chajnantor Atacama Telescope

El CCAT, con un costo estimado de 200 millones de dólares, es un radiotelescopio de 25 metros de diámetro propuesto para ser construido a 5.612 metros de altura, en el Cerro Chajnantor, adyacente a la planicie donde se encuentra ALMA. La diferencia de 600 metros de altura respecto a ALMA le permitirá acceder a longitudes de onda aún más cortas. El telescopio será equipado con cámaras que se espera que exploren el cielo 100 veces más rápido y con mejor resolución que los telescopios anteriores. El proyecto es liderado por la Universidad de Cornell de EE. UU.

TAO: Tokio Atacama Observatory

El TAO es un proyecto de la Universidad de Tokio valuado en 100 millones de dólares para construir un telescopio infrarrojo de 6,5 metros de diámetro en la cima del Cerro Chajnantor, a una altura de 5.640 metros para poder aprovechar al máximo observaciones en el infrarrojo medio.

La Universidad de Tokio ya opera allí, desde el año 2009, un prototipo de 1 m de diámetro, el mini TAO. El TAO será capaz de observar radiación en el rango de 25 a 40 micrones, una región del espectro que resulta inalcanzable desde otros observatorios terrestres.

⁶¹ Unidad de almacenamiento de información que equivale a 1015 bytes. Es equivalente a la cantidad de datos que caben en 1.000 unidades de disco duro de 1 TB.

RECURSOS HUMANOS PARA LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

4.

Además de la infraestructura indicada anteriormente, el trabajo de observación astronómica requiere disponer de científicos e ingenieros calificados, universidades en las que se formen los futuros astrónomos e ingenieros, centros en los que realicen sus investigaciones y grupos de desarrollo tecnológico.

4.1 Dotación de astrónomos

Históricamente Chile, a pesar de sus condiciones climáticas excepcionales, siempre tuvo pocos astrónomos. En el año 1984, existían en total 24 astrónomos trabajando como académicos en universidades chilenas, 20 de ellos en la Universidad de Chile y 4 en la Universidad Católica.

En el año 2000, esta cifra subió a 26, en seis universidades. Con la llegada de los grandes telescopios esta cantidad aumentó. Actualmente, según el censo realizado el año 2016 por la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS)⁶², existen en el país 221 astrónomos trabajando en instituciones nacionales.

4.2 Formación de futuros astrónomos

En el país existen diferentes universidades en las que se forman los futuros astrónomos. Según el censo realizado el año 2016 por la Sociedad Chilena de Astronomía (SOCHIAS), existen trece universidades con presencia de astrónomos y en nueve de ellas se forman estudiantes en pregrado y/o postgrado. En total, existen 221 astrónomos chilenos y extranjeros trabajando en instituciones nacionales y 675 alumnos en formación.

2016	UCH	PUC	UV	UDEC	UNAB	ULS	UDP	UCN	UA	UdeA	UCSC	UMCE	UTA	Total
1. Profesores	25	14	13	10	9	6	4	5	6	6	2	2	1	103
2. Investigador	4			2		5								11
3. Postdoctorado	20	48	15	9	6	1	6	1	1					107
4. Estudiantes de Doctorado	22	22	12	11	5									72
5. Estudiantes de Magister	9	21	7	17	1	6		13						74
6. Estudiantes de Licenciatura	31	113	90	141	51	30		73						529
Total	111	218	137	190	72	48	10	92	7	6	2	2	0	896
Total 1+2+3	49	62	28	21	15	12	10	6	7	6	2	2	1	221
Total 4+5+6	62	156	109	169	57	36	0	86	0	0	0	0	0	675

Tabla 1:
Universidades con presencia de Astrónomos en Chile

Fuente: Censo 2016 SOCHIAS.

⁶² Sochias. Censo 2016 de astrónomos en instituciones chilenas. <http://www.sochias.cl/info/miembros/censos-de-astronomos/119-informacion-general/miembros/289-censo-2016-de-astronomos-en-instituciones-chilenas>.

Las principales universidades en las que se forman los futuros astrónomos se indican a continuación.

Universidad de Chile (UCH)

En la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, se puede obtener la licenciatura en física o astronomía, para luego seguir con estudios de postgrado en astronomía, lo que permite trabajar en observatorios, centros de investigación, o universidades. Los egresados de la Licenciatura en Ciencias con Mención Astronomía están capacitados para continuar estudios de postgrado o profesionales avanzados relacionados con Astronomía y Ciencias afines, tanto en Chile como en el extranjero.

Universidad Católica de Chile (PUC)

La Licenciatura en Astronomía en esta Universidad es actualmente el único programa de licenciatura en astronomía en el que se ingresa directamente, una vez terminada la educación media. El objetivo de la Licenciatura en Astronomía es proporcionar una sólida base en matemáticas, física y astronomía, que permita a sus egresados seguir exitosamente estudios de postgrado en astrofísica, física o áreas relacionadas, o bien desempeñarse en aquellas áreas de tecnología avanzada que se beneficien de una importante formación científica, por ejemplo, en observatorios internacionales. Para alumnos cuyo interés básico es la Ingeniería o alguna otra carrera de base físico-matemática, pero que desean complementarla con una base en astronomía, está la posibilidad de seguir el Certificado Académico en Astronomía, una secuencia de cuatro cursos extractados del programa de la Licenciatura.

Universidad de Valparaíso (UV)

El Instituto de Física y Astronomía ofrece estudios de pregrado y programas de postgrado en física y astronomía. Su equipo de docentes y de investigación trabaja sobre un amplio rango de tópicos en física y astronomía mientras desarrolla un ambicioso programa de difusión de la ciencia astronómica, estimulados permanentemente por la estrecha relación del Instituto con el Centro de Astrofísica de Valparaíso, que imparte seminarios para los alumnos de postgrado y pregrado. El Instituto cuenta además con Investigadores que colaboran en las diferentes áreas de investigación en desarrollo.

Universidad de Concepción (UDEC)

La carrera de astronomía en esta Universidad entrega una formación en ciencias básicas de matemática y física, así como también en los temas fundamentales de la astronomía. También capacita para resolver problemas teóricos y prácticos, programar y usar software especializado, adquirir destrezas en la obtención y análisis de datos y darlos a conocer por medio de charlas y publicaciones. La carrera imparte cursos de astronomía todos los semestres. La carrera está adaptada a la demanda laboral en Chile, específicamente a nivel técnico y operativo en observatorios y centros de investigación. El egresado de la carrera de astronomía queda en condiciones de postular a programas afines de Magíster y Doctorado y proseguir estudios de postgrado en Astronomía.

Universidad Andrés Bello (UNAB)

Esta universidad cuenta con un primer grado académico para formar futuros doctores en cualquier parte del mundo. El Astrónomo de esta universidad es un profesional con formación en física, astronomía y matemáticas, así como también

en métodos computacionales. Centra su trabajo preferentemente en la investigación científica y en la docencia. También puede completar sus estudios para obtener el título profesional de Ingeniero Físico o Profesor en Educación Media en Física.

Universidad de La Serena (ULS)

La carrera de Licenciatura en Astronomía en su rol formador de futuros científicos es un área de amplias potencialidades en el contexto de la investigación científica y tecnológica del país. Su fin es ser base en la formación de capital humano avanzado en el área. El licenciado adquiere conocimientos en astronomía, física y matemáticas, en conjunto con las competencias necesarias para desarrollarse como futuro científico y acceder a estudios de postgrado.

Universidad Diego Portales (UDP)

Esta universidad cuenta con un Núcleo de Astronomía, como parte de la Facultad de Ingeniería, y desarrolla investigación en áreas que van desde los discos protoplanetarios y los planetas extrasolares, hasta las supernovas, núcleos galácticos activos y galaxias de alto corrimiento al rojo. El grupo tiene un fuerte foco en la astronomía observacional, desarrollando observaciones de rayos-X, ópticas, infrarrojas, y de radio. Sus programas de investigación utilizan tanto los telescopios de nivel mundial ubicados en el norte de Chile como observatorios espaciales.

Universidad Católica del Norte (UCN)

Cuenta con una Licenciatura y un Magister en Física con mención astronomía y además está desarrollando proyectos informáticos para observatorios de la zona, en conjunto con la carrera de Ingeniería en Informática.

Universidad de Antofagasta (UA)

Cuenta con un programa conducente al diploma en astroingeniería en su primera versión año 2016, como una actividad generada por la Unidad de Astronomía de la Facultad de Ciencias Básicas, apoyado administrativamente por el Centro de Educación Continua y con apoyo de la plataforma virtual de la Universidad. La creación de este diplomado se enmarca en el contexto de un fondo de innovación para la competitividad FIC-R 2014 “Educación de alto nivel y revisión de servicios para la industria astronómica” una iniciativa del Gobierno Regional de Antofagasta.

4.3 Productividad de astrónomos

La Astronomía es por lejos, la disciplina científica local que más trabajos publica. En un estudio realizado para el período 1991 a 2009 se estableció que, en el área de ciencias del espacio, Chile publicó 3.188 artículos, lo que representó el 9,4% de la producción científica del país. Durante el periodo 2000–2015, la producción total de documentos indexados en Web of Science con afiliación, Chile sumó 93.932 con un total de 105.843 citas. La astronomía, con un total de 8.144 representó casi el 12% de la productividad científica nacional⁶³.

⁶³ <http://www.conicyt.cl/blog/2016/04/areas-mas-desarrollada-por-investigaciones-chilenas-en-web-of-sciences/>

4.4 Centros de desarrollo tecnológico

En las principales universidades del país se han formado centros tecnológicos orientados a resolver algunos requerimientos de los centros de observación astronómica. En el Anexo III se indican los principales proyectos desarrollados por estos centros. Los centros más importantes son los siguientes:

*Centro de Excelencia en Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA)*⁶⁴

CATA es la mayor entidad nacional dedicada a la investigación y desarrollo de tecnologías vinculadas a la astronomía en Chile. Este centro reúne a más de 35 investigadores asociados y más de 50 investigadores postdoctorales y desarrolla seis líneas de investigación científica: nacimiento y evolución de las estructuras en el Universo local, poblaciones estelares en el Universo local, escala de distancia extra galáctica, formación de estrellas, planetas extrasolares y enanas café y Supernovas y Energía Oscura. Además de las líneas de investigación indicadas, CATA posee las siguientes líneas de desarrollo tecnológico: Instrumentación Astronómica, Computación de Alto Rendimiento y Robótica en Astrofísica.

*Centro de Astro-Ingeniería UC (AIUC)*⁶⁵

El Centro de Astro-Ingeniería de la Universidad Católica (AIUC) fue creado en el año 2009 y tiene por objetivo la investigación y generación de nuevas oportunidades tecnológicas y computacionales en el ámbito de la astronomía e ingeniería. Este centro está integrado por académicos e investigadores del Instituto de Astrofísica, de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica y por un grupo de profesionales en el ámbito de la gestión tecnológica. El AIUC se especializa en las siguientes áreas de trabajo:

- *Instrumentación Astronómica*
Esta área busca incentivar el desarrollo tecnológico a través del desarrollo de proyectos de alto nivel tecnológico. AIUC investiga y desarrolla tecnologías en detectores, opto-mecánica, electrónica, control y software, caracterización y calibración de telescopios. Algunos de los proyectos en desarrollo son: FIDEOS (Fibre Dual Echelle Optical Spectrograph), TARdYS (TAO-AIUC high Resolution Y band Spectrograph) que son capaces de detectar cambios en el color de la luz de las estrellas que son orbitadas por planetas.
- *Computación de Alto Rendimiento*
Esta área busca realizar, cálculos astrofísicos mediante un supercomputador en el que se realizan simulaciones cosmológicas y se procesan los datos provenientes de diferentes centros astronómicos. Los resultados de los análisis tienen aplicaciones, entre otras, en el estudio de la formación de galaxias, cúmulos y estrellas.
- *Área de servicios*
Esta área entrega servicios a los observatorios astronómicos para la instalación de instrumentos astronómicos, asistencia técnica en terreno y en laboratorio para telescopios, instalación y configuración de sistemas de computación de alto rendimiento, además de realizar simulaciones, almacenamiento y análisis de grandes bases de datos.

⁶⁴ <http://www.cata.cl/>

⁶⁵ <http://www.aiuc.puc.cl/>

Laboratorio de ondas milimétricas U. de Chile⁶⁶

Este laboratorio diseña, construye y prueba instrumentación para su uso en radioastronomía, con un enfoque en actividades académicas y de investigación tecnológica.

El grupo de trabajo está constituido por un grupo de astrónomos, ingenieros y técnicos con experiencia en técnicas milimétricas, submilimétricas, y en procesamiento digital de señales astronómicas. Este grupo desarrolla proyectos relacionados con receptores de onda milimétrica en colaboración con variados grupos en el extranjero. Junto con los Laboratorios de Fotónica y de Exploración Planetaria y Espacial integra el Grupo de Instrumentación Astronómica.

El laboratorio está actualmente desarrollando un receptor prototipo para la banda 1 de ALMA, el arreglo radioastronómico más grande construido hasta el momento, un receptor prototipo para la banda 2+3 de ALMA, un receptor prototipo para el nuevo radio telescopio Large Latin American Millimeter Array (LLAMA)⁶⁷ y está construyendo un nuevo receptor para el Southern Millimeter-Wave Telescope (SMWT)⁶⁸.

Centro de óptica fotónica U de C (CEFOP-UdeC)⁶⁹

El Centro de Óptica y Fotónica de la Universidad de Concepción, fue creado en el año 2009 y es un centro de investigación científica y tecnológica que desarrolla investigación fundamental y aplicada en las líneas de: Información Cuántica; Óptica Atmosférica; Espectroscopia Foto acústica, y Atrapamiento Óptico y Microscopía. Además, el Centro desarrolla actividades complementarias a las líneas de investigación y desarrollo indicadas anteriormente, tales como telemetría y control, telecomunicaciones y cámaras inteligentes, entre otras.

El principal objetivo del centro es el desarrollo de líneas de investigación en los campos de la Óptica y la Fotónica con la colaboración con el sector industrial para la implementación de programas de desarrollo y transferencia tecnológica de alto impacto social y económico.

Computer Systems Research Group (CSRG), Universidad Técnica Federico Santa María

El Computer Systems Research Group (CSRG) es un grupo de investigación que agrupa a diversos proyectos del área de sistemas computacionales, produciendo desarrollos de altos estándares de calidad y de utilidad para la comunidad. El objetivo del CSRG es aprender acerca de sistemas computacionales reales, complejos y distribuidos, trabajando lado a lado con proyectos de clase mundial, obteniendo conocimiento invaluable acerca de tecnologías de software. Fue iniciado en colaboración con ESO. El CSRG se ha integrado al desarrollo de tecnologías más complejas, como tópicos en Inteligencia Artificial.

⁶⁶ <http://ingenieria.uchile.cl/investigacion/presentacion/laboratorios/departamento-de-astronomia/86810/laboratorio-de-ondas-milimetricas-y-submilimetricas>

⁶⁷ *Emprendimiento conjunto de Argentina y Brasil a ser instalado en el noroeste de Argentina y que tiene por objetivo instalar y operar un instrumento capaz de realizar observaciones astronómicas en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.*

⁶⁸ *Telescopio construido en la década de 1980, trasladado al Cerro Calán de la U. de Chile y modernizado.*

⁶⁹ <http://www.cefop.cl/>

Laboratorio de Astro Informática del Centro de Modelamiento Matemático U. de Chile⁷⁰

El objetivo del Laboratorio de Astro Informática del Centro de Modelamiento Matemático es desarrollar herramientas y capacidades humanas que apoyen el desarrollo actual de la astronomía. La astronomía se está transformando en una ciencia que deberá manejar cada vez mayores volúmenes de datos. El estudio y comprensión de estos datos requiere el desarrollo de nuevas herramientas para modelación matemática, estadísticas, procesamiento de imágenes, visualización de datos, procesamiento y almacenamiento de datos, entre otros. El Laboratorio de Astro Informática está trabajando, en colaboración con astrónomos del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS) y de un grupo de universidades extranjeras, en la detección y clasificación automática de objetos astronómicos, análisis y clasificación de eventos transientes, reconstrucción de imágenes interferométricas y manejo y modelación de datos astronómicos.

Grupo de Astro Meteorología, Universidad de Valparaíso

El Grupo de Astro Meteorología de la Universidad de Valparaíso se dedica al estudio y selección de lugares óptimos para la instalación de observatorios astronómicos, realizando investigaciones climáticas y meteorológicas de cada sitio. Además, aborda la optimización de las operaciones de los observatorios astronómicos, realizando pronósticos detallados de las condiciones climáticas y meteorológicas de las futuras noches de operación para los observatorio ópticos e infrarrojos y para los radiotelescopios.

Unidad de Astronomía, Universidad de Antofagasta

La Unidad de Astronomía de la Universidad de Antofagasta se dedica a generar conocimiento original, expandiendo las fronteras del conocimiento en astronomía y de dar respuesta a la necesidad de contar con expertos regionales capaces de combinar su dedicación a la ciencia pura con un interés y entusiasmo genuinos por el desarrollo de la región. Además de las líneas de investigación en astronomía, la unidad de astronomía posee una línea de investigación en tecnologías para el desarrollo de la investigación astronómica de sistemas automáticos de reducción de datos y desarrollo de sistemas de control automático.

Laboratorio de fotónica, Universidad de Chile

El laboratorio de fotónica de la Universidad de Chile se dedica a realizar investigación de instrumentación fotónica para la instrumentación astronómica en el rango de sub-milimétrico e infrarrojo y a desarrollar y fabricar dispositivos optoelectrónicos para proyectos astronómicos. El laboratorio es parte del Grupo de Instrumentación Radio Astronómica de la Universidad de Chile.

⁷⁰ <http://astroinf.cmm.uchile.cl/>

4.5 Proyectos desarrollados por centros de desarrollo tecnológico

En el Anexo III se muestran diferentes proyectos que han desarrollado por los diferentes grupos de investigación. Estos abordan diferentes campos tecnológicos, son requeridos en diferentes etapas del ciclo de vida de los observatorios y están enfocados principalmente a la operación de observatorios.

4.6 Formación y número de ingenieros

En Chile, tradicionalmente se han formado ingenieros con las competencias necesarias para atender los requerimientos del mercado. La ingeniería civil es una profesión de alto prestigio y los ingenieros chilenos han sido reconocidos por sus capacidades, las que se deben principalmente, al alto nivel intelectual de los alumnos que ingresan y a la sólida formación en ciencias básicas y ciencias de la ingeniería, que les han entregado a sus alumnos, las universidades en las que se han formado.

Los observatorios requieren ingenieros de diferentes especialidades que mantengan los telescopios e instrumentos. Las principales áreas tecnológicas en las que los éstos demandan ingenieros son: informática, mecánica, eléctrica, electrónica y matemática. Estas áreas representan cerca del 30% del total. La carrera de Ingeniería Civil Industrial representa más del 40% del total de ingenieros civiles titulados, cifra que continua en aumento⁷¹.

⁷¹ Instituto de Ingenieros de Chile. *Capital Humano para la competitividad. El caso de la Ingeniería Civil. 2013*

5.

ACUERDOS DE COLABORACIÓN

El desarrollo que ha tenido la astronomía en el país se debe, además de las condiciones climáticas excepcionales del norte de Chile, a los acuerdos de colaboración suscritos entre el Estado de Chile y Consorcios integrados por Organizaciones Internacionales, Universidades y Centros de Investigación.

El convenio más antiguo del que se tiene conocimiento es el que se consigna en la ley 15.172 del año 1963⁷². En ella se liberó del pago de impuestos y contribuciones a AURA. Esta ley fue modificada posteriormente en los años 1969 y 1970, manteniendo en ambos casos las exenciones tributarias. En paralelo a esta ley, en el año 1964 se promulgó el decreto 18 del Ministerio de Relaciones Exteriores, entre el Gobierno de Chile y ESO⁷³. A medida que fueron llegando al país los centros astronómicos, se fueron estableciendo acuerdos de cooperación, basados en los convenios anteriores.

El Estado ha velado además por la mantención de las condiciones óptimas para la observación astronómica, creando la Oficina para la protección de la calidad de los cielos del norte de Chile (OPCC)⁷⁴, a través de un convenio suscrito entre la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), AURA, el Observatorio Las Campanas (LCO) y ESO.

Las diferentes leyes, decretos y convenios suscritos muestran una clara tendencia por parte del Estado de Chile de fomentar de manera sistemática la instalación de Centros Astronómicos extranjeros en territorio nacional, homologando, dentro de lo posible, los beneficios y deberes entre las diferentes instituciones, lo que representa un muy buen ejemplo de políticas sostenidas en el tiempo, independientes de los distintos Gobiernos, que han permitido que Chile se destaque en el concierto astronómico internacional.

5.1 Aportes del Estado de Chile

En los diferentes acuerdos se observan, en relación con los terrenos, dos modalidades: la compra del sitio por parte de las organizaciones o consorcios internacionales, como ocurrió con los primeros observatorios astronómicos que se instalaron en el país, o la donación por parte del gobierno de terrenos, como fue el caso de los últimos proyectos: ALMA, E-ELT y VLT.

En ambos casos, el Gobierno de Chile, además de vender o aportar el terreno, entrega para estos sitios y para sus áreas cercanas un conjunto de condiciones que aseguran su adecuada operación tales como la prohibición de instalar faenas mineras en las cercanías o el control de la contaminación lumínica, situación que últimamente se ha deteriorado con el crecimiento de las ciudades y el aumento en la iluminación de estas con tecnología LED⁷⁵.

Es común que exista en los acuerdos suscritos una amplia exención tributaria durante todo el ciclo de vida de un proyecto. También en ocasiones el país ha realizado aportes monetarios, como el efectuado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), mediante la ley 19.517 de 1997, por MUS\$ 8,8 para el desarrollo del Observatorio Gemini.

⁷² <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=28069&r=1>

⁷³ <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=98863>

⁷⁴ Oficina que tiene como misión apoyar a la norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica asesorando en lo referente a la instalación de sistemas de iluminación de exteriores compatibles con la mantención y mejoramiento de las condiciones de oscuridad de los cielos del norte de Chile.

⁷⁵ <http://www.24horas.cl/tendencias/ciencia-tecnologia/contaminacion-luminica-amenaza-a-observatorios-en-el-norte-del-pais-2643328#>

5.2 Beneficios recibidos

El principal beneficio que recibe el Estado de Chile es la entrega de tiempo de observación dedicada para los astrónomos chilenos, entendiéndose por astrónomos chilenos a cualquier astrónomo que trabaja en una universidad chilena de forma permanente ya sea como investigador, académico o como estudiante en formación. Este tiempo de observación tiene dos modalidades: tiempo dedicado exclusivamente para astrónomos chilenos o tiempo dedicado para astrónomos chilenos, en asociación con astrónomos miembros de las organizaciones dueñas de los observatorios.

Otros beneficios menores, que no han sido adecuadamente cuantificados, han sido capacitación y ofrecimiento de oportunidades de trabajo para profesionales altamente calificados en áreas técnicas, flujo de ingresos hacia el país, gastados por los funcionarios de estas instituciones, contratación de personal local y gastos operacionales realizados en el país por los diferentes observatorios astronómicos. Como referencia, en Hawaii, la astronomía es considerada una industria emergente, que genera una importante actividad económica a través del gasto que realizan los funcionarios de los centros de observación en el comercio local, contratación de personal local, gastos realizados en el país por los visitantes y servicios contratados. En un estudio realizado por la organización de investigación económica de la universidad de Hawaii (UHERO)⁷⁶, se estimó que en el año 2012 el gasto total relacionado con la astronomía en Hawaii fue de MUS\$ 88 generando un impacto en la economía local de MUS\$ 167,8. Esta actividad generó además MUS\$ 52,2 en utilidades, MUS\$ 8,1 en impuestos y 1.394 empleos.

5.3 Evolución de los acuerdos

Los nuevos acuerdos suscritos se han basado principalmente en los acuerdos establecidos anteriormente. La cesión de tiempo de observación apareció por primera vez en el decreto 1766 promulgado en 1966⁷⁷, que complementa el acuerdo de 1964 con ESO. En este decreto se establece un 10% de tiempo de observación para astrónomos chilenos con un mínimo de 50% de este tiempo en modo de cooperación. A partir de esta fecha, se ha mantenido este criterio en un acuerdo entre AURA y la Universidad de Chile y en los acuerdos posteriores para la instalación y operación de los más recientes telescopios instalados en el territorio nacional.

La evolución de las capacidades de observación y las características específicas de algunos de estos centros astronómicos han hecho necesario modificar el criterio de tiempo exclusivo. A modo de ejemplo, el proyecto LSST que tiene por objetivo examinar la totalidad del cielo visible tomando fotos, no tiene un modo de observación que permita una asignación de tiempo. En este caso, los astrónomos chilenos tienen acceso inmediatamente al 100% de los datos generados. En el proyecto E-ELT, el tiempo de observación para astrónomos chilenos se mantiene en un 10% de observación y al menos 7,5% de este tiempo será asignado a las propuestas de astrónomos chilenos en cooperación con los astrónomos de los países miembros de ESO, lo que ayudará a fomentar la colaboración internacional.

⁷⁶ University of Hawaii Economic Research Organization (UHERO). *The Economic Impact of Astronomy in Hawaii, 2014*.

⁷⁷ <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=71419>

5.4 Oportunidades para la ingeniería

En los acuerdos suscritos se ha privilegiado el tiempo de observación de astrónomos chilenos y en menor grado la formación de capital humano avanzado. Esto se indica en el decreto 1766 de 1996, que establece el compromiso por parte de ESO de formar ingenieros y técnicos para el desarrollo de la astronomía y de las especialidades científicas y tecnológicas conexas y en el Decreto 141, promulgado en 2012⁷⁸ suscrito entre el Gobierno de Chile y ESO para la construcción del E-ELT, en el que se establecieron los intereses de desarrollo científico y tecnológico conjunto y la formación de capital humano avanzado.

En este último decreto se abre la posibilidad desarrollar parte de la ingeniería en forma local, al incluir la posibilidad de que empresas chilenas puedan participar en las licitaciones de los bienes y servicios que requiera este telescopio.

El análisis de los Convenios muestra que se hace necesario revisarlos desde la perspectiva de una mayor demanda del país para formar parte de los desarrollos astronómicos, de manera que permitan la formación de capacidades en el ámbito tecnológico y de ingeniería en el campo de la astronomía.

⁷⁸ <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1039349>

CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

6.

Los proyectos de observatorios astronómicos tienen características únicas que los distinguen de los proyectos de inversión desarrollados en otros sectores de la economía. La principal diferencia con ellos es que al surgir éstos de la necesidad de responder una pregunta científica, a la que la tecnología existente no es capaz aún de dar respuesta, son proyectos complejos que requieren, desarrollar espejos o antenas con características únicas y diseñar y fabricar instrumentos científicos, equipos, dispositivos y componentes de alta precisión, a la medida para cada proyecto.

6.1 Ciclo de vida de un proyecto

En el ciclo de vida de estos proyectos, se pueden distinguir dos etapas, la de proyecto, que comprende las fases de diseño, fabricación e integración y la de operación y actualización de las instalaciones.

La etapa de proyecto, por los motivos indicados anteriormente, tiene plazos de ejecución más largos que la de proyectos de montos similares, desarrollados en otros sectores de la economía. A modo de ejemplo, el proyecto E-ELT, con una inversión de 1.000 millones de Euros, tiene un plazo programado de ejecución de doce años, plazo mucho mayor que el de un proyecto de inversión similar en áreas en las que la tecnología está consolidada, como es el caso de proyectos en minería, energía o infraestructura.

La duración de la etapa de operación dependerá de la vida útil de los equipos y de la factibilidad de actualizar los telescopios e instrumentos. El ciclo de vida de un proyecto típico de construcción y operación de un observatorio astronómico se representa en la siguiente figura.

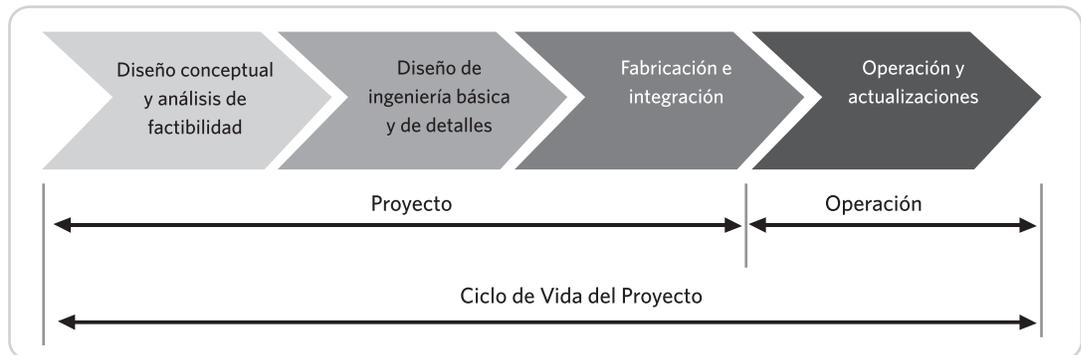


Figura 2: Ciclo de vida del proyecto

Fuente: Elaboración propia en base a Informe Adere Consultores⁷⁹.

6.2 Etapa de proyecto

En la etapa de proyecto, se pueden distinguir las siguientes fases:

⁷⁹ Adere Consultores. Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile, 2012.

► *Diseño conceptual y análisis de factibilidad*

El ciclo de vida del proyecto se inicia con la búsqueda de una respuesta a una serie de preguntas científicas o science case que los reflectores (espejos o antenas) e instrumentos existentes no pueden resolver, por lo que es necesario diseñar y construir nuevas instalaciones. A modo de ejemplo, algunas de las preguntas que el Large Synoptic Survey Telescope (LSST)⁸⁰, en etapa de construcción en Cerro Pachón busca resolver, son las siguientes: ¿Cuál es la naturaleza de la energía oscura que impulsa la aceleración de la expansión del universo?, ¿Qué es la materia oscura, cómo se distribuye, y cómo afectan sus propiedades la formación de estrellas, galaxias y estructuras más grandes?, ¿Cómo se formó la vía Láctea, y cómo se ha modificado su configuración con las fusiones con cuerpos más pequeños a lo largo del tiempo?, ¿Cuál es la naturaleza de las regiones externas del sistema solar? ¿es posible hacer un inventario completo de cuerpos más pequeños en el sistema solar, especialmente los asteroides potencialmente peligrosos que algún día podrían impactar a la tierra? ¿Hay nuevos fenómenos exóticos y explosivos en el universo que aún no han sido descubiertos?

A partir del science case se desarrolla la ingeniería conceptual y el estudio de factibilidad. La ingeniería conceptual considera la definición de los reflectores e instrumentos que se necesitarán, las frecuencias del espectro electromagnético en las que se realizarán las observaciones y el área total y geometría que deberán tener los reflectores, los que determinan la envergadura del proyecto astronómico. Definidos los reflectores y la región del espectro electromagnético a observar, se especifican las características que deberán tener los instrumentos y se evalúan alternativas de materiales de construcción, obteniéndose una primera aproximación al costo de inversión. En paralelo a lo anterior, se evalúan diferentes sitios para emplazar el observatorio, considerando entre otros aspectos: condiciones meteorológicas, existencia de perturbaciones atmosféricas, condiciones geológicas y geotécnicas, infraestructura disponible y conectividad.

Al término de esta fase, se obtiene un estudio de factibilidad técnico y económico que sirve de base para la búsqueda de financiamiento. Este incluye la identificación del sitio en el que se emplazará el observatorio, la Ingeniería conceptual y la validación de los sistemas principales.

► *Diseño de ingeniería básica y de detalles*

Esta fase considera realizar el diseño de los sistemas principales: reflectores e instrumentos, equipos, montura y domo y desarrollar la ingeniería básica y de detalles de:

- Sistemas de transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos e imágenes.
- Sistema de control y monitoreo climático de equipos,
- Sistema eléctrico y de telecomunicaciones,
- Fundaciones, estructura y mecanismos del domo,
- Obras civiles y de infraestructura: caminos, edificios, tendido eléctrico, red de telecomunicaciones.

Los resultados de esta fase son planos y documentos en las diferentes disciplinas involucradas: arquitectura, ingeniería civil, estructuras, mecánica, electricidad e instrumentación; tales como: diagramas de flujo y de proceso, especificaciones técnicas de equipos y componentes, planos, listas de equipos, componentes y materiales, además de toda la documentación requerida para gestionar y controlar el proyecto.

⁸⁰ <https://www.lsst.org/science>

Lo usual en esta fase es dividir el proyecto en las siguientes áreas: reflectores e instrumentos, montura, domo e infraestructura. El alcance de un proyecto, en cada una de estas áreas es el siguiente:

- *Reflectores e Instrumentos*

En esta fase se especifican en detalle y se diseñan los reflectores, que pueden ser ópticos, infrarrojos o receptores de radiofrecuencia. Dependiendo de los requerimientos, el diseño de éstos puede ser realizado a la medida para el proyecto o ser de fabricación estándar.

Los instrumentos científicos pueden ser diseñados especialmente para el proyecto, en cuyo caso se requerirá un equipo de científicos de alto nivel que los desarrollen, en base a nuevas tecnologías o ser de fabricación estándar. En esta etapa puede ser necesaria la fabricación de prototipos tanto para la prueba de concepto como para pruebas de integración entre los diferentes sistemas.

- *Montura y domo*

La montura corresponde a la estructura en la que se instalan el reflector y los instrumentos científicos. Es un elemento crítico que incluye las estructuras de soporte, los mecanismos de movimiento, motores y el sistema de control de movimiento para que los instrumentos apunten con precisión a la región del cielo que se desea observar. El Domo es la estructura que se diseña para proteger los instrumentos científicos del ambiente. Este necesita movilidad para apuntar el telescopio o radiotelescopio en la dirección deseada. Su diseño comprende el análisis de las estructuras y fundaciones y el de los mecanismos de movimiento.

- *Infraestructura*

Comprende del diseño de ingeniería básica y de detalle de toda la infraestructura requerida para el sitio en el que se instalará el observatorio, tales como caminos, edificios, energía eléctrica, agua y comunicaciones, entre otras.

► *Fabricación e integración*

En esta fase se fabrican e integran los diferentes componentes y sistemas del observatorio astronómico, se despachan al lugar donde el proyecto será emplazado, se montan en terreno y se realiza su calibración y puesta en marcha. Además, se supervisan los diferentes aspectos del proyecto, se desarrolla la documentación necesaria para realizar su montaje y puesta en operación y se integran los diferentes sistemas para transmitir, procesar y almacenar datos junto con preparar la infraestructura y los servicios que requerirá la operación.

Esta fase considera fabricar, implementar o construir:

- Sistemas principales: reflectores e instrumentos, equipos, montura y domo
- Sistemas de transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos e imágenes.
- Sistema de control y monitoreo climático de equipos,
- Sistema eléctrico y de telecomunicaciones,
- Fundaciones, estructura y mecanismos del domo
- Obras civiles y de infraestructura: caminos, edificios, tendido eléctrico, red de telecomunicaciones.

Como resultado de esta fase, se obtienen las obras requeridas para instalar los sistemas principales y los sistemas auxiliares requeridos para la operación del observatorio.

Lo usual en esta fase es dividir el proyecto en las siguientes áreas: reflectores e instrumentos, montura, domo, sistema de control e infraestructura. El alcance de un proyecto, en cada una de estas áreas es el siguiente:

- *Fabricación e integración de reflector, instrumentos, montura y domo*
Los diferentes componentes del observatorio se fabrican según las especificaciones y planos desarrollados en la fase de diseño. Es común que estos componentes sean fabricados en diferentes lugares e incluso, en diferentes países. Una vez fabricados estos, son ensamblados, calibrados e integrados al espejo o la antena para finalmente configurar los sistemas de control de posición del telescopio o antena y los elementos de monitoreo de variables críticas como temperatura y vibraciones. En el lugar de emplazamiento se construyen las fundaciones y la parte fija del domo. Sobre ésta, se arma la parte móvil y se integran los sistemas mecánicos de movimiento y el sistema de control.
- *Sistema de control*
El desarrollo de un observatorio astronómico requiere de una o más salas de control, eventualmente en distintos lugares del mundo, dependiendo del modo de observación que tenga el observatorio. Es necesario además configurar e instalar el software y hardware de los distintos sistemas que deben ser controlados para tener una observación astronómica adecuada. Estos incluyen, entre otros, los sistemas de óptica activa y adaptativa, mecanismos de movimiento del telescopio, sistema de control de exposición y monitoreo de variables críticas.
- *Infraestructura y servicios*
Consiste en la construcción de las instalaciones necesarias para el mantenimiento, operación y alojamiento. Algunas de estas construcciones se realizan en el sitio mismo mientras que otras se realizan en centros urbanos. Los servicios requeridos son: cableado eléctrico, sistemas eléctricos de respaldo, tendido de fibra óptica, equipos para comunicaciones de voz, video, internet, así como las instalaciones y conexiones a redes de agua y de electricidad. Los proyectos que están siendo construidos actualmente generarán una cantidad cada vez mayor de datos, que deben ser recibidos, almacenados y decodificados. La generación de datos es de tal volumen que es necesario considerar en los proyectos además nuevas necesidades para el almacenamiento y transmisión de datos a grandes velocidades.

6.3 Etapa de operación y actualización de instalaciones

En esta etapa, el observatorio astronómico está en condiciones de ser utilizado por los astrónomos. Las principales actividades que se realizan en esta fase son las siguientes:

Control de observación

Consiste en la realización de la tarea de observación por parte del astrónomo, esta incluye el control del reflector, de los instrumentos científicos y del posicionamiento del domo para realizar ésta.

Gestión de datos e imágenes

Corresponde a la adquisición, procesamiento, transmisión y almacenamiento de los datos e imágenes captados.

Mantenimiento y reparación de instalaciones

Incluye el mantenimiento y reparación de estructuras, partes mecánicas y electromecánicas, sistema criogénico, bombas de vacío, equipos eléctricos, suministro eléctrico, dispositivos y equipos electrónicos, componentes ópticos, espejos y actuadores para espejos, antenas, compresores de agua, aire y helio, entre otros.

Actualización de instalaciones

Considera la actualización tecnológica del observatorio durante toda su vida útil. Esto incluye calibración de equipos, instrumentos y sistemas, medición de superficie de antenas, realización de pruebas de laboratorio de receptores, diseño y construcción de nuevos instrumentos para resolver otras preguntas científicas, actualización de sistemas de transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos e imágenes, actualización de hardware y software, modificaciones de sistemas de control, sistema eléctrico y de telecomunicaciones, reemplazo de equipos y componentes obsoletos, entre otros.

Servicios e insumos básicos

Considera el suministro de los servicios e insumos básicos que requiere un observatorio astronómico, tales como: energía eléctrica, agua, servicios de limpieza y mantención no especializada.

Servicios logísticos

Se refiere a los servicios de transporte, alojamiento y alimentación para el personal que trabaja en las instalaciones.

6.4 Financiamiento de proyectos astronómicos

Los proyectos de observatorios astronómicos son financiados principalmente por fondos públicos destinados al fomento de la investigación científica en países desarrollados. Uno de los requisitos que ponen estos países es que una parte importante del presupuesto del proyecto sea gastado en bienes y servicios en estos mismos países.

El modelo habitual de trabajo en los proyectos astronómicos es la cooperación entre diferentes organizaciones de investigación de distintos países. En el Anexo IV se presenta, a modo de ejemplo, una muestra de las organizaciones que han participado o participan en tres proyectos astronómicos, dos desarrollados y uno en construcción en Chile: Gemini South, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y Giant Magellan Telescope (GMT).

Es común que, en la fase de diseño conceptual y análisis de factibilidad de un proyecto astronómico, el equipo directivo del consorcio astronómico defina los requerimientos de bienes y servicios que necesitará el proyecto, para dar respuesta al science case y los países que proveerán éstos, bajo el principio de *pay to play*⁸¹. Es por ello que las empresas proveedoras de bienes y servicios y los grupos de investigación que realizan los desarrollos tecnológicos de éstos provienen, en la mayoría de los casos, de países que financian los proyectos astronómicos.

El proyecto ALMA, a modo de ejemplo, fue financiado por el Observatorio Europeo Austral⁸² (ESO), la Fundación Nacional de Ciencia de EE. UU.⁸³ (NSF), los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales de Japón⁸⁴ (NINS), el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá⁸⁵ (NRC), la Academia Sinica de Taiwán⁸⁶ (AS) y el Instituto Coreano de Ciencia Espacial y Astronomía⁸⁷ (KASI).

ESO financió 37,5 % del presupuesto total del proyecto, las entidades de América del Norte: NSF y NRC, financiaron 37,5 % del proyecto y los países de Asia del Este: Japón, Taiwán y Corea del Norte, financiaron el 25 % restante. Como contrapartida, estos países participaron como proveedores del proyecto aportando los bienes y servicios que se indican en el Anexo V.

⁸¹ Este principio se refiere a una situación en la que el dinero se intercambia por servicios o por el derecho a participar en ciertas actividades.

⁸² European Southern Observatory

⁸³ National Science Foundation

⁸⁴ National Institutes of Natural Sciences (Japan)

⁸⁵ National Research Council (Canada)

⁸⁶ Academia Sinica in Taiwan

⁸⁷ Korea Astronomy and Space Science Institute

6.5 Costos de inversión

El costo de inversión de un observatorio astronómico varía según el science case elegido. La mayor parte de esta inversión corresponde a elementos de alta tecnología, como espejos, antenas o instrumentos científicos que son fabricados especialmente para el proyecto y cuyo desarrollo es realizado por alguna de las entidades académicas asociadas al proyecto o por proveedores altamente especializados que pertenecen a alguno de los países que financian el diseño, construcción y operación del observatorio. Esta inversión, por lo tanto, no significa el ingreso de capitales al país, sino que el ingreso de equipamiento de alta tecnología que llega fabricado.

Se estima que el gasto que se realiza en el país, en los proyectos de observatorios astronómicos, está comprendido entre el 10% y el 20% de la inversión. Este se concentra en bienes y servicios no transables⁸⁸ como construcción de caminos, obras civiles, montaje de estructuras, cableado eléctrico y de datos y otros ítems no diferenciados como alojamiento, alimentación y transporte.

Diseño

El costo del diseño varía, entre 5% y 10% de la inversión, dependiendo de cada proyecto. En general, éste es realizado por consorcios de universidades y empresas de los países que financian la construcción del centro astronómico bajo la dirección de personal de los observatorios.

Componentes centrales

El costo de los componentes centrales del telescopio que incluye espejos o antenas, instrumentos científicos, montura de espejos o antenas y domos, dispositivos de control de posición, electrónica para adquisición y transmisión de datos, varía entre 70% y 80% de la inversión.

Los componentes centrales son suministrados por proveedores que pertenecen a los países que aportan los recursos para el diseño, construcción y operación de los observatorios. Por ello, los montos indicados anteriormente son ejecutados, en su mayor parte, en los países miembros de los consorcios.

Preparación del sitio

El costo de habilitación del sitio en el que será instalado el telescopio, que incluye principalmente bienes y servicios no transables como: construcción de caminos, obras civiles, montaje de estructuras, cableado eléctrico y de datos e instalaciones necesarias para mantener el equipamiento, varía entre 5% y 15% de la inversión.

Si se suma el costo del montaje en terreno de los sistemas y la calibración de los instrumentos, esta cifra puede llegar a 20% de la inversión. Este valor representa el monto máximo que, en la situación actual, podría ser facturado en Chile.

⁸⁸ Corresponden a aquellos bienes que solo pueden consumirse en la economía en que se producen; no pueden importarse ni exportarse, tales como estudios de mecánica de suelos, obras civiles, montaje de estructuras.

6.6 Costos de operación

Los observatorios astronómicos tienen costos asociados a la operación de sus instalaciones que varían entre un 2,5% y un 10% del valor de la inversión⁸⁹. Esta cifra incluye los gastos que realiza el observatorio en los recursos humanos que necesita para mantener y reparar los equipos y en servicios no diferenciados, tales como jardinería, mantención de edificios, alimentación, transporte, Internet, telefonía de voz. Se estima que un 70% de este gasto se realiza en el país. En la siguiente tabla se muestran los servicios relacionados con ingeniería que usualmente contratan los observatorios astronómicos y el costo anual que ellos representan.

Trabajo	Persona que lo realiza	Monto del gasto
Soporte de ingeniería para el telescopio y los instrumentos.	Staff interno o especialistas contratados por periodos de tiempos limitados.	Entre US\$ 500.000 a US\$ 1.000.000 para un observatorio grande y entre US\$ 100.000 y US\$ 500.000 para uno pequeño.
Mantenimiento de partes mecánicas y estructuras.	Profesionales de la planta interna de los observatorios.	
Mantenimiento criogénico.	Empresas extranjeras.	Entre US\$ 50.000 y US\$ 200.000 por año.
Operación de maquinaria CNC para fabricación de piezas especiales.	Profesionales de planta interna o empresas locales para trabajos de menor nivel.	Entre US\$ 50.000 y US\$ 100.000 por año.
Mantenimiento eléctrico.	Profesionales de planta interna de los observatorios o contratistas externos.	Entre US\$ 50.000 y US\$ 100.000 por año.
Diagnóstico y reparación de dispositivos electrónicos.	Profesionales de planta interna de los observatorios o fabricantes externos.	Entre US\$ 50.000 y US\$ 100.000 por año.
Mantenimiento y reparación de componentes ópticos.	Fabricantes externos.	Entre US\$ 5.000 y US\$ 20.000 por año.
Mantenimiento de espejos.	Profesionales de planta interna de los observatorios.	Entre US\$ 100.000 y US\$ 200.000 por año.
Mantenimiento de actuadores.	Personal interno.	Entre US\$ 10.000 y US\$ 50.000 por año.
Mantenimiento del suministro eléctrico.	Personal interno o contratistas locales.	Entre US\$ 20.000 y US\$ 50.000 por año.
Helio, nitrógeno y aire comprimido.	Subcontratistas.	US\$ 50.000 por año.
Transmisión de datos.	Grandes empresas de telecomunicaciones.	
Servicios de meteorología.	Proveedores de meteorología extranjeros.	Entre US\$ 10.000 y US\$ 20.000 por año.

Tabla 2: Costos de operación de Observatorios Astronómicos.

Fuente: Adere Consultores.

⁸⁹ Como referencia, según antecedentes informales, el E-ELT tendrá un costo de operación de 25 millones de euros anuales, lo que equivale al 2,5% de la inversión (1.000 millones de euros)

6.7 Inversión realizada y proyectada

Los observatorios astronómicos que se encuentran en operación han significado inversiones por 2.640 millones de dólares. En la siguiente tabla se muestra la inversión realizada en los principales Centros Astronómicos.

En Operación	Costo (MUS\$)
ALMA	1.300
VTL	860 (*)
Gemini South	300
Magellan	100
Otros	80
Total	2.640

Tabla 3: Inversiones pasadas.

Fuente: Adere Consultores.

(*) 700 millones de Euros

La inversión comprometida para los observatorios astronómicos que se construirán en los próximos años es de MUS\$ 3.230. En la siguiente tabla se muestra la inversión proyectada de los principales Centros Astronómicos.

Proyectado	Costo (MUS\$)
E-ELT	1.230 (*)
GMT	1.000
LSST	700
CCAT	200
TAO	100
Total	3.230

Tabla 4: Inversiones futuras.

Fuente: Adere Consultores.

(*) 1000 millones de Euros

REQUERIMIENTOS DE BIENES Y SERVICIOS



La actividad de observación astronómica necesita diferentes bienes y servicios, que se pueden categorizar en requerimientos de sitios, instituciones y personas. Como requerimientos de sitios, se entienden los bienes y servicios que necesitan, tanto los observatorios astronómicos, como las dependencias que les entregan soporte a sus operaciones. En los requerimientos de Instituciones, se consideran los bienes y servicios que necesitan las universidades y los centros de investigación para realizar su trabajo, tales como: infraestructura informática, oficinas, y laboratorios. Por requerimientos de personas, se entienden aquellos bienes y servicios que requieren los profesionales y técnicos que trabajan en las instalaciones o en las dependencias que les proporcionan soporte, tales como: alimentación, alojamiento, transporte, reubicación, educación y esparcimiento.

Los requerimientos asociados a los sitios astronómicos son los que pueden representar las oportunidades más importantes para la ingeniería nacional, en tanto que los requerimientos de instituciones y de personas, al estar cubiertos por servicios establecidos, no son relevantes para los objetivos del trabajo de esta Comisión.

7.1 Requerimientos y perfiles

Los sitios astronómicos tienen requerimientos de diferentes niveles y quienes los proveen, pueden ser clasificados en cuatro grandes perfiles: Creador, Innovador, Adaptador y Usuario⁹⁰.

El perfil más avanzado es el de creador, quién desarrolla nuevas tecnologías, en base a los avances científicos más recientes. En un nivel más abajo en la capacidad técnica, se encuentran los proveedores que tienen un perfil innovador y que desarrollan nuevas tecnologías en base a conocimientos existentes. Luego, se ubican los proveedores que entregan bienes y servicios en los que se integran tecnologías consolidadas. El nivel más bajo, el perfil de usuario, está relacionado con proveedores que entregan bienes y servicios no diferenciados.



Figura 3: Perfiles de proveedores.

Fuente: Presentación AXIS, Álvaro Urzúa.

Cada uno de los perfiles indicados anteriormente tiene asociado un nivel de riesgo relacionado con el grado de desarrollo de la tecnología. El perfil de creador es el que tiene el riesgo más alto, debido a la incertidumbre en la factibilidad técnica,

⁹⁰ Adere Consultores. Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile, 2012.

plazos y costos; luego viene el perfil innovador, en el que existe un menor nivel de riesgo debido a que desarrollan nuevas tecnologías en base a conocimientos existentes. En un nivel más abajo, se ubican los proveedores que entregan bienes y servicios basados en tecnologías consolidadas. Finalmente, el nivel de usuario es el que tiene el menor nivel de riesgo debido a que el servicio que entrega es común y se realiza en diferentes tipos de empresas.

En la siguiente tabla se indica el tipo de servicio asociado a cada uno de los perfiles indicados anteriormente, las características del servicio y el riesgo técnico asociado.

Perfil	Requerimientos	Tipo de servicio	Características	Riesgo técnico
Creador	Avance científico	Diseño y construcción de espejos, antenas e instrumentos científicos.	Diseño y construcción única para los fines del proyecto.	Alto riesgo debido a la incertidumbre técnica, plazos y costos.
Innovador	Desarrollo de nuevas tecnologías	Componentes mecánicos de montura y domo, sistemas de control y guía de telescopios, sistemas de adquisición y gestión de datos científicos.	Diseño y construcción para el proyecto, en base a tecnologías existentes.	Diseño y fabricación con menor nivel de incertidumbre.
Adaptador	Tecnologías consolidadas	Movimientos de tierra, obras civiles, montaje, cableado e instalación eléctrica, redes de datos.	Diseño y construcción estándar con adaptación a las condiciones particulares del sitio.	Bajo riesgo al ser un servicio basado en tecnologías consolidadas.
Usuario	Bienes y servicios no diferenciados	Suministros generales: energía eléctrica, telefonía, internet, agua, servicios de limpieza, mantención no especializada, transporte, alojamiento y alimentación.	Servicio entregado normalmente por empresas a otros clientes.	Muy bajo nivel de riesgo al ser un servicio común que se desarrolla en diferentes tipos de empresas.

Tabla 5: Requerimientos y servicios para cada perfil

Fuente: Adere Consultores.

7.2 Avance científico

Los requerimientos de avance científico son aquellos relacionados con la solución de problemas que no han sido resueltos aún por la tecnología, por lo que están asociados al desplazamiento de la frontera del conocimiento y a la búsqueda de nuevas soluciones. Estos son generalmente el resultado de un proceso de investigación científica y/o de desarrollo tecnológico, que es contratado a consorcios de grupos de investigación de universidades, centros de investigación o empresas de alta tecnología relacionadas con los países que financian el consorcio astronómico. En el Anexo VI se presenta, a modo de ejemplo, una muestra de consorcios formados por grupos de investigación que han diseñado y construido dos instrumentos: GRAVITY, para el Very Large Telescope Interferometer (VLTI) y SPERE, para el Very Large Telescope (VLT), ambos para el Observatorio de Cerro Paranal.

El desarrollo de proyectos de avance científico tiene un alto riesgo tecnológico y una de las motivaciones que tienen los proveedores para participar en estos requerimientos son las posibilidades de comercializar las nuevas tecnologías que desarrollen, en el campo de la astronomía como en otras áreas de la economía.

Las empresas que suministran este tipo de servicios son líderes en el mercado, y poseen recursos humanos con capacidades específicas y escasas. Lo que buscan los centros astronómicos, en este caso es establecer una relación de confianza con sus proveedores, más que una relación cliente-proveedor.

7.3 Desarrollo de nuevas tecnologías

El desarrollo de nuevas tecnologías corresponde a aquellos bienes que permiten satisfacer las necesidades tecnológicas de un proyecto astronómico, son el resultado del proceso productivo de empresas de base tecnológica, son bienes que están disponibles en el mercado, pueden ser estándares, configurados a la medida o fabricados a pedido.

Entre estos se encuentran, entre otros: sistemas de espejos y antenas, óptica activa y adaptativa, filtros ópticos, rejillas de difracción, sensores de imágenes, cámaras CCD, sistemas de control de movimiento de espejos y antenas, revestimientos, interferómetros, láseres, bombas de vacío, supercomputadores, amplificadores, mezcladores, compresores, domos, sensores de posición y espectrómetros digitales.

En general, el nivel tecnológico de estos bienes corresponde a lo que se entiende como el estado del arte de la tecnología⁹¹. La fabricación de la mayor parte de estos bienes requiere tecnologías de materiales y tecnologías de producción avanzadas, no disponibles aún en países en desarrollo.

Las empresas que proporcionan estos servicios son altamente especializadas y en su selección se consideran aspectos tales como: experiencia previa, resultados obtenidos en otros proyectos, capacidades técnicas y sintonía con los objetivos del cliente. Los riesgos asociados a ofrecer este tipo de servicios son altos, pero menores que en el caso anterior.

7.4 Tecnologías consolidadas

El diseño, construcción y operación de los observatorios astronómicos requiere que éstos dispongan internamente o contraten, servicios técnicos especializados desarrollados en base a tecnologías consolidadas, pero con un mayor nivel de exigencia que el requerido en proyectos en otras áreas de la economía. Las obras civiles tales como caminos o adaptación de terrenos, por ejemplo, se basan en tecnologías conocidas, pero requieren un nivel de especialización más alto, al realizarse en condiciones geográficas exigentes. Lo mismo ocurre con la instalación de redes de telecomunicaciones, tales como fibra óptica, instalación de tendido de transmisión eléctrica, integración de componentes, fabricación de gabinetes, pruebas de transmisión de señales, integración de equipos de telecomunicaciones y gestión de grandes volúmenes de datos como los que entregarán los nuevos proyectos astronómicos.

⁹¹ Corresponden a aquellos desarrollos, de última tecnología, que han sido probados en la industria y han sido acogidos y aceptados por diferentes fabricantes.

7.5 Bienes y servicios no diferenciados

Los bienes y servicios no diferenciados son los requerimientos que en la actualidad se encuentran mayormente cubiertos por oferentes nacionales. Entre estos se encuentran los servicios de alimentación, hotelería, limpieza, mantenimiento de infraestructura y transporte, entre otros. Es posible considerar además en este grupo, servicios tecnológicos estándares tales como: soporte de tecnologías de información, telecomunicaciones y redes establecidas, adquisición y mantenimiento de equipos computacionales.

OPORTUNIDADES PARA LA INGENIERÍA CHILENA



8.

Los Observatorios Astronómicos requieren, durante todo su ciclo de vida, diferentes tipos de bienes y servicios, generando con ello distintas oportunidades para la ingeniería nacional, las que se explican a continuación.

8.1 Oportunidades en la etapa de proyecto

En las diferentes fases de desarrollo de un proyecto astronómico se requieren bienes y servicios de diferentes niveles, por lo que se presentan distintas oportunidades para la ingeniería, dependiendo de las capacidades que tengan los proveedores.

Las oportunidades más atractivas corresponden, en orden decreciente, a: avance científico, desarrollo de nuevas tecnologías y tecnologías consolidadas. Los bienes y servicios no diferenciados, debido a que corresponden a bienes y servicios no transables que ya están siendo entregados a los observatorios astronómicos por empresas locales, no constituyen oportunidades atractivas para la ingeniería.

Avance científico

Cada nuevo proyecto de diseño y construcción de un observatorio astronómico es una respuesta a una necesidad científica que no puede ser satisfecha con los instrumentos existentes, por lo que se debe desarrollar tecnología que va más allá del estado del arte de la tecnología actual. Estos requerimientos representan entre un 70% y un 80% de la inversión requerida para un nuevo observatorio.

El desarrollo tecnológico representa, en este caso particular, un gran desafío de ingeniería, al ser requerimientos únicos de diseño y suministro, y no existir precedentes respecto a la existencia de una solución técnica económicamente factible. Las empresas proveedoras de estas tecnologías son en general empresas internacionales, originarias de los países miembros de los consorcios que financian el proyecto y especialistas en algunos de los ámbitos de la tecnología requerida, tales como: interferometría, óptica adaptativa, componentes mecánicos, construcción de espejos, detectores y receptores de radiofrecuencia, cámaras, sensores o espectrógrafos ópticos, telescopios, antenas, fotónica, software o fabricación de domos, entre otros.

La práctica común es que los consorcios astronómicos definan los requerimientos funcionales de los componentes principales, tales como: espejos, antenas e instrumentos científicos, la precisión, deformaciones máximas y vibraciones aceptables y contraten para su desarrollo a proveedores conocidos y confiables de los mismos países que financian el proyecto. Estas tecnologías pueden dar origen a patentes industriales y aplicaciones en otras áreas de la economía.

Desarrollo de nuevas tecnologías

Los Observatorios Astronómicos requieren sistemas y dispositivos con un menor nivel de desarrollo, que pueden ser diseñados y fabricados por empresas especialistas. Estos pueden ser, entre otros, desarrollo y validación de funcionamiento de tecnologías conocidas bajo circunstancias ambientales extremas, diseño y fabricación de componentes mecánicos de la montura y el domo, desarrollo de sistemas electrónicos de control de movimiento, sistemas de adquisición y gestión de datos científicos y sistema de monitoreo de variables críticas tales como temperatura y vibraciones.

En Chile existen algunas experiencias en diseño y fabricación de instrumentos y equipos para observación astronómica que están en niveles intermedios de tecnología: superior a las tecnologías consolidadas pero inferior a las tecnologías de avance científico⁹² por lo que existen algunas capacidades para suministrar sistemas y dispositivos en este nivel de tecnología.

Tecnologías consolidadas

Los observatorios astronómicos necesitan contratar bienes y servicios asociados a tecnologías conocidas pero que requieren un nivel de especialización más alto que un servicio no diferenciado. Existen experiencias de empresas locales que han entregado servicios a los observatorios astronómicos en las siguientes áreas:

- Estudios de emplazamiento, integración de sistemas y obras civiles especializadas, clasificación geológica y geomecánica de suelos, revisión de estudios de ingeniería realizados por empresas internacionales, construcción de caminos, edificios y tendidos eléctricos, entre otros.
- Instalación de redes de fibra óptica y de tendidos para transmisión eléctrica, procesamiento, transmisión y distribución de datos, video y voz, sobre diferentes tecnologías de redes de comunicaciones.
- Integración de componentes, fabricación de gabinetes, pruebas de transmisión de señales o integración de equipos de telecomunicaciones con fines específicos.

Existen por lo tanto empresas locales que pueden cumplir con los estándares de calidad requeridos por los observatorios internacionales para este tipo de servicios.

8.2 Oportunidades en la etapa de operación

En la etapa de operación de los observatorios astronómicos, los equipos e instalaciones deben ser mantenidos y actualizados y los datos recibidos deben ser gestionados, lo que representa oportunidades atractivas para la ingeniería como se explica a continuación.

⁹² El Centro de Astro-Ingeniería de la Universidad Católica de Chile ha desarrollado algunos instrumentos de espectroscopía, entre los que se pueden mencionar los espectrógrafos: de alta resolución FIDEOS (para telescopio de 1 mt ESO/La Silla) y PUCHEROS (para telescopio de 0,5 m OBSUC), diseñados y fabricados íntegramente en Chile y el desarrollo de nuevos instrumentos: TardYs (para telescopio de 6,5 m U.Tokio, Chajnantor), G-Clef (para GMT) y ACT (telescopio submm EL Toco), MOONS (para VLT) y VALTEC (0,5 m), los que han generado patentes.

El Centro de Astro-Ingeniería está participando además en el desarrollo de un espectrógrafo de alta resolución para el E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande) y en la construcción de 63 cámaras para fotografiar todo el cielo en el Observatorio Las Campanas.

La Universidad de Chile, a través de un consorcio internacional con Estados Unidos, Canadá y Taiwán, participa en la construcción de 66 receptores para ALMA.

El Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) está trabajando para construir un supercomputador para recibir las fotografías tomadas con el telescopio Decam, ubicado en Cerro Tololo.

Mantenimiento especializado y reparación de equipos e instrumentos

Los principales servicios de mantenimiento de equipos e instrumentos que contratan los centros astronómicos son: Soporte de ingeniería para el telescopio y sus instrumentos, mantenimiento de partes mecánicas y estructuras, diagnóstico y reparación de dispositivos electrónicos, mantenimiento y reparación de componentes ópticos, espejos y actuadores de la óptica activa y servicios de apoyo a la operación.

En el mantenimiento especializado, reparación de instrumentos, espejos, calibración de componentes, actualización de software y fabricación de partes y piezas, debido al nivel de especialización necesario, se observa una preferencia por enviar los equipos al fabricante, en su país de origen o realizar la mantención internamente, con personal especializado. Existe por lo tanto una oportunidad que puede ser aprovechada por empresas locales, en asociación con fabricantes para mantener estos equipos.

En el caso de los servicios especializados de apoyo a la operación, existen empresas locales que prestan servicios de mantenimiento de equipos eléctricos y servicios de transmisión de datos.

Actualización de equipos e instrumentos

Los equipos e instrumentos deben ser reemplazados cada cierto tiempo, cuando se buscan respuestas a nuevas preguntas científicas. En la Universidad de Chile y en la Universidad Católica se han establecido centros dedicados al desarrollo de nuevas tecnologías para la astronomía. En el año 2008 se creó, en la Universidad de Chile, el Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA) y en el año 2009, se inauguró en la Universidad Católica el Centro de Astro-Ingeniería (AIUC). En el año 2013, CONICYT empezó a apoyar, a través del Fondo QUIMAL, el diseño y desarrollo de nuevas tecnologías para la astronomía. Esto ha permitido la participación de CATA en el desarrollo del detector de band-1 (7 mm) del telescopio ALMA y la participación del AIUC en la construcción del instrumento MOONS del telescopio VLT.

Existen capacidades locales para diseñar y actualizar instrumentos y equipos que pueden generar oportunidades para la ingeniería y los ingenieros locales.

8.3 Oportunidad de formar nuevas empresas o realizar spin-off⁹³

La instalación de los nuevos observatorios astronómicos en el norte de Chile ha permitido el desarrollo de capacidades locales únicas en el uso de nuevas tecnologías, las que pueden ser aplicadas en otras industrias relevantes para la economía nacional. Existen casos en el extranjero, y también en Chile, de aplicación de tecnologías desarrolladas en astronomía a otros sectores de la economía.

Telescopio Espacial Hubble⁹⁴ (HST)

Un ejemplo interesante de aplicación de tecnologías desarrolladas para la observación astronómica, en otras áreas de la economía es el del HST. Este orbita, en el exterior de la atmósfera alrededor de la Tierra, a 593 km sobre el nivel del mar

⁹³ Se entiende por spin-off la creación de empresas innovadoras a partir de la transferencia de conocimientos y personas de grupos o centros de investigación y de empresas.

⁹⁴ Hubble Space Telescope.

y tiene un período cercano a los 95 minutos. Este telescopio fue desarrollado como un proyecto conjunto entre la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio⁹⁵ (NASA) y la Agencia Espacial Europea⁹⁶ (ESA) y fue puesto en órbita el 24 de abril de 1990. El telescopio puede obtener imágenes con una resolución óptica mayor que 0,1 segundos de arco.

El HTS ha cambiado la comprensión del universo; diferentes tecnologías que fueron desarrolladas para este telescopio han permitido crear o mejorar instrumentos y equipos en ámbitos diferentes al de la astronomía, como la medicina, tal como se indica a continuación.

- *Micro endoscopio para el diagnóstico médico*
La misma tecnología que utiliza el HST para el procesamiento de imágenes ha ayudado a mejorar el micro endoscopio, un instrumento quirúrgico que faculta a los cirujanos a ver lo que está sucediendo dentro del cuerpo, en una pantalla, permitiéndoles de esta manera realizar una cirugía artroscópica mínimamente invasiva, haciendo este procedimiento más rápido, económico y con menor riesgo.
- *Biopsias más eficientes*
El desarrollo del HST requirió diseñar un dispositivo que convirtiera la luz de las estrellas distantes en imágenes digitales. La NASA trabajó con un proveedor, desarrollando un dispositivo que posteriormente, fue utilizado por los médicos para realizar la mamografía digital, técnica que permite tener un mejor diagnóstico de cáncer mamario, en especial en etapa precoz, utilizando una técnica menos invasiva.

Spin-off en el mundo

En el mundo existen diferentes empresas que se han originado en desarrollos de tecnologías para la astronomía, que han sido aplicados a otros sectores productivos. Algunas de ellas se indican a continuación⁹⁷.

- *Altium Limited (www.altium.com)*
Empresa australiana que se originó a partir de la electrónica desarrollada para la astronomía de rayos X. En 1991 desarrollo la primera herramienta para diseño de circuitos electrónicos basada en Windows. Altium emplea 500 personas en todo el mundo y genera ingresos por cerca de MUS\$ 100.
- *Radiata*
Empresa australiana creada en el año 1997 para comercializar sistemas de Local Area Network (LAN) inalámbricos. El sistema comercializado se basa en el desarrollo de un chip para escuchar las débiles fuentes de radio de los agujeros negros. Esta tecnología fue patentada posteriormente por CSIRO y forma parte de los estándares 802.11a, 802.11g y 802.11n. La empresa fue adquirida en el año 2000 por Cisco Systems por 600 millones de dólares.
- *Imagine Eyes (www.imagine-eyes.com)*
Empresa francesa que utiliza la tecnología de óptica adaptativa, desarrollada originalmente para astronomía, la que aplica en dispositivos oftalmológicos que permiten analizar el ojo humano con un gran nivel de detalle, permitiendo

⁹⁵ National Aeronautics and Space Administration

⁹⁶ European Space Agency

⁹⁷ Cameron Partners. Estudio de nuevos negocios y spin-offs a partir de la astroingeniería. Santiago, Chile (2013).

que los doctores detecten enfermedades de manera temprana realizando de esta forma un mejor tratamiento. La empresa fue fundada en el año 2003 por especialistas en fotónica y oftalmología.

- *Matrox* (www.matrox.com)
Empresa canadiense, creada por Lorne Trottier y Branko Matic, en 1976, con el objeto de producir tarjetas electrónicas para almacenar imágenes numéricas en el Observatorio Mont Mégantic (OMM). Matrox tiene una experiencia de más de 40 años en diseño de soluciones de hardware y software para aplicaciones gráficas, de video y de tratamiento de imágenes y visión computarizada.

Experiencias en Chile

En Chile existen pocas experiencias de empresas creadas a partir de desarrollos tecnológicos asociados a la observación astronómica pero, se han dado algunos casos de científicos e ingenieros que han creado nuevas empresas, a partir de sus conocimientos de astronomía o han desarrollado tecnología para otras áreas, a partir de tecnología utilizada en astronomía.

- *Andes Scientific Instruments*
Andes Scientific es una empresa que pertenece a DICTUC que fue creada por la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica con el objeto de desarrollar sensores, dispositivos especializados o instrumentos que son utilizados para medir variables difíciles de distinguir en sectores científicos e industriales, utilizando las siguientes disciplinas de las ciencias de la ingeniería: óptica, electrónica, mecánica, criogenia y software. La empresa atiende actualmente tres sectores: astronomía, industria y ciencias de la vida.
- *ObsTech*
La empresa ObsTech, formada por un grupo de astrónomos, desarrolló un sistema de control robusto, centralizado y único que permite controlar telescopios a distancia a través de internet. El sistema de control: Telescope Control System (TCS) permite apuntar, seguir y comunicarse con cualquier dispositivo de un telescopio, sea este un motor o una cámara y transmitir los datos desde lugares remotos con precisión y confiabilidad.
- *Radio-Visión*
El Laboratorio de Ondas Milimétricas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, está desarrollando: un proyecto de Radio-Visión, que pretende utilizar la emisión de los teléfonos celulares para ayudar en el rescate de personas atrapadas en derrumbes y avalanchas, una antena de alta frecuencia para Wi-Fi y un medidor de humedad de la madera, aplicaciones que podrían ser utilizadas en la industria⁹⁸.

En el mismo Departamento, en grupo de investigadores presentó la petición de protección de propiedad intelectual para el diseño y construcción de antenas de alta frecuencia. Esta antena, al operar en frecuencias en torno a 60 GHz no requiere permiso de operación y al tener una mayor capacidad de transferencia de datos, permitiría transmitir inalámbricamente televisión de alta definición⁹⁹.

⁹⁸ <http://ingenieria.uchile.cl/noticias/119238/jcfm-destaca-en-segundo-encuentro-nacional-de-ingenieria-2030>

⁹⁹ <http://ingenieria.uchile.cl/noticias/113358/antena-de-alta-frecuencia-innovando-en-la-conectividad>

Áreas de desarrollo tecnológico más relevantes para Chile

En un estudio realizado en el año 2012¹⁰⁰, se identificaron las áreas de desarrollo tecnológico más relevantes para Chile y las áreas en las que estas posibles aplicaciones podrían ser aplicadas, las que se muestran en la siguiente tabla.

Área de desarrollo tecnológico	Áreas de aplicación
Detectores ópticos	Medicina, seguridad, manufactura, minería
Óptica adaptativa	Oftalmología, medicina
Sistemas de control	Manufactura, minería, medicina, robótica
Antenas y receptores para hiperfrecuencias	Comunicaciones, sensórica
Criogenia	Computación de alto rendimiento, comunicaciones
Dispositivos de alta frecuencia	Computación, telecomunicaciones, electrónica
Grandes bases de datos	Datos médicos, datos industriales
Procesamiento de imágenes	Ingeniería, medicina, recursos naturales
Procesamiento paralelo	Meteorología, sismología
Almacenamiento de datos	Centros de datos de alta seguridad
Transmisión de datos	Conectividad de zonas aisladas

Tabla 6: Áreas de desarrollo tecnológico y posibles áreas de aplicación de tecnologías.

Fuente: Adere Consultores.

En ese mismo estudio, se estima el efecto económico que pueden tener las actividades relacionadas con la astronomía y se indica que, el mayor impacto, resultaría de la creación de spin-offs con ofertas de mercado basadas en el uso de las tecnologías indicadas anteriormente, a otras áreas de la economía.

8.4 Gestión de grandes volúmenes de datos

Los telescopios que están siendo construidos actualmente en Chile generarán una gran cantidad de datos, que deben ser recibidos, almacenados y decodificados, lo que implicará nuevos desafíos tecnológicos para la ingeniería¹⁰¹.

Chile, al contar con estos observatorios y con una red integrada por astrónomos, matemáticos, ingenieros y desarrolladores preparados en el diseño de centro de gestión de datos, podría incorporarse, en el mediano plazo, como proveedor en el campo del manejo de grandes datos (Big-Data)¹⁰².

Estudios recientes indican que este mercado, alcanzará en el año 2019, un volumen global de MUS\$ 187.000¹⁰³, es decir, tres veces más que el total de las exportaciones de cobre realizadas por Chile en el año 2016.

¹⁰⁰ Adere Consultores. Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile, 2012.

¹⁰¹ Como se indicó anteriormente, el observatorio ALMA, a modo de ejemplo, genera actualmente un Terabyte (TB) de datos al día, el LSST, generará una cantidad tan grande de datos, 30 (TB) por noche, en el año 2022. El LSST recolectará más datos que los que recolectó el Hubble en 20 años.

¹⁰² Concepto que hace referencia a un conjunto de datos tan grandes que supera la capacidad del software convencional para ser capturados, administrados y procesados.

¹⁰³ <http://www.ituser.es/en-cifras/2016/05/el-mercado-de-big-data-y-business-analytics-crecera-mas-de-un-50-hasta-2019>

8.5 Observatorios turísticos

Existen iniciativas en las que se construyen observatorios que, sin estar asociados a los últimos descubrimientos, cumplen una labor educativa, acercando la astronomía a los estudiantes y a la comunidad, teniendo además impacto en otras áreas, como es el caso de los observatorios: Astronómico de O'Higgins, Mamalluca, las instalaciones de Conicyt en el observatorio ALMA, y el observatorio de Yepun, como se indica en el Anexo VII.

Los profesionales chilenos han ganado experiencia operando y manteniendo observatorios astronómicos y desarrollando tecnologías para la astronomía. Estas capacidades pueden ser aprovechadas en el diseño y construcción de observatorios para ser utilizados en la formación de estudiantes y para fines turísticos.

9.

PRINCIPALES CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas del trabajo realizado por la Comisión son las siguientes:

1. Chile, al poseer una moderna infraestructura para observación astronómica, científicos de primer nivel, grupos especializados en desarrollo de tecnología para astronomía, centros de formación reconocidos internacionalmente e ingenieros que dominan las técnicas de observación óptica, infrarroja y milimétrica, está en una situación privilegiada para desarrollar competencias tecnológicas que beneficien a la ingeniería, a los ingenieros y a la sociedad.

- Las condiciones atmosféricas únicas del norte de Chile y los acuerdos suscritos con los Consorcios Astronómicos Internacionales, han hecho posible la instalación en el país de polos de observación astronómica en Antofagasta, Atacama y Coquimbo, en los que se han instalado y se están instalando los observatorios ópticos, infrarrojos y milimétricos terrestres más avanzados del mundo.
- La astronomía es la disciplina científica chilena que más trabajos publica en revistas indexadas y los investigadores chilenos, al tener acceso a tiempo de observación astronómica, están a la par con sus colegas norteamericanos y europeos.
- En diferentes universidades, se han formado centros dedicados a la investigación y desarrollo de tecnologías para la astronomía, los que han diseñado y fabricado instrumentos para diferentes observatorios.
- En los observatorios instalados en Chile, existen profesionales altamente capacitados que, al tener la responsabilidad de mantener operar y actualizar los equipos, instrumentos e instalaciones, han logrado conocer la tecnología utilizada en la observación astronómica.
- Se dispone de una masa crítica, aunque pequeña, de ingenieros de diferentes especialidades, que podrían portar sus capacidades al desarrollo de tecnología para la observación espacial.
- Ha aumentado significativamente el interés por estudiar astronomía. Se espera que, en los próximos cinco años, el número de astrónomos se cuadruplique.

2. Ha existido por parte del Estado de Chile, una política sostenida de fomento a la instalación de Centros Astronómicos extranjeros en territorio nacional y en los diferentes acuerdos suscritos con los Consorcios Astronómicos Internacionales, se ha privilegiado el tiempo de observación para los astrónomos chilenos por sobre la formación de capital humano avanzado y la posibilidad de desarrollar tecnología localmente.

- Las diferentes leyes, decretos y convenios suscritos muestran una clara tendencia por parte del Estado de Chile de fomentar de manera sistemática la instalación de Centros Astronómicos extranjeros en territorio nacional, homologando, dentro de lo posible, los beneficios y deberes entre las diferentes instituciones lo que ha permitido que Chile se destaque en el concierto astronómico internacional.
- En los acuerdos suscritos, se han donado terrenos para que se instalen los observatorios y otorgado a estas instituciones el tratamiento de Organismos Internacionales y beneficios tributarios a cambio de tiempo de observación para los astrónomos chilenos.

- Solamente en algunos de estos acuerdos, existe el compromiso de formar a ingenieros y técnicos para el desarrollo de la astronomía y de las especialidades científicas y tecnológicas conexas.
- En un número menor de ellos, se ha otorgado a las empresas chilenas, la posibilidad de participar en las licitaciones de los bienes y servicios que podrían requerir los observatorios y sitios asociados.

3. Los observatorios astronómicos requieren en la etapa de desarrollo del proyecto y de operación, diferentes tipos de bienes y servicios, de distinto nivel tecnológico, algunos de los cuales pueden constituir oportunidades interesantes para la ingeniería nacional.

En la etapa de proyecto, los observatorios astronómicos requieren:

- Diseñar y fabricar reflectores e instrumentos de avance científico que son desarrollados por consorcios formados por grupos de investigación de universidades, centros de investigación o empresas de alta tecnología, que pertenecen a los países miembros de los consorcios que financian el proyecto, consorcios a los que podrían integrarse, en el corto plazo, algunos de los grupos de investigación de universidades chilenas.
- Desarrollar nuevas tecnologías que son el resultado de aplicar tecnologías existentes para atender algún requerimiento de observación astronómica. Existen competencias en empresas locales que han diseñado y fabricado equipos e instrumentos para observatorios astronómicos.
- Contratar tecnologías consolidadas que corresponden a servicios tradicionales de ingeniería que pueden ser proporcionados por empresas locales, con un alto nivel de especialización y buenas prácticas en gestión de proyectos y de calidad.

En la etapa de operación y actualización, los observatorios astronómicos requieren:

- Realizar el mantenimiento especializado y reparar equipos e instrumentos. La tendencia ha sido enviarlos al fabricante, en su país de origen o realizar la mantención internamente. Es factible proveer este servicio localmente, mediante acuerdos de trabajo entre fabricantes y empresas tecnológicas locales
- Reemplazar equipos e instrumentos, cuando se buscan respuestas a nuevas preguntas científicas o cuando éstos están obsoletos. En Chile están operando centros dedicados al desarrollo de nuevas tecnologías para la astronomía que pueden diseñar y construir equipos e instrumentos de menor complejidad.

4. *La instalación de los nuevos observatorios astronómicos en el norte de Chile ha permitido el desarrollo de capacidades locales en el uso de nuevas tecnologías que pueden ser aplicadas en otras industrias relevantes para la economía nacional.*

- En el extranjero, existen experiencias de aplicación de tecnologías desarrolladas para la observación astronómica, en ámbitos diferentes al de la astronomía y de formación de nuevas empresas en base a estas tecnologías. En Chile se han dado algunos casos puntuales.

- Existen centros de desarrollo de tecnologías, en las principales universidades del país y profesionales, en los observatorios en operación, que podrían aportar sus capacidades a la aplicación de estas tecnologías en otras áreas de la economía.

5. Los telescopios que están siendo construidos actualmente en Chile, generarán una gran cantidad de datos que deben ser gestionados, lo que implicará nuevos desafíos tecnológicos para la ingeniería junto con el desarrollo de capacidades locales que pueden ser aprovechadas.

- Los nuevos observatorios en construcción generarán una cantidad tan grande de datos, que será necesario desarrollar una industria que sea capaz de gestionarlos.
- Chile, al contar con estos observatorios y con una red integrada por astrónomos, matemáticos, ingenieros y desarrolladores preparados en el diseño de centros de gestión de datos, podría convertirse, en el mediano plazo, una vez dominada esta tecnología en un actor relevante en el campo del manejo de grandes datos (Big-Data).

6. El conocimiento que han adquirido los ingenieros chilenos, en la operación de los grandes telescopios y los diferentes grupos de desarrollo tecnológico, en el diseño y fabricación de equipos e instrumentos, puede ser aplicado al ámbito del diseño y construcción de observatorios para astrónomos aficionados, estudiantes y para fines turísticos.

- Existen capacidades para el diseño y construcción de observatorios de dimensiones menores a los grandes telescopios pero que son adecuados para la investigación científica, la formación de profesionales y estudiantes y el turismo.
- Este tipo de equipamiento astronómico podría ser desarrollado preferentemente con ingeniería y tecnología chilenas y estar orientado a construir observatorios que cumplan una labor educativa, de entretenimiento y turística.

PROPUESTAS Y ACCIONES



Considerando el objetivo y alcance del trabajo a realizar y las conclusiones obtenidas, se presentan a continuación, las siguientes propuestas y acciones que permitirían, en opinión de los miembros de la Comisión, aprovechar las oportunidades de desarrollo que podría representar para la ingeniería, el incremento en la capacidad de observación astronómica terrestre que ha tenido y tendrá Chile en el corto plazo.

1. Incorporar en los futuros convenios que suscriba el Estado de Chile, con los Consorcios Astronómicos Internacionales, cláusulas que fomenten el desarrollo de competencias tecnológicas locales.

La astronomía nacional ha tenido un desarrollo sin precedentes y nuestro país es hoy un actor relevante en la astronomía mundial. No ha ocurrido lo mismo con la ingeniería nacional. La tecnología que requieren estos centros ha sido desarrollada en los países miembros de los consorcios astronómicos y los equipos e instalaciones ingresan al país como productos terminados. El rol de la ingeniería se ha limitado al suministro de bienes y servicios no diferenciados, que son los que tienen menor valor agregado.

Algunas acciones sugeridas para fomentar el desarrollo de competencia tecnológicas locales son:

- Incluir en los futuros convenios, además del 10% de tiempo de observación para los astrónomos chilenos, un sistema de compensación (royalty) para fomentar el desarrollo de empresas tecnológicas en torno a la astronomía.
- Valorar económicamente el acceso a la observación astronómica y establecer un intercambio entre este valor y el derecho a participar como proveedor tecnológico en aquellas áreas en las que existan capacidades (pay to play).

2. Fomentar el desarrollo local de tecnologías relacionadas con la observación astronómica.

Existen diferentes centros de desarrollo tecnológico que diseñan y fabrican equipos y componentes de niveles intermedios de tecnología. Es conveniente que estos centros continúen su trabajo y se creen nuevos centros que diseñen y fabriquen equipos e instrumentos.

Algunas acciones sugeridas son:

- Incentivar la participación como proveedores, de equipos e instrumentos de niveles menores de tecnología, de los centros de desarrollo tecnológico existentes.
- Establecer fondos públicos para el desarrollo de Consorcios Tecnológicos integrados por proveedores extranjeros, centros de desarrollo tecnológico y empresas tecnológicas locales, orientados a diseñar y fabricar equipos e instrumentos para observación astronómica, cada vez más complejos.

3. Incentivar la creación de nuevas empresas, de base tecnológica, a partir del conocimiento y dominio que tienen y tendrán los profesionales chilenos, de las tecnologías de observación astronómica.

Aprovechar la experiencia de los ingenieros chilenos que trabajan en los observatorios astronómicos y en los centros de desarrollo tecnológicos en el diseño y fabricación de tecnologías que están más allá de la frontera del conocimiento para desarrollar nuevas empresas, de base tecnológica que utilicen estas competencias en otras áreas de la economía.

Algunas acciones sugeridas son:

- Identificar las tecnologías utilizadas en la observación astronómica que podrían ser desarrolladas en el país y las áreas de la economía en las que su aplicación podría tener mayor impacto.
- Establecer programas de fomento para incentivar el desarrollo de nuevas empresas que desarrollen localmente esta tecnología.
- Incentivar el desarrollo de una industria tecnológica local que, aprovechando el conocimiento adquirido, se dedique al diseño y fabricación de telescopios e instrumentos para la educación, entretenimiento y turismo.

4. Incrementar el número de ingenieros que trabajan en áreas relacionadas con astronomía.

Es sabido que ha habido un aumento importante en el número de Ingenieros Civiles titulados en los últimos años y que existe una tendencia creciente a seguir especialidades orientadas a la gestión, en desmedro de las áreas tecnológicas¹⁰⁴, por lo que es necesario incrementar el número de ingenieros que siguen estas carreras.

Algunas acciones sugeridas son:

- Motivar en los alumnos de enseñanza básica el interés en las carreras de ciencia y tecnología, mediante la difusión de temas relacionados con la astronomía, las capacidades instaladas en el país y el potencial de desarrollo que éstas tienen.
- Difundir en las escuelas de ingeniería y ciencias, las líneas de trabajo de los centros de desarrollo tecnológico y los proyectos que han desarrollado para los diferentes observatorios astronómicos.
- Desarrollar competencias específicas para los futuros y actuales ingenieros que deseen trabajar en áreas relacionadas con astronomía e ingeniería, mediante la elaboración de memorias de título, pasantías en observatorios astronómicos y centros de investigación y programas de postgrado.

¹⁰⁴ Instituto de Ingenieros de Chile. *Capital Humano para la competitividad. El caso de la Ingeniería Civil. 2013*

5. Desarrollar en Chile una industria global de Big-Data

Esta industria debería estar orientada inicialmente a recibir, transmitir, procesar y almacenar los grandes volúmenes de datos que se reciban de la observación astronómica y posteriormente, una vez dominada la tecnología, debería aplicar este conocimiento a otras áreas de la economía global.

Algunas acciones sugeridas son:

- Crear la infraestructura que se requerirá para recibir, transmitir, procesar y almacenar los datos que se generen en la observación astronómica.
- Desarrollar la conectividad que sea necesaria para que los involucrados en los proyectos de observación astronómica puedan compartir y hacer uso de la información.
- Establecer programas de fomento para la creación de nuevas empresas de base tecnológica orientadas a gestionar grandes datos para otras áreas de la economía.

11.

BIBLIOGRAFÍA

- Adere Consultores. Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile, 2012.
- Cameron Partners. Estudio de nuevos negocios y spin-offs a partir de la astroingeniería. Estudio realizado para la División de Innovación, Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo del Gobierno de Chile, Santiago, Chile (2013).
- CONICYT. Astronomy, technology, industry. Roadmap for the Fostering of Technology Development and Innovation in the Field of Astronomy in Chile, 2012.
- Conicyt, Fichas de observatorios astronómicos. <http://www.conicyt.cl/documentos/Fichasobservatorios.pdf>
- Instituto de Ingenieros de Chile. Capital Humano para la competitividad. El caso de la Ingeniería Civil. 2013
- NASA Preliminary Observations on the Management of Space Telescopes. 2017
- Sociedad Española de Astronomía (SEA), glosario de términos astronómicos. <http://www.sea-astronomia.es/drupal/?q=glosario>. Consultado el 5 de marzo de 2018.
- University of Hawaii Economic Research Organization (UHERO). The Economic Impact of Astronomy in Hawaii, 2014.



Anexo I: Glosario

Contaminación lumínica

Disminución de la visibilidad de las estrellas y de otros objetos celestes a consecuencia del mayor brillo del cielo nocturno debido a la reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y en las partículas del aire urbano.

Correlacionador

Súper computador que recibe las señales de las distintas antenas, las mezcla y guarda los datos, los que serán posteriormente descargados y analizados por los científicos.

Espectroscopía

Técnica utilizada por los astrónomos, para conocer las principales propiedades de las estrellas planetas y galaxias distantes, tales como su composición química y movimiento, mediante la descomposición del espectro electromagnético.

Interferometría

Tecnología en la que se combinan las señales de dos o más telescopios individuales consiguiendo que éstos operen como una sola unidad, con un diámetro de espejo equivalente a la distancia entre los telescopios.

Óptica activa

Tecnología que ha permitido resolver el problema de pérdida de precisión de los espejos al aumentar su tamaño, incorporando pistones llamados “actuadores” que ajustan la forma del espejo durante las observaciones permitiendo mantener la calidad de la imagen.

Óptica adaptativa

Tecnología que ha permitido resolver, al menos parcialmente, la distorsión de las imágenes debido a la turbulencia mediante el uso de espejos deformables, controlados computacionalmente, que permiten corregir el efecto de la atmósfera en la observación.

Resolución

Característica de diseño de un telescopio que indica la capacidad que tiene de mostrar de forma individual dos objetos que se encuentran muy juntos. La resolución se mide en segundos de arco y depende de la longitud de onda en la que opera y del diámetro del espejo o antena; cuanto mayor sea la resolución, mayor es la capacidad del telescopio para mostrar separadamente a dos cuerpos celestes vecinos.

Telescopios milimétricos o radiotelescopios

Telescopios que observan el universo en longitudes de onda superiores a 1 mm. y utilizan antenas parabólicas en lugar de espejos.

Telescopios ópticos e infrarrojos (OIR)

Telescopios que observan el universo en longitudes de onda que van desde 400 a 700 nm (ópticos) y de 700 nm a 1mm (infrarrojos) y recogen la luz mediante espejos.

Turbulencia atmosférica

Es la agitación de la atmósfera que se caracteriza por un cambio repentino en la dirección e intensidad del viento en una corta distancia en sentido vertical. Esta disminuye la resolución de los observatorios terrestres disminuyendo con ello la calidad de las imágenes.

Anexo II: Ejemplo de instrumentos de telescopios ópticos (VLT)¹⁰⁵

- FLAMES (Fibre Large Array Multi-Element Spectrograph). Espectrógrafo que permite estudiar de manera simultánea y en alta resolución espectral, cientos de estrellas individuales ubicadas en galaxias cercanas. También está equipado para espectroscopía de campo integral. Tiene un poder de resolución entre 6000 y 47000, en el rango de 370 a 950 nanómetros.
- FORS2 (FOcal Reducer and Spectrograph). Espectrógrafo con funciones múltiples que puede emplearse para la obtención de imágenes en luz visible y para la espectroscopía de baja resolución. Tiene un poder de resolución entre 260 y 2600, en el rango de 330 a 1100 nanómetros.
- HAWK-I (High Acuity Wide field K-band Imager). Cámara que opera en el infrarrojo cercano, con un campo visual relativamente amplio.
- KMOS (K-band Multi Object Spectrograph). Espectrógrafo de infrarrojo cercano, equipado con 24 unidades de campo integral, que pueden posicionarse de distintas maneras. Tiene un poder de resolución entre 1800 y 4000. Es capaz de realizar observaciones en el rango de 0,8 a 2,5 micrones.
- SINFONI (Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared). Espectrógrafo de campo integral para observaciones en el infrarrojo cercano (1,1 - 2,45 micrones), alimentado por un módulo de óptica adaptativa. Tiene un poder de resolución entre 1500 y 4000.
- UVES (Ultra-violet and Visible Echelle Spectrograph). Espectrógrafo de alta dispersión, capaz de observar desde 300 a 1100 nanómetros, con una resolución espectral máxima de 110.000.
- X-shooter. Espectrógrafo capaz de abarcar una gama muy amplia de longitudes de onda [UV a infrarrojo cercano] de manera simultánea. Tiene un poder de resolución entre 5000 y 17000, en el rango de 300 a 2500 nanómetros.

¹⁰⁵ <https://www.eso.org/public/chile/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/>

Anexo III: Principales proyectos desarrollados por los centros tecnológicos¹⁰⁶

Centro de Astro-Ingeniería UC (AIUC)

Algunos de los proyectos desarrollados por este centro son:

- Modernización de una cámara basada en radiación infrarroja cercana y espectrómetro multiobjeto.
- Diseño y construcción de espectrómetro de dispersión transversal Echelle
- Red de seis telescopios idénticos, completamente automatizados de amplio rango.
- Diseño y construcción de instrumento astronómico multipasabanda para SOAR.
- Participación en la fase A del estudio de un espectrómetro Echelle de alta resolución para radiación infrarroja cercana para el E-ELT.
- Participación en el diseño y construcción del espectrógrafo óptico multiobjeto y de radiación infrarroja cercana para el VLT.
- Participación en el diseño y construcción del telescopio submilimétrico para el ACT
- Participación en el diseño y construcción de dos planos criogénicos focales para el instrumento G-Cleg y calculador del tiempo de exposición para el GMT.
- Participación en la eliminación de vibraciones para instrumento de óptica adaptativa multiconjugada para Gemini Sur.
- Participación en el diseño y construcción de balizas láser para implementar la técnica SLODAR para caracterizar la turbulencia óptica para Gemini Sur.

Laboratorio de ondas milimétricas U. de Chile

Algunos de los proyectos desarrollados por este laboratorio son:

- Diseño e implementación de un espectrómetro separador con banda lateral digital calibrada para aplicaciones de radioastronomía usando una plataforma basada en FPGAs.
- Diseño, construcción y puesta en marcha de 6 receptores para Banda 5 (163 a 211 GHz) de ALMA.
- Diseño y construcción de un receptor heterodyner para la banda 1 (31-45 GHz) de ALMA.
- Diseño, construcción y puesta en marcha de un receptor separador de banda lateral para actualizar el receptor radiotelescopio MINI (80-115 GHz).
- Diseño y construcción de un receptor de separación de banda lateral para mejorar el receptor Banda 9 (600-720 GHz) de ALMA.
- Diseño y construcción de una cámara anecóica para mediciones de patrones de rayos de ~ 40 GHz.
- Diseño y construcción de un radiointerferómetro para la adquisición de conocimientos, entrenamiento y experiencias docentes, 2008.
- Construcción y medición de un cuerno de perfil spline optimizado de 31-45 GHz con ondulaciones, 2012.
- Diseño y construcción de un transductor de banda ancha ortomodal de doble arista para la banda de 7 mm, 2012.

¹⁰⁶ Cameron Partners. Estudio de nuevos negocios y spin-offs a partir de la astroingeniería, Santiago, Chile (2013).

- Diseño e implementación de un sistema de medición de patrones de radiación de antenas en el campo cercano.
- Caracterización de transistores de electrones de alta movilidad en banda Q.
- Integración física de un amplificador de bajo ruido a un receptor en 100 GHz.
- Diseño y construcción de la etapa analógica de un interferómetro de dos antenas.
- Automatización de un radiómetro para medir la opacidad atmosférica a 115 GHz.
- Relocalización y mejora del radiotelescopio MINI de 1.2 m. (115 GHz) para el Cerro Calán para entrenamiento e investigación.

Computer Systems Research Group (CSRG), Universidad Técnica Federico Santa María

Algunos de los proyectos desarrollados por este grupo son:

- Desarrollo de un generador de código a partir de UML para ALMA Common Software.
- Migración del foro Sitscape al servidor y customización de DocuShare para Gemini Sur.
- Refactorización del generador de código de control para el ALMA Common Software.
- Evaluación del nivel de madurez del área de desarrollo de ALMA Common Software.
- Desarrollo de un servicio de registro para ALMA Common Software basado en el Servicio de Distribución de Datos (DDS).
- Diseño e implementación de un algoritmo de programación para los arreglos de ALMA
- Desarrollo de manual de montaje de antenas y sus transportadores en base a un modelo a escala.
- Desarrollo de una herramienta para clasificar un conjunto de archivos en formato FITS. (Flexible Image Transport System) basada en el algoritmo NEAT (Neuro Evolution of Augmented Topologies).
- Generación de código de máquinas de estado desde un modelo gráfico simple para el desarrollo rápido de aplicaciones funcionales de ALMA.

Grupo de Astro Meteorología, Universidad de Valparaíso

Algunos de los proyectos desarrollados por este grupo son:

- Modelo de predicción de vapor de agua precipitable (PVW).
- Modelo de predicción de la visibilidad astronómica.
- Modelo de predicción de turbulencia óptica.
- Análisis de condiciones meteorológicas del Cerro Macón con modelo a mesoescala MM5.
- Desarrollo de modelo meteorológico a mesoescala basado en WRF para Paranal.
- Diseño e implementación de sistema de pronóstico meteorológico para Gemini Sur.
- Estudio de validación de modelos meteorológicos GFS y MM5 para Paranal, Macón y Pachón.
- Estudio de validación de modelo de predicción de vapor de agua (PWV) para ALMA.
- Estudio de validación de perfiles verticales de modelos meteorológicos GFS, ECMWF y WRF.
- Estudio de validación de predicción de modelo meteorológico WRF para APEX.

Unidad de Astronomía, Universidad de Antofagasta

Algunos de los proyectos relevantes desarrollados por esta unidad son:

- Diseño y fabricación de un fotodetector de ondas portadoras viajeras para ondas viajeras THz para uso en instrumentación radioastronómica.
- Fotometría desenfocada (precisión es 1-2 órdenes de magnitud mayor que fotometría tradicional para targets brillantes aislados).
- Sistema de reducción automática de grandes volúmenes de datos.
- Diseño e implementación de un observatorio automático usando fotometría fuera de foco.
- Automatización y control de observatorios.
- Desarrollo de componentes para espectrógrafo APOGEES.

Laboratorio de fotónica, Universidad de Chile

Algunos de los proyectos desarrollados por este laboratorio son:

- Diseño y fabricación de un fotodetector de ondas portadoras viajeras para ondas viajeras THz para uso en instrumentación radioastronómica.
- Uniones túneles de onda metal-aislante-metal (TW-MIM) para generación THz.
- Estudios en fotodiodos de muy alta frecuencia usando el paquete de simulación Synopsys TCAD.
- Generación de THz por pulsos sintonizables con cristales orgánicos.
- Generación de peine óptico para bloqueo de frecuencia ajustable de hasta varios THz para dos láseres infrarrojos cercanos.
- Receptor de dos bandas laterales basado en la generación fotónica de señales del oscilador local.

Anexo IV: Organizaciones integrantes de consorcios astronómicos¹⁰⁷

ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

Promotores:

- National Radio Astronomy Observatory, USA
- European Southern Observatory, Alemania

Integrantes:

- European Southern Observatory,
- National Science Foundation, USA
- National Research Council, Canadá
- National Institutes of Natural Sciences, Japón
- National Science Council, Taiwan
- Academia Sinica, Taiwan.

Gemini South

Promotor: National Optical Astronomy Observatory, USA

Integrantes:

- National Research Council, Canadá
- Australian Astronomic Observatory, Australia
- Ministerio de Ciencia y Tecnología, Argentina
- Ministério da Ciência, Tecnologia, e Inovação, Brasil
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Chile
- Universidad de Hawaii, USA

GMT: Giant Magellan Telescope

Promotor: Giant Magellan Telescope Consortium, USA

Integrantes:

- National Research Council, Canadá
- Australian Astronomic Observatory, Australia
- Astronomy Australia, Australia
- The Australian National University, Australia
- Carnegie Institution for Science, USA
- Harvard University, USA
- Korea Astronomy and Space Science Institute, Korea
- Smithsonian Institution, USA
- University of Texas at Austin, USA
- Texas A&M University, USA
- University of Arizona, USA
- University of Chicago, USA

¹⁰⁷ Cameron Partners. Estudio de nuevos negocios y spin-offs a partir de la astroingeniería. Santiago, Chile (2013).

Anexo V: Aporte de los integrantes de ALMA¹⁰⁸

ESO

- 25 antenas de 12 metros de diámetro.
- Transportadores de antenas de ALMA.
- Radiómetros de vapor de agua para las antenas
- Carretera desde la entrada principal de ALMA al Centro de Apoyo a las Operaciones (OSF).
- Edificio técnico del OSF.
- Suministro eléctrico permanente vía turbinas generadoras.
- Residencia de ALMA con dormitorios para sus trabajadores.
- Receptores para la Banda 7 y 9.
- Suministro eléctrico, criostatos e integración de los Front End.
- Componentes de Back End y sistema de transmisión óptico-digital.
- Tarjetas de bancos de filtros sintonizables para el correlacionador de 64 antenas.
- Plataformas e interfaces de las antenas en el Sitio de Operaciones (AOS).
- Software e Ingeniería de sistemas.
- Soporte para usuarios europeos de ALMA a través del Centro Regional Europeo.

América del Norte

- 25 antenas de 12 metros de diámetro.
- Edificio Técnico del AOS.
- Caminos al AOS.
- Distribución eléctrica y redes de fibra óptica del AOS.
- Telescopio óptico de pruebas (pointing).
- Conmutadores usados para efectuar cambios rápidos entre la fuente observada y el cielo.
- Vehículos de apoyo y manipulación de los Front End.
- Receptores para la Banda 3 y 6.
- Montaje local de osciladores y otros componentes para todos los receptores de bandas.
- Componentes e integración de los Front End.
- Oscilador y otros componentes de los Back End.
- Correlacionador para 64 antenas.
- Software e Ingeniería de sistemas.
- Soporte para usuarios norteamericanos y chilenos de ALMA a través del Centro Regional Norteamericano de ALMA.

¹⁰⁸ <http://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/cooperacion-global/>

Asia del Este

- Cuatro antenas de 12 metros y doce antenas de 7 metros de diámetro para el ACA.
- Interfaces de las plataformas de las antenas del ACA.
- Integración del Front End.
- Receptores para la Banda 4, 8 y 10.
- Componentes del Back End del ACA, incluyendo los osciladores y el sistema de transmisión óptico-digital.
- Correlacionador del ACA.
- Software e Ingeniería de sistemas.
- Apoyo a los usuarios de Asia del Este a través del Centro Regional Asiático de ALMA (ARC).

Anexo VI: Ejemplo instituciones participantes en desarrollo de instrumentos astronómicos

GRAVITY¹⁰⁹

Es un instrumento de segunda generación, a ser incorporado en el Very Large Telescope Interferometer (VLTI), y que representa un gran avance en la interferometría. Es un dispositivo que combina cuatro rayos del VLTI y permite observar detalles muy pequeños de objetos débiles como los centros de galaxias, lo que permitirá conocer un mundo completamente nuevo de planetas, estrellas y centros de galaxias que antes estaban fuera del alcance porque eran demasiado débiles para los instrumentos anteriores. Su modo de operación principal hace uso de los cuatro telescopios de 8 m para medir distancias entre objetos localizados dentro del campo de visión de 2 " del VLTI. Este instrumento permitirá medir los movimientos orbitales dentro del centro galáctico con una precisión sin precedentes.

Gravity fue construido por un consorcio formado por las siguientes instituciones:

- Max-Planck-Institut für Exterterrestrische Physik (Garching)
- LESIA, Observatoire de Paris, Section de Meudon
- Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire de Grenoble
- Max-Planck-Institut für Astronomie (Heidelberg)
- Physikalisches Institut, Universität zu Köln
- SIM, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

SPHERE¹¹⁰

Una de las áreas más desafiantes y emocionantes de la astronomía es la búsqueda de exoplanetas, para ayudar en esta tarea, se diseñó y construyó un instrumento que luego de años de estudios y construcción, se encuentra instalado en el telescopio 3 de VLT. SPHERE es un instrumento que tiene por objetivo detectar y estudiar nuevos exoplanetas gigantes orbitando estrellas cercanas, capturando imágenes de los exoplanetas directamente como si estuviera tomando su fotografía. Sphere fue construido por un consorcio formado por las siguientes instituciones:

- Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
- Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg
- Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
- Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique de l'Observatoire de Paris
- Laboratoire Lagrange in Nice
- ONERA; Observatoire de Genève
- Italian National Institute for Astrophysics coordinated by the Osservatorio Astronomico di Padova
- Institute for Astronomy, ETH Zurich
- Astronomical Institute of the University of Amsterdam
- Netherlands Research School for Astronomy (NOVA-ASTRON)
- ESO.

¹⁰⁹ <http://www.eso.org/sci/facilities/develop/instruments/gravity.html>

¹¹⁰ <http://www.eso.org/public/chile/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/sphere/>

Anexo VII: Observatorios turísticos

Observatorio Astronómico de O'Higgins

El proyecto del Observatorio Astronómico de O'Higgins desarrollado por la Municipalidad de Graneros busca abrir nuevos horizontes a los jóvenes de la comuna por medio del conocimiento de la ciencia. La idea incluye la construcción de un observatorio con salas multiusos y un mirador. Este proyecto, que, si bien desde la perspectiva astronómica usará telescopios de los años 70, requiere ingeniería de construcción, impacta lo educativo y también promueve el turismo de la Región, diversificando la matriz de desarrollo de la zona.

Observatorio Mamalluca

El Observatorio Mamalluca, ubicado al noroeste de Vicuña, desarrollado por la Municipalidad de Vicuña en conjunto con el Club de Aficionados a la Astronomía (CASMIA) y con el patrocinio del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, funciona desde el año 1998 promoviendo el turismo de la zona. En su primera etapa cuenta con un telescopio de 12 pulgadas donado por AURA con detectores CCD para fotografía electrónica, además de un equipo de computación para la transferencia de datos. En su segunda etapa es posible ver una sala de exhibición multimedia en la que se realizan charlas explicativas con imágenes, además de funcionar la administración, un casino y una sala de ventas de recuerdos del observatorio.

Conicyt Observatorio ALMA

En los terrenos de Conicyt, junto al observatorio ALMA, se creó una plataforma para monitorear el cambio climático que está a cargo de investigadores del Departamento de Física de la Universidad de Santiago. Esta estación está equipada con tecnología radiométrica y fotométrica de última generación y estudiará los efectos del polvo y los efectos de la radiación UV. Se ha señalado que la operación de esta estación permitirá la formación de capital humano avanzado, en áreas como radiometría y fotometría, muy intensivas en el uso de tecnología.

Observatorio de Yepun

El observatorio turístico de Yepun, localizado en el sur del país, en la ribera del Lago Lanalhue, una zona no asociada con la presencia de observación espacial, pero que, sin embargo, nace de la idea de desarrollar el turismo, donde se recoge el relato, tradición, ciencia y cultura de la visión del cielo, desde esta parte del planeta.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

San Martín N° 352 Santiago de Chile
Teléfonos (56-2) 26968647 – 26984028 – 26726997
iing@iing.cl
www.iing.cl

CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois
Jaime Allende Urrutia
Elías Arze Cyr
Marcial Baeza Setz
Juan Carlos Barros Monge
Bruno Behn Theune
Sergio Bitar Chacra
Mateo Budinich Diez
Juan Enrique Castro Cannobbio
Jorge Cauas Lama
Joaquín Cordua Sommer
Luis Court Mook
Alex Chechilnitzky Zwicky
Raúl Espinosa Wellmann
Alvaro Fischer Abeliuk
Roberto Fuenzalida González
Tristán Gálvez Escuti
Alejandro Gómez Arenal
Tomás Guendelman Bedrack
Diego Hernández Cabrera
Jaime Illanes Piedrabuena
Agustín León Tapia
Sergio Lorenzini Correa
Jorge López Bain
Jorge Mardones Acevedo
Carlos Mercado Herreros
Germán Millán Pérez
Guillermo Noguera Larraín
Luis Pinilla Bañados
Mauricio Sarrazin Arellano
Raúl Uribe Sawada
Luis Valenzuela Palomo
Solano Vega Vischi
Hans Weber Münnich
Andrés Weintraub Pohorille
Jorge Yutronic Fernández

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

EMPRESAS SOCIAS

AGUAS ANDINAS S.A.
AGUAS NUEVAS S.A.
ALSTOM CHILE S.A.
ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.
ANTOFAGASTA MINERALS S.A.
ARCADIS CHILE S.A.
ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO
BESALCO S.A.
CIA. GENERAL DE ELECTRICIDAD S.A.
CIA. DE PETROLEOS DE CHILE COPEC S.A.
COLBÚN S.A.
CRUZ Y DÁVILA INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.
EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.
EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.
EMPRESAS CMPC S.A.
ENAEX S.A.
ENEL GENERACIÓN CHILE S.A.
FLUOR CHILE S.A.
INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.
JAIME ILLANES Y ASOCIADOS CONSULTORES S.A.
METROGAS S.A.
MINERA ESCONDIDA LTDA.
MINERA LUMINA COPPER CHILE S.A.
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A.
SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

IEC INGENIERÍA S.A.
JRI INGENIERÍA S.A.
SYNEX INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES SpA.