



HOJA DE RUTA PARA EL FUTURO DESARROLLO DE ALMA

Autores: J. Carpenter, D. Iono, L. Testi, N. Whyborn, A. Wootten, N. Evans
(Grupo de Trabajo para el Desarrollo de ALMA)

Aprobado por el Directorio de ALMA por escrito de conformidad con el Art. 11 de las Normas de
Procedimiento del Directorio de ALMA

ANTECEDENTES

ALMA está cerca de alcanzar las capacidades previstas originalmente, y en esencia, durante los primeros cinco años de operación, se han cumplido los objetivos científicos fundamentales planteados originalmente para ALMA. Por consiguiente, el Directorio de ALMA constituyó un grupo de trabajo encargado de desarrollar una visión estratégica y fijar prioridades para las nuevas capacidades de ALMA de aquí a 2030, en el marco del Programa de Desarrollo de ALMA. La Hoja de ruta para el futuro desarrollo de ALMA emanado de ese trabajo fue aprobado por el Directorio de ALMA en noviembre de 2017. El siguiente documento es un resumen aprobado por el mismo directorio de dicho documento. En junio de 2018 el directorio autorizó su divulgación pública.

De acuerdo con la visión detallada en la hoja de ruta aprobada por el directorio, las prioridades de desarrollo actuales, según su mérito científico y viabilidad técnica, son las siguientes:

- ampliar el ancho de banda de IF del receptor al menos en un factor dos, y
- implementar las mejoras necesarias para los componentes electrónicos y el correlacionador.

Estas mejoras contribuirán a llevar a cabo un gran número de estudios científicos al reducir considerablemente el tiempo de realización de exploraciones de desplazamiento al rojo, barridos espectrales y mapeos del continuo profundo. Por orden de prioridad científica, se recomienda mejorar la capacidad de los receptores para las frecuencias intermedias (200-425 GHz), bajas (< 200 GHz) y altas (> 425 GHz).

El Directorio reconoce la posibilidad de desarrollar otras áreas en el futuro, previa demostración de su mérito científico y de su viabilidad técnica.



Sean M. Dougherty
Director de ALMA



Toshikazu Onishi
Presidente del Directorio de ALMA

28 de junio de 2018

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente documento se detalla una hoja de ruta para incorporar mejoras que aumentarán considerablemente las capacidades de ALMA y contribuirán a lograr hallazgos científicos aún más fascinantes en las próximas décadas. Las mejoras propuestas están motivadas por los reveladores hallazgos realizados por ALMA durante sus primeros cinco años de funcionamiento. Proponemos una visión con nuevos y ampliados objetivos científicos que rebasan las metas científicas originalmente fijadas para ALMA, pues en esencia estas metas se han cumplido en los primeros cinco años de operación. El plan detallado en el presente documento se basa en datos sobre nuevas orientaciones científicas y viabilidad técnica emanados del Comité de Asesoría Científica de ALMA (ASAC, por su sigla en inglés), de la comunidad y de documentos técnicos.

El Grupo de Trabajo recomienda fijar como primera prioridad, según su mérito científico y viabilidad técnica, el incremento del ancho de banda de frecuencias intermedias (IF) del receptor al menos en un factor dos y la implementación de las mejoras necesarias para los componentes electrónicos y el correlacionador. Estas mejoras contribuirán a llevar a cabo un gran número de estudios científicos al reducir considerablemente el tiempo de realización de exploraciones de desplazamiento al rojo, escaneos espectrales químicos y barridos de continuo profundo. Por orden de prioridad científica, se recomienda mejorar la capacidad de los receptores para las frecuencias intermedias (200-425 GHz), bajas (< 200 GHz) y altas (> 425 GHz).

El Grupo de Trabajo recomienda dar inicio a la modernización del receptor y de las demás tareas afines tan pronto como sea posible en términos económicos y técnicos. En un primer momento, se deberá conformar un equipo técnico y científico para definir oficialmente los requerimientos técnicos para la implementación de esta hoja de ruta. A continuación, se deberá conformar un equipo de ingenieros de sistemas encargados de desglosar dichos requerimientos y asignarlos a los diferentes subsistemas con el fin de componer un conjunto coherente de requerimientos mínimos que cada proyecto de desarrollo futuro deberá cumplir. Puesto que la modernización de los procesos afectará a muchos subsistemas de ALMA, el Grupo de Trabajo recomienda constituir un grupo en ALMA para que coordine y supervise estos proyectos.

El Grupo de Trabajo también recomienda contar con un equipo encargado de definir prioridades a largo plazo para las capacidades del archivo de ALMA. El objetivo principal será identificar las funcionalidades necesarias para que la comunidad aproveche el archivo de ALMA de manera eficiente, sobre todo considerando el incremento del ancho de banda del receptor previsto en las mejoras recomendadas.

El Grupo de Trabajo también apoya la prospección de los siguientes aspectos, que podrían tener un gran impacto en el trabajo científico de ALMA, pero cuyo mérito científico y viabilidad técnica quedan aún por demostrar mediante ulteriores análisis.

- Al aumentar la línea de base máxima en 2 o 3 veces se propiciaría la fascinante posibilidad de obtener imágenes de la zona de formación terrestre de los planetas en los discos protoplanetarios. Recomendamos la realización de estudios que empiecen a cuantificar los fundamentos científicos e investigar los requerimientos técnicos y problemas logísticos relacionados con líneas de base más largas.
- La utilización de conjuntos de plano focal podría incrementar considerablemente la velocidad de mapeo de campo amplio de ALMA. Recomendamos la realización de estudios para identificar casos de aplicación científica pertinentes que también sirvan para determinar los requisitos técnicos (como bandas receptoras preferibles, números de píxeles y ancho de banda).
- Aumentar el número de antenas de 12 metros beneficiaría a todos los programas científicos al mejorar la sensibilidad del conjunto y la fidelidad de las imágenes. Recomendamos la realización de estudios que detallen casos de uso específicos que justifiquen la adición de nuevas antenas.
- El uso de un telescopio submilimétrico de una sola antena de al menos 25 metros de diámetro permitiría obtener imágenes profundas del cielo en múltiples longitudes de onda y lograr numerosas sinergias científicas con ALMA. Sin embargo, nos parece que el modo de operación de un gran telescopio de una sola antena rebasa la misión actual de ALMA, y correspondería a los socios de ALMA redefinir la misión del proyecto en caso de que se quisiera considerar la inclusión de un telescopio de este tipo en su plan de desarrollo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
2. PROCESO	10
3. NUEVOS OBJETIVOS CIENTÍFICOS FUNDAMENTALES	12
4. MODERNIZACIÓN DE LOS RECEPTORES, EL SISTEMA DIGITAL Y EL CORRELACIONADOR	14
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RECEPTORES ACTUALES DE ALMA Y POSIBLES MEJORAS	15
4.2. PRIORIDADES PARA LA MODERNIZACIÓN DE LOS RECEPTORES	18
5. DESARROLLO DEL ARCHIVO	20
6. OPORTUNIDADES A MEDIANO PLAZO	21
6.1. AMPLIACIÓN DE LÍNEAS DE BASE	21
6.2. CONJUNTOS DE PLANO FOCAL	22
6.3. ANTENAS DE 12 M ADICIONALES	23
6.4. GRAN TELESCOPIO SUBMILIMÉTRICO DE UNA SOLA ANTENA	23
7. CONCLUSIONES	25
REFERENCIAS	26



1. INTRODUCCIÓN

El Programa de Desarrollo de ALMA fomenta el desarrollo y modernización permanente del hardware, el software y las herramientas de análisis del observatorio. Hasta ahora, los fondos del programa se han usado principalmente para completar el conjunto de receptores de banda previsto en el Proyecto de Construcción de ALMA [1]. Dado que este proceso está cerca de completarse, cabe definir una nueva estrategia de desarrollo a largo plazo para el próximo decenio y los años subsiguientes con el fin de guiar la evolución de las capacidades técnicas y científicas de ALMA.

En un primer momento, el Comité de Asesoría Científica de ALMA (ASAC, por su sigla en inglés) evaluó posibles escenarios de evolución técnica para ALMA de aquí a 2030. Tal como se detalla en una compilación de estudios conocida como “Informe ALMA 2030”, que se presentó al Directorio de ALMA en marzo de 2015, el ASAC recomendó, sin proponer un orden de prioridades, cuatro escenarios de desarrollo con potencial científico a largo plazo [2]:

1. Mejoras al archivo de ALMA para incrementar su usabilidad y los beneficios para el observatorio;
2. Mayores anchos de banda y receptores con mejor sensibilidad para mejorar la velocidad de las observaciones;
3. Líneas de base más largas para mejorar las observaciones en términos cualitativos;
4. Aumento de la velocidad de mapeo de campo amplio para realizar mapeos eficientes.

Con el fin de revisar y asignar prioridades a las recomendaciones formuladas en el informe ALMA 2030, el Directorio encargó al director de ALMA constituir un Grupo de Trabajo de Desarrollo (en adelante, “el Grupo de Trabajo”) en noviembre de 2015. En un principio, el Grupo de Trabajo estuvo integrado por el director de ALMA, quien lo encabezaba, el Ingeniero en jefe de sistemas de JAO, el científico jefe de JAO, un representante del Directorio de ALMA y los tres científicos jefes regionales del programa ALMA. En abril de 2017, el Directorio de ALMA designó un director interino, quien delegó en el científico jefe de JAO la dirección del Grupo de Trabajo.

El Grupo de Trabajo se atribuyó dos tareas:

- En nombre de la comunidad, deberá proponer una visión de evolución científica para ALMA a mediano plazo (5 años) y largo plazo (5 a 15 años).
- Deberá definir prioridades para el plan resultante y mantenerlo dentro del presupuesto de desarrollo previsto.

En marzo de 2017, el Consejo Asesor del director de ALMA instó al Grupo de Trabajo a considerar también proyectos más ambiciosos, fundados en el interés científico, aunque requirieran recursos que superaran el presupuesto de desarrollo establecido.

El presente documento recoge los hallazgos y recomendaciones del Grupo de Trabajo para la evolución de ALMA. Además del potencial

científico, las recomendaciones toman en cuenta la viabilidad y el nivel de preparación técnica, el impacto operacional, los desafíos organizacionales y los costos previstos. El presente documento está dividido en 6 apartados. En el apartado n.º 2 se describe el proceso adoptado para revisar, seleccionar y priorizar de los proyectos y recomendaciones detallados en el informe ALMA 2030 y considerar otros proyectos posibles. En el apartado n.º 3 se presentan los nuevos objetivos científicos que dan sustento al desarrollo propuesto. En el apartado n.º 4 se resume el proceso de desarrollo para la modernización de los receptores, el correlacionador y el sistema digital de ALMA, proyecto que constituye la prioridad máxima recomendada por el Grupo de Trabajo. En el apartado n.º 5 se resume la recomendación del Grupo de Trabajo para mejorar el archivo de ALMA. En el apartado n.º 6 se describen otras propuestas de desarrollo que podrían traer beneficios científicos a largo plazo para el observatorio, pero cuyo mérito científico y viabilidad técnica quedan por demostrar mediante análisis ulteriores.

2. PROCESO

El Grupo de Trabajo recogió consideraciones emanadas del ASAC, la comunidad e informes técnicos sobre la orientación científica y la viabilidad técnica de los emprendimientos futuros.

El ASAC resumió los aspectos científicos y la orientación general para los próximos decenios en el informe ALMA 2030, compuesto por cuatro documentos: *Recomendaciones del ASAC para ALMA 2030* [2], *Vías de Desarrollo para ALMA* [3], *Principales Temas Científicos en la década 2020-2030* [4] y *Principales Instalaciones para 2030* [5]. A continuación, el ASAC proporcionó pautas científicas adicionales al determinar qué receptores de banda deberían modernizarse de acuerdo con el impacto científico esperado. El ASAC también aportó datos sobre la utilidad de aumentar las líneas de base y sobre nuevos objetivos científicos de gran importancia.

El Grupo de Trabajo recogió las recomendaciones de las comunidades regionales y los equipos de desarrollo sobre la viabilidad técnica y el nivel de preparación necesario para distintos proyectos planteados. El Programa de Desarrollo de ALMA, en particular, ha financiado estudios y proyectos en los que se han sopesado posibles iniciativas de modernización para los receptores, los correlacionadores, las líneas de base y el archivo, tomando en cuenta las recomendaciones formuladas en el informe ALMA 2030. En la Tabla 1 se enumeran los estudios pertinentes que se han llevado a cabo o que están en curso.

Por otro lado, en el verano de 2016 los Ejecutivos de ALMA celebraron talleres regionales de desarrollo a los que acudieron uno o más miembros del Grupo de Trabajo. En estos talleres se repasaron los estudios y proyectos en curso en cada región y los escenarios de desarrollo a largo plazo. En la Tabla 2 se proporciona una lista de los talleres celebrados y enlaces a las respectivas presentaciones.

El Grupo de Trabajo presentó un resumen de los escenarios de desarrollo a corto, mediano y largo plazo durante una sesión especial de la conferencia *Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed* [‘Media década de ALMA: albores cósmicos transformados’], celebrada en Indian Wells (California, EE. UU.) en septiembre de 2016. La presentación incluyó una sesión de preguntas de 30 minutos para recabar las impresiones de la comunidad sobre el futuro de ALMA.

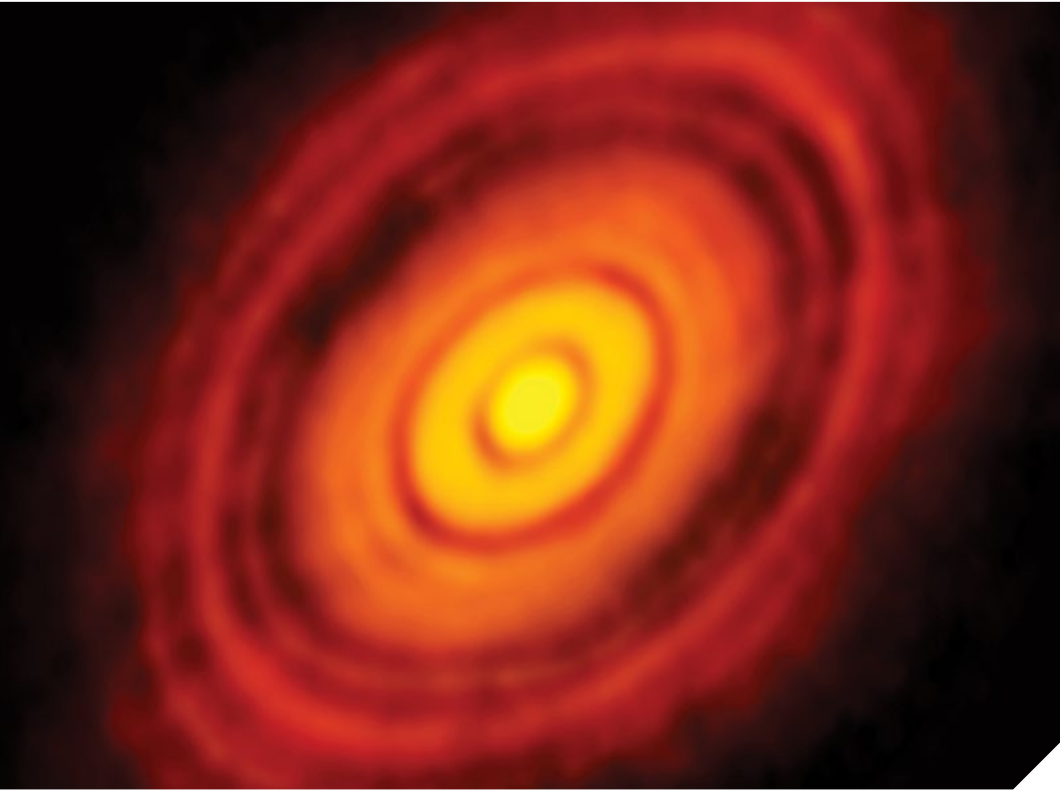
El Grupo de Trabajo fue más allá de las recomendaciones para ALMA 2030 y consideró, además, la posibilidad de agregar nuevas antenas de 12 metros al conjunto actual y de construir un gran telescopio submilimétrico de una sola antena. Si bien se comentan en el informe ALMA 2030, estos escenarios no se incluyeron en las recomendaciones para ALMA 2030 [2] ni se comentaron en la presentación hecha en Indian Wells.

TABLA 1: ESTUDIOS SOBRE ALMA PERTINENTES PARA LAS RECOMENDACIONES PARA ALMA 2030

Autores	Fecha	Informe
Receptores		
Henke et al. [6]	Marzo de 2015	Concept Study of a Millimeter Camera for ALMA
Withington et al.	Abril de 2015	Supra-THz interferometry with ALMA
Kerr et al. [7]	Marzo de 2016	Towards a Second Generation SIS Receiver for ALMA Band 6
Kerr et al. [8]	Marzo de 2016	Towards a Second Generation SIS Receiver for ALMA Band 10
Hesper et al.	Septiembre de 2016	Overview of current ALMA Band 9 2SB mixer results
Cyberey & Lichtenberger [9]	Marzo de 2017	Advanced Materials and On-wafer Chip Evaluation: 2nd Generation
Kojima et al. [10]	Octubre de 2017	Performance and Characterization of a Wide IF SIS-Mixer-Preamplifier Module Employing High-Jc SIS Junctions
Henke, Niranjana, & Knee	En curso	Prototype of a Complete Dual-Linear 2SB Block and a Single-Polarization Balanced 2SB Block
Kerr et al.	En curso	Development of 2 nd Generation SIS Receivers for ALMA
Mroczkowski & Yagoubov	En curso	The Case for a Combined Band 2+3 Receiver
Ampliación de líneas de base		
Kameno et al. [11]	Octubre de 2013	ALMA Extended Array
Digitalizadores		
Quertier et al.	Diciembre de 2017	Digitizer upgrade
Correlacionador		
Escoffier et al. [12]	Marzo de 2015	Enhancing the Spectral Performance of the 64-antenna ALMA Correlator
Escoffier et al. [13]	Mayo de 2015	Doubling the Bandwidth of the 64-Antenna ALMA Correlator
Lacasse et al. [14]	Enero de 2017	Spectral Resolution and Bandwidth Upgrade of the ALMA Correlator
Baudry et al. [15]	Julio de 2017	Digital Correlation and Phased Array Architectures for Upgrading ALMA

TABLA 2: PARTICIPACIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO EN TALLERES Y CONFERENCIAS DE ALMA

Taller/conferencia	Fechas	Sitio web
Taller de desarrollo europeo	25-27 de mayo de 2016	Enlace
Taller de desarrollo de Asia del Este	20-21 de julio de 2016	Enlace
Taller de desarrollo europeo de la NRAO	23-25 de agosto de 2016	Enlace
Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawn Transformed	20-23 de septiembre de 2016	Enlace



3. NUEVOS OBJETIVOS CIENTÍFICOS FUNDAMENTALES

Durante los primeros cinco años de operación de ALMA se alcanzaron los tres grandes objetivos del proyecto.

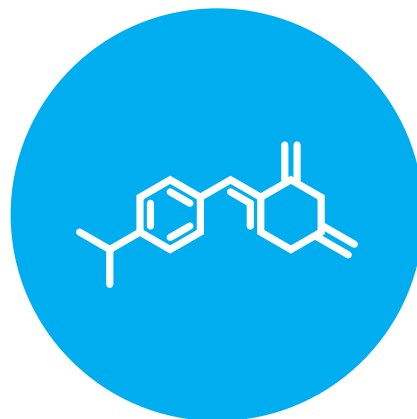
- La capacidad de detectar emisiones de línea espectral de CO o C⁺ en una galaxia normal como la Vía Láctea a un desplazamiento al rojo de $z = 3$ en menos de 24 horas de observación;
- La capacidad de obtener imágenes de los movimientos del gas en un disco protoplanetario con masa solar a una distancia de 150 pc. Esto permitió estudiar la estructura física y química del disco y su campo magnético, así como detectar surcos creados por planetas en proceso de formación;
- La capacidad de generar imágenes de alta precisión a una resolución angular de 0,1".

El Grupo de Trabajo propone que ALMA adopte los siguientes objetivos científicos fundamentales para el próximo decenio:



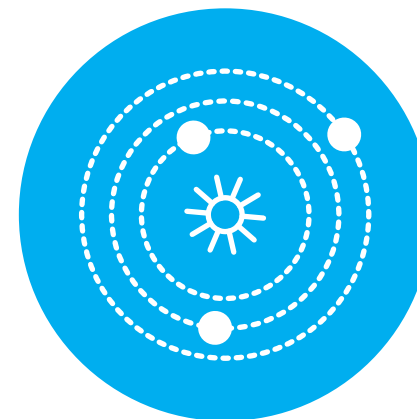
ORÍGENES DE LAS GALAXIAS

Estudiar la evolución cósmica de elementos clave desde las primeras galaxias ($z > 10$) hasta el período de mayor actividad de formación estelar ($z = 2-4$) mediante la detección de sus líneas de enfriamiento, tanto atómicas ([CII], [OIII]) como moleculares (CO), y el continuo de polvo, a una tasa de 1-2 galaxias por hora.



ORÍGENES DE LA COMPLEJIDAD QUÍMICA

Estudiar la evolución de las moléculas simples a moléculas orgánicas complejas durante el proceso de formación estelar y planetaria hasta la composición de sistemas solares ($\sim 10-100$ UA) mediante la realización de escaneos de bandas completas a razón de 2-4 protoestrellas por día.



ORÍGENES DE LOS PLANETAS

Obtener imágenes de discos protoplanetarios en regiones cercanas (150 pc) de formación estelar para resolver la zona de formación terrestre (~ 1 UA) en el continuo de polvo en longitudes de onda inferiores a 1 mm y así detectar los surcos y agujeros internos producidos por planetas en formación.

Incluso con las extraordinarias capacidades del conjunto actual de ALMA es imposible alcanzar estas ambiciosas metas. Para ello, es necesario emprender las mejoras detalladas en este documento, mejoras que harían de ALMA una herramienta aún más poderosa y lo mantendrían a la vanguardia de la astronomía al permitirle seguir realizando hallazgos científicos revolucionarios y contribuyendo a incrementar nuestra comprensión del Universo durante varios decenios más.



4. MODERNIZACIÓN DE LOS RECEPTORES, EL SISTEMA DIGITAL Y EL CORRELACIONADOR

El Grupo de Trabajo recomienda, como prioridad máxima para el desarrollo de ALMA, la ampliación del ancho de banda de los receptores y la modernización del sistema digital y el correlacionador. El procesador y correlacionador de señal digital de ALMA actualmente puede procesar 16 GHz de ancho de banda¹ (8 GHz por polarización). Sin embargo, la cobertura instantánea de 8 GHz por polarización abarca apenas una pequeña fracción de las ventanas atmosféricas. Por consiguiente, con el sistema actual, las búsquedas de desplazamiento al rojo y barridos astroquímicos requieren múltiples configuraciones para abarcar un rango apreciable de desplazamientos al rojo u obtener un inventario químico amplio. Con el fin de alcanzar las nuevas metas científicas (véase el apartado n.º 3), se necesita al menos duplicar dicha capacidad para reducir al menos en un factor 2 el tiempo de las exploraciones de desplazamiento al rojo y de los barridos espectrales químicos y al menos en un factor 8 a 16 los escaneos de alta resolución espectral. Esto aumentaría la capacidad para observar transiciones moleculares críticas de forma simultánea y mejoraría la sensibilidad de

¹ Las bandas 9 y 10 son receptores DSB, y se puede separar las señales laterales más bajas y más altas mediante una conmutación de fase de 90°.

observación de continuo para producir imágenes de discos con una alta resolución espacial.

Se pueden lograr mejoras considerables en la velocidad de observación incrementando la capacidad i) de los receptores para que abarquen anchos de banda de IF más amplios, ii) de los digitalizadores y del procesamiento digital para abarcar una mayor banda base y lograr una mayor cobertura de ancho de banda y iii) del correlacionador para procesar anchos de banda más amplios a una mayor resolución espectral. Los beneficios potenciales son considerables:

- La velocidad a la que se puede obtener la imagen de una región espectral es proporcional al ancho de banda (B) y a la temperatura del sistema (T_{sys}) como B/T_{sys}^2 . Por consiguiente, al duplicar el ancho de banda se duplica la velocidad de los mapeos de línea espectral y las observaciones de continuo, considerando una pérdida nula de sensibilidad.
- La señal de IF analógica se divide en dos bandas base de 2 GHz, con una cobertura efectiva de ancho de banda de aproximadamente un 94 % dentro de ese rango de frecuencias. Al reducir o eliminar la brecha de cobertura, se lograrían escaneos espectrales de banda ancha más completos o eficientes.
- Las fuentes de línea estrecha requieren una alta resolución espectral, que actualmente solo puede lograrse reduciendo el ancho de banda procesado por el correlacionador en un factor dos o más. Por ejemplo, los escaneos espectrales de banda 7 a una resolución espectral de 0,25 km/s —la resolución que suele usarse para la observación de discos y planetas en formación—

requiere configuraciones individuales de ~20-30 con ventanas amplias de 0,47 GHz, es decir, inferiores a la banda base completa en un factor 4. De esa forma, al procesar la totalidad del ancho de banda de IF a una alta resolución espectral se podría incrementar la eficiencia de los escaneos espectrales en múltiples factores.

En el apartado 4.1 se describe el rendimiento actual y posibles mejoras a los receptores de ALMA. En el apartado 4.2 se propone una lista de prioridades para las mejoras a los receptores.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RECEPTORES ACTUALES DE ALMA Y POSIBLES MEJORAS

En la Tabla 3 se detallan los anchos de banda de IF y tipos de receptores instalados actualmente en las antenas de ALMA, junto con los proyectos de desarrollo en curso (bandas 1 y 5) y futuros (banda 2). Las bandas de frecuencia intermedia (bandas 3 a 8) tienen 4-5 GHz de ancho de banda de IF con mezcladores de separación de bandas laterales. Las bandas de frecuencia más alta (bandas 9 y 10) son sistemas de banda lateral dobles, donde ambas bandas laterales se registran en forma simultánea, empezando, en el Ciclo 5, con la implementación de la conmutación de fase de 90°.

La figura 1 muestra la temperatura de los receptores actuales de ALMA. A baja frecuencia (bandas 3 a 7) las temperaturas de ruido de los receptores superan en algunas veces el límite cuántico y se acercan a los límites físicos. De esto se desprende que, para lograr mejoras significativas de rendimiento en las bandas de frecuencias

más bajas, se requiere principalmente aumentar el ancho de banda de IF, mientras que el rendimiento de las bandas de frecuencias más altas puede incrementarse mejorando la temperatura del receptor y/o el ancho de banda de IF.

Al diseñar receptores de IF amplia, cabe lograr un equilibrio entre los beneficios científicos de aumentar las frecuencias intermedias y el posible incremento del ruido en el receptor [16]. Esta fue una de las razones por las que se eligió originalmente el ancho de banda de IF de 4 GHz para los receptores de ALMA. Con la mejora de la tecnología, los receptores de ancho de banda de IF de 8 GHz ahora son una alternativa conveniente, y se han adoptado en otros observatorios. Por ejemplo, los receptores del NOEMA brindan 31 GHz de ancho de banda (7,7 GHz por polarización por banda lateral) en el equivalente de las bandas 3, 4 y 6 de ALMA [17]. El SMA también cuenta con receptores de 8 GHz de ancho de banda por banda lateral capaces de ofrecer 32 GHz de cobertura continua al usar dos receptores en forma simultánea. La tecnología actual incluso podría permitir alcanzar anchos de banda más amplios que podrían abarcar los rangos de frecuencia RF de ALMA usando menos bandas y proporcionando anchos de banda de IF mucho mayores [10]. El SMA también tiene planes para ampliar el IF a 16 GHz de ancho de banda por banda lateral [18].

Toda intervención que aumente el ancho de banda de IF debe acompañarse de un incremento en la cadena de transporte de señal para digitalizar la señal saliente del receptor y transportar los datos hasta el correlacionador, así como mejoras en el correlacionador para procesar el mayor ancho de banda y mejoras en el software y el sistema

de flujo de datos para procesar los datos resultantes. En el marco del Programa de Desarrollo de ALMA, ESO está financiando un estudio para diseñar y crear prototipos de componentes electrónicos de digitalización y filtrado ajustable que permitirían a ALMA ofrecer una banda de IF más amplia para la señal entrante del correlacionador [19]. Actualmente se está diseñando el sistema para un ancho de banda de 32 GHz, dividido en bandas base de 4 GHz, con una mayor cobertura efectiva de ancho de banda. Se está explorando la posibilidad de usar sistemas de digitalización con bits más elevados que el sistema actual de ALMA para mejorar la sensibilidad y aumentar la resistencia de los receptores a las variaciones de potencia de las frecuencias intermedias. Mediante mayores anchos de banda de RF también se podría abarcar dos bandas con un solo receptor [20]

TABLA 3: CARACTERÍSTICAS ACTUALES DE LOS RECEPTORES DE ALMA

Banda	IF (GHz)	Tipo
1 (en construcción)	4-12	SSB
2 (en desarrollo)	4-12	2SB
3	4-8	2SB
4	4-8	2SB
5 (Ciclo 5)	4-8	2SB
6	5-10	2SB
7	4-8	2SB
8	4-8	2SB
9	4-12	DSB
10	4-12	DSB

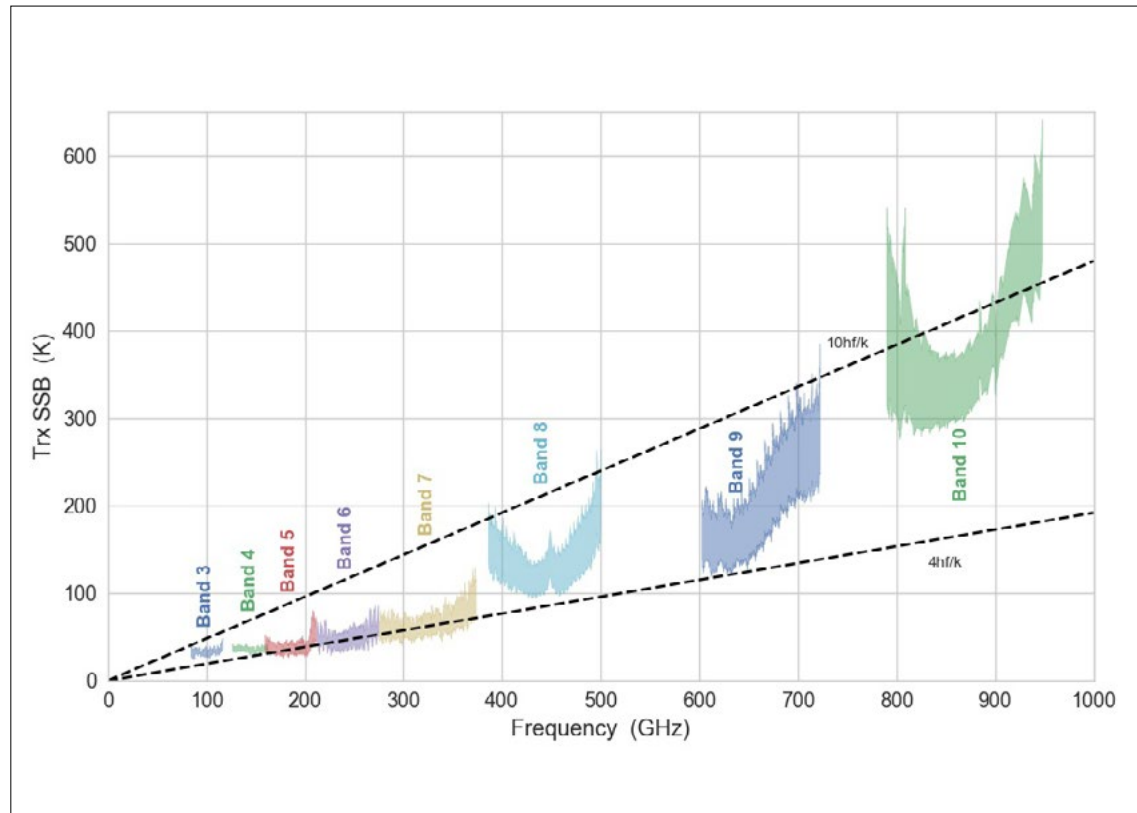


Figura 1: Temperatura del ruido de los receptores de ALMA. Las zonas coloreadas comprenden el 75 % alrededor de la temperatura mediana de los receptores. Las bandas 3 a 8 son receptores 2SB y las bandas 9 y 10 son DSB. La temperatura del ruido mostrada de los receptores DSB son el doble de la temperatura de los DSB. Banda 1, que se encuentra en construcción, tiene una especificación de receptores de < 25 K a través del 80 % de la banda.

4.2. PRIORIDADES PARA LA MODERNIZACIÓN DE LOS RECEPTORES

Los rangos de frecuencia de los receptores que se recomienda modernizar, por orden de importancia, son el intermedio (200-425 GHz), bajo (< 200 GHz) y alto (> 425 GHz). Se dio prioridad a estos rangos de frecuencia debido a que son los que más contribuirán para alcanzar los nuevos objetivos científicos descritos abajo (véase el apartado n.º 3). La lista de prioridades para la modernización de los receptores se funda en análisis científicos y técnicos realizados en 2017. Es posible que haya que volver a evaluar las prioridades a medida que evolucionen los conocimientos científicos y la tecnología. En particular, siempre serán bienvenidas las iniciativas de desarrollo tecnológico innovadoras y eficientes desde el punto de vista financiero.

Orígenes de las galaxias

- Las frecuencias intermedias y altas son ideales para los mapeos espectrales de líneas de estructura fina para estudiar las galaxias en la época de la reionización y las primeras etapas de evolución de las galaxias. Mediante frecuencias intermedias se puede observar [CII] (158 μm) a $z = 3,5-8,5$, [NII] (205 μm) a $z = 2,4-6,3$ y [NII] (121 μm) a $z = 4,8-11,3$. En las altas frecuencias se observan [OIII] (52 μm) a $z = 5,1-12,6$, [OIII] (88 μm) a $z = 2,6-7,0$ y [OI] (63 μm) a $z = 4,0-10,2$.
- Asimismo, en las altas frecuencias se observa [CII] entre $z = 1,0$ y $3,5$, que abarca el auge de formación estelar en el Universo.
- Con un receptor de 8 GHz de IF, se pueden cubrir las frecuencias

bajas de manera mucho más eficiente y, de esa forma, mejorar considerablemente la eficiencia de los mapeos espectrales de galaxias con alto desplazamiento al rojo para obtener un desplazamiento al rojo espectroscópico y caracterizar las propiedades físicas y químicas del gas. Estos rangos de frecuencia permitirían observar las galaxias prácticamente en todos los desplazamientos al rojo hasta $z = 10$ usando una serie de marcadores moleculares y atómicos.

Orígenes de la complejidad química

- Las frecuencias intermedias son fundamentales para la mayoría de los estudios astroquímicos porque contienen las líneas más brillantes de los marcadores de gas denso y de las moléculas orgánicas complejas, considerando la intensidad intrínseca de las líneas y las condiciones de excitación. Las frecuencias bajas, en tanto, son necesarias para las fuentes galácticas frías que revisten un interés astrobiológico (por ejemplo, los núcleos prestelares). Al duplicarse el ancho de banda y aumentar los canales espectrales, se incrementaría considerablemente la eficiencia de las observaciones espectrales de las regiones incubadoras de estrellas y los discos protoplanetarios, puesto que se reduciría el tiempo de observación necesario en un factor 8, suponiendo que pueda alcanzarse una resolución de $\sim 0,25$ km/s en todo el ancho de banda.
- Con un mayor ancho de banda, se podrían abarcar simultáneamente varias transiciones giratorias de CO, ^{13}CO y C^{18}O , claves para

delimitar las masas de gas desde los discos protoplanetarios hasta las galaxias.

Orígenes de los planetas

- Las frecuencias intermedias son las elegidas para la mayoría de los estudios de continuo, pues ofrecen una buena estabilidad de fase (que permite usar líneas de base extensas), un elevado brillo superficial intrínseco y una alta resolución espacial en comparación con las frecuencias más bajas. Al duplicarse el ancho de banda, se incrementaría la eficiencia de observación y el número de muestras de fuentes que se pueden autocalibrar y, por lo tanto, observar con líneas de base amplias.
- Las altas frecuencias proporcionan las escalas espaciales más pequeñas cuando se usan con las líneas de base de 16 km. Al mejorar la capacidad de esta banda se optimizarían las observaciones de los discos protoplanetarios a una resolución espacial de 1 UA en las regiones incubadoras de estrellas más cercanas, y quizás incluso de los protoplanetas en acreción. Asimismo, se permitiría la autocalibración de las fuentes más tenues con líneas de base más largas.
- Al combinarse con líneas de base más amplias (véase el apartado n.º 6.1), las frecuencias intermedias proporcionarían cerca de 1 UA de resolución espacial en los discos circumstelares cercanos.



5. DESARROLLO DEL ARCHIVO

El Grupo de Trabajo concuerda con el informe ALMA 2030 en cuanto a que el archivo científico de ALMA será la fuente primaria de un número creciente de publicaciones. De ahí que sea fundamental para la comunidad y para el futuro de ALMA facilitar un uso eficiente de los datos del archivo. Con la ampliación del ancho de banda de los receptores y las mejoras al correlacionador propuestas en el presente documento, no solo habrá que incrementar la capacidad del archivo, sino también mejorar su funcionamiento para permitir una explotación adecuada de su rico contenido de espectros.

El archivo actual comprende una funcionalidad básica de búsqueda y descarga de datos, y el Observatorio Virtual Japonés (JVO) ofrece una excelente funcionalidad de visualización de cubos de datos. Por otro lado, el Grupo de Trabajo sobre el Archivo de ALMA ideó un plan de desarrollo de 5 años que aportará nuevas funcionalidades para facilitar la extracción de datos. Si bien el costo de modernización del archivo probablemente sea muy inferior al de los proyectos propuestos para los receptores, el sistema digital y el correlacionador, se debe llevar a cabo una planificación cuidadosa para anticipar las necesidades de la comunidad.

El Grupo de Trabajo recomienda la constitución de un comité encargado de definir prioridades para las funcionalidades científicas que se requerirán del archivo de ALMA en el próximo decenio, poniendo particular atención en la extracción del espectro de datos generados por las mejoras que se realizarán en los receptores.

6. OPORTUNIDADES A MEDIANO PLAZO

En el informe ALMA 2030 se recomendó incrementar las líneas de base máximas para mejorar la resolución angular, y desarrollar conjuntos de plano focal para aumentar la velocidad de mapeo de campo amplio. El Grupo de Trabajo también tomó en cuenta el efecto que tendría para la ciencia la instalación de antenas adicionales destinadas a mejorar la sensibilidad y la cobertura u, v , así como de un gran telescopio submilimétrico de una sola antena capaz de realizar un rápido barrido del cielo. En el presente apartado se analizan estas propuestas. De forma general, el Grupo de Trabajo recomienda que, antes de que ALMA se comprometa con cualquiera de estas propuestas, se analicen detenidamente su mérito científico y viabilidad técnica. Da prosperar, se podría seguir adelante con estas iniciativas a mediados de la década de 2020.

6.1. AMPLIACIÓN DE LÍNEAS DE BASE

Un objetivo científico clave para ALMA es estudiar la estructura física, química y de campo magnético de los discos protoplanetarios y detectar los surcos generados por los planetas en formación. Podría decirse que las espectaculares imágenes de HL Tau, TW Hydra y Elias 27, entre otras, superaron las expectativas más optimistas, incluso sin que ALMA alcanzara sus capacidades totales.

La imagen del continuo de polvo de TW Hydra reviste un interés particular debido a que alcanza una resolución espacial de 1 UA y permite resolver

la zona terrestre del planeta. No obstante, considerando que TW Hydra es el disco circumestelar más cercano a nosotros, se requiere una resolución angular cerca de 3 veces mejor (~ 7 mas) para obtener una resolución espacial de 1 UA en las regiones incubadoras de estrellas más cercanas, como Ofiuco, Lupus y Taurus. Esto puede lograrse ya sea observando en altas frecuencias con las líneas de base existentes de 16 km, previo desarrollo de un método avanzado de corrección de fase atmosférica, o bien en frecuencias intermedias con líneas de base 2 o 3 veces mayores. Ampliar las líneas de base en 2 a 3 veces (30 a 50 km) ofrece ventajas científicas debido a las menores profundidades ópticas del polvo en frecuencias más bajas en el disco. Asimismo, las bandas de frecuencia más bajas pueden ser observadas más a menudo.

Para aumentar las líneas de base de ALMA en un factor 2 a 3 habría que construir nuevas plataformas para las antenas y toda la infraestructura correspondiente (así como nuevas antenas) en un área mucho más extensa que el área de concesión actual de ALMA. Transportar las antenas del conjunto existente desde y hacia plataformas más alejadas en el conjunto ampliado es una tarea inviable debido a las dificultades que entraña, la necesidad de atravesar o usar autopistas públicas y los costos considerables que implicaría la construcción de carreteras de calidad suficiente para los camiones transportadores. Por consiguiente, la ampliación de las líneas de base requeriría la instalación de antenas fijas en las plataformas alejadas.

El Grupo de Trabajo considera que se necesitarían al menos 6 antenas nuevas instaladas permanentemente en nuevas plataformas para proporcionar la cobertura u, v mínima en las nuevas líneas de base.

Se requieren estudios detallados para determinar si ese número es suficiente para alcanzar la fidelidad y sensibilidad de imagen necesaria en temperaturas brillantes para observar discos protoplanetarios cercanos a escalas de 1 UA. También se necesitan estudios topográficos detallados para identificar los emplazamientos adecuados para las nuevas plataformas. Asimismo, se requieren más estudios para determinar con qué frecuencia se usarían las líneas de base más largas y decidir qué función cumplirían las antenas más alejadas mientras se use el conjunto en configuraciones compactas. Por último, conviene analizar configuraciones intermedias, con líneas de base de hasta 20-25 km, como una etapa preliminar para alcanzar los 30-50 km, pues dichas configuraciones intermedias también podrían ser más simples en términos logísticos.

El Grupo de Trabajo recomienda que el programa de desarrollo comprenda el financiamiento de estudios sobre los aspectos científicos, técnicos y logísticos que implicaría aumentar la línea de base al máximo propuesto.

6.2. CONJUNTOS DE PLANO FOCAL

El uso de conjuntos de plano focal podría incrementar en forma considerable la velocidad de mapeo de campo amplio de ALMA para observar amplias regiones con nubes moleculares, generar imágenes de galaxias cercanas y realizar observaciones cosmológicas de campo profundo. Los conjuntos multihaz heterodinos existentes generalmente abarcan 4-16 elementos con huellas de 1-6 arcmin², y el más grande de ellos abarca 64 elementos. Estos receptores probablemente ocuparían

una parte importante del (escaso) espacio de plano focal disponible en las antenas de ALMA y podrían usarse en una sola banda a la vez. Se podrían incorporar cantidades modestas de pixeles (quizás 4 a 16) a ALMA sin tener que intervenir mucho el diseño de los componentes ópticos de la antena. El uso de un conjunto receptor que cubra cuatro veces el área de un haz para una fuente ampliada reduciría los tiempos de integración en un factor 4, suponiendo que no haya una merma en el rendimiento de los detectores individuales del receptor con la configuración usada y que el ancho de banda necesario no se vea comprometido en relación a sistemas de un píxel. En concreto, este último requerimiento implicaría la disponibilidad de un exceso de ancho de banda en el correlacionador de ALMA en comparación con un receptor de un solo píxel.

El Grupo de Trabajo considera que aún se debe avanzar en la demostración tanto del mérito científico como de la viabilidad técnica de los conjuntos de plano focal para que ALMA considere su implementación. En particular, para demostrar el mérito científico de esta propuesta se debe definir la banda ideal, el número de pixeles y el ancho de banda necesario que se considerarán en los estudios técnicos. Los costos técnicos y científicos de desarrollar y usar receptores de múltiples pixeles en ALMA son complejos y requieren análisis más detallados para determinar la viabilidad de la propuesta, y sin duda tendrían un impacto considerable en las operaciones del observatorio. La incorporación de un receptor de múltiples pixeles en una sola banda requeriría una serie de mejoras al final de la cadena de procesos (transporte de frecuencias intermedias, correlacionador, archivo) y probablemente también al principio (distribución del oscilador local).

El Grupo de Trabajo recomienda que el programa de desarrollo comprenda el financiamiento de estudios sobre los aspectos científicos, técnicos y logísticos que implicaría la adopción de conjuntos de plano focal.

6.3. ANTENAS DE 12 M ADICIONALES

Aumentar el número de antenas de 12 metros del conjunto básico beneficiaría a todos los programas científicos al aumentar la sensibilidad del conjunto y/o reducir el tiempo de integración, al mismo tiempo que mejorar la fidelidad y calidad de las imágenes. Las configuraciones de línea de base más largas mejorarían considerablemente su cobertura u, v para producir imágenes en alta resolución de regiones con emisiones complejas, principalmente en altas frecuencias. En consecuencia, aumentar el número de antenas de 12 metros ayudaría a alcanzar las nuevas metas científicas de ALMA aprovechando todo el potencial del lugar.

El plan de construcción original de ALMA preveía la instalación de 64 antenas de 12 metros de diámetro, que posteriormente se limitaron a 50 antenas para reducir costos. Como se mantuvieron las especificaciones del correlacionador, se podrían agregar 14 antenas sin afectar demasiado el resto del sistema.

Al agregar antenas también se agregarían capacidades operacionales y de obtención de imágenes que se traducirían en importantes beneficios científicos. Con más antenas, las configuraciones posibles, ideadas originalmente para un conjunto de 64 antenas, pueden abarcar un

rango más amplio de resolución y, de esa forma, acomodar una mayor cantidad de programas en una sola configuración. Esto significaría un ahorro en el tiempo destinado actualmente a las reconfiguraciones y permitiría aprovechar mejor las condiciones meteorológicas durante el año. Asimismo, la mejora en la sensibilidad significaría un aumento en la disponibilidad de objetos de calibración cerca de la fuente, lo cual permitiría mejorar la corrección de fase, especialmente importante para las observaciones de línea de base larga y en altas frecuencias. La fiabilidad y viabilidad de la técnica de autocalibración se vería incrementada puesto que el número de líneas de base aumentaría aún más ($\sim N^2$) que el número de antenas ($\sim N$).

El Grupo de Trabajo recomienda que el programa de desarrollo comprenda el financiamiento de estudios sobre escenarios de uso concretos que justifiquen aumentar el número de antenas.

6.4. GRAN TELESCOPIO SUBMILIMÉTRICO DE UNA SOLA ANTENA

Un gran telescopio submilimétrico de una sola antena de entre 25 y 50 metros de diámetro traería grandes sinergias científicas a ALMA. Este telescopio permitiría mapear el cielo en el continuo submilimétrico miles de veces más rápido que ALMA para identificar grandes muestras de fuentes galácticas y extragalácticas.

Las cámaras submilimétricas con múltiples longitudes de onda permiten realizar eficazmente mapeos espectrales extragalácticos en amplias regiones del cielo. Estas observaciones proporcionan un mapeo en tres dimensiones del Universo profundo en longitudes

submilimétricas a una resolución angular moderada. Ya se están desarrollando conjuntos panorámicos altamente multiplexados para realizar espectroscopía heterodina, y con una gran antena se podría lograr un mapeo eficiente de la Vía Láctea y las galaxias cercanas. Otra aplicación científica clave para un telescopio submilimétrico de una sola antena sería detectar y caracterizar polarizaciones a gran escala en el medio interestelar a una resolución moderada. Esta función, entre otras, se han analizado y consignado en el Informe del Grupo de Trabajo sobre Estrategia Científica de Antena Submilimétrica Única de ESO. En todos estos casos, ALMA estaría perfectamente equipado para seguir observando fuentes individuales con el fin de detectar líneas más tenues o resolver la estructura de la fuente.

Si bien reconoce las profundas sinergias que este aporte generaría con ALMA, el Grupo de Trabajo considera que el modo de operación de un gran telescopio de una sola antena, con un posible énfasis en grandes mapeos del cielo independientes de las observaciones interferométricas directas, no forma parte del objetivo actual de las operaciones de ALMA. Por consiguiente, cabría a los socios de ALMA redefinir la misión del proyecto ALMA en caso de que se quisiera considerar la inclusión de un telescopio de este tipo en su plan de desarrollo.

7. CONCLUSIONES

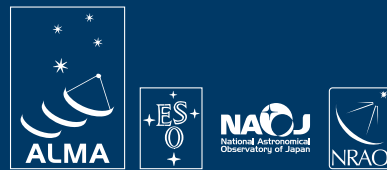
La principal recomendación del Grupo de Trabajo es que ALMA dé inicio tan pronto como sea posible a un programa destinado a aumentar el ancho de banda de FI e incrementar la tasa total de procesamiento de datos. Estas iniciativas tendrán un impacto profundo en muchos aspectos de las actividades de ALMA, que requerirán el desarrollo continuo de un programa durante el próximo decenio. Es fundamental llevar a cabo una planificación cuidadosa.

El Grupo de Trabajo recomienda la conformación de un equipo técnico y científico para definir oficialmente los principales requerimientos. A continuación, se deberá conformar un equipo de ingenieros de sistemas encargados de desglosar dichos requerimientos y asignarlos a los diferentes subsistemas con el fin de componer un conjunto coherente de requerimientos mínimos que cada proyecto de desarrollo futuro deberá cumplir. Debido al largo plazo de desarrollo, la tecnología de ancho de banda de los receptores probablemente evolucionará y aumentará su capacidad actual de 8 GHz. Por consiguiente, los requerimientos más importantes del sistema digital deben anticiparse a dicha evolución. Este enfoque requerirá de los programas regionales de desarrollo que alcancen un consenso en cuanto a los requerimientos técnicos. Asimismo, considerando que para incrementar la tasa de producción científica se necesitará una coordinación entre los socios regionales y el JAO, el Grupo de Trabajo recomienda con vehemencia la constitución de un grupo en ALMA encargado de supervisar los procesos de modernización de los receptores, el sistema digital y el correlacionador.

REFERENCIAS

1. ALMA Construction Project Book 2001
<https://www.cv.nrao.edu/~demerson/almabk/construc/>
2. Bolatto, A., Carpenter, J., Casassus, S., et al. 2015, ASAC Recommendations for ALMA 2030
<https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop/RoadmapforDevelopingALMA.pdf>
3. Bolatto, A., Corder, S., Iono, D., Testi, L., & Wootten, A. 2015, Pathways to Developing ALMA
https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop/Pathways_finalv.pdf
4. ALMA Science Advisory Committee 2015, Major Science Themes in the 2020-2030 Decade
<https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop/ScienceThemes.pdf>
5. ALMA Science Advisory Committee 2015, Major facilities by 2030
https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop/Major_facilites_2030.pdf
6. Henke, D., Claude, S., & Di Francesco, J. 2015, Concept Study of a Millimeter Camera for ALMA
<https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/ConceptStudyMMCameraDHSCJDMar13c.pdf>
7. Kerr, A. R., Effland, J., Lichtenberger, A. W., & Mangum, J. 2016, Towards a Second Generation SIS Receiver for ALMA Band 6
[https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/2nd Gen Band 6 Rcvr](https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/2nd%20Gen%20Band%206%20Rcvr)
8. Kerr, A. R., Effland, A. W., Lichtenberger, A. W., & Mangum, J. 2016, Towards a Second Generation SIS Receiver for ALMA Band 10
<https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop/ALMA-B10v2studyRpt2016o.pdf>
9. Cyberey, M. & Lichtenberger, A. 2017, Advanced Materials and On-wafer Chip Evaluation: 2nd Generation ALMA Superconducting Mixers,
<https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/licht.pdf>
10. Kojima, T., Kroug, M., Uemizu, K., Niizeki, Y., Takahashi, H., & Uzawa, Y. 2017, Performance and Characterization of a Wide IF SIS-Mixer-Preamplifier Module Employing High-Jc SIS Junctions
<http://ieeexplore.ieee.org/document/8085193/>
11. Kameno, S., Nakai, N., & Honma, M. 2013, p. 409, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era: The 30th Anniversary of Nobeyama Radio Observatory, ALMA Extended Array
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013ASPC..476..409K>

12. Escoffier, R., Lacasse, R., Saez, A., et al. 2015, Enhancing the Spectral Performance of the 64-antenna ALMA Correlator, NAASC memo 114
http://library.nrao.edu/public/memos/naasc/NAASC_114.pdf
13. Escoffier, R., Lacasse, R., Greenberg, J., et al. 2015, Doubling the Bandwidth of the 64-Antenna ALMA Correlator, NAASC memo 115
http://library.nrao.edu/public/memos/naasc/NAASC_115.pdf
14. Lacasse, R., Amestica, R., Greenberg, J., et al. 2017, Spectral Resolution and Bandwidth Upgrade of the ALMA Correlator
https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/PMD365001AREP_Executive_Summary.pdf
15. Baudry, A., Blackburn, L., Carlson, B., et al. 2017, Digital Correlator and Phased Array Architectures for Upgrading ALMA
https://science.nrao.edu/facilities/alma/alma-develop-old-022217/CloseoutReportvJuly2017_ALMAMemo605_Weintraub.pdf
16. Pospieszalski, M., Kerr, A., & Mangum, J. 2016, ALMA Memo 601, On the Instantaneous SIS Receiver Bandwidth
<http://library.nrao.edu/public/memos/alma/memo601.pdf>
17. Chenu, J.-Y., Navarrini, A., Bortolotti, Y., et al. 2016, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, v6, p223, The Front-End of the NOEMA Interferometer
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016ITTST...6..223C>
18. Zeng, L., Tong, E., Blundell, R., Grimes, P., and Paine, S., 2018, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, A Low-Loss Edge-Mode Isolator With Improved Bandwidth for Cryogenic Operation
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8291832&tag=1>
19. Quertier, B., Gaunre, S., & Randria, A. 2016, Digitizer and Correlator Upgrade
<http://www.chalmers.se/en/centres/GoCAS/Events/ALMA-Developers-Workshop/Pages/Programme.aspx>
20. Iguchi, S., Gonzalez, A., Kojima, T., Shan, W., Kosugi, G., Asayama, S. & D. Iono, D. 2018, Proc. SPIE 10700-104, How do we Design the Interferometric System Focused on the Analog and Digital Backend and the Correlator for Scientifically Valuable ALMA Developments?



Traducción de N. Fernández para ALMA.

Información: La versión oficial de este documento es en idioma inglés. La presente versión es una traducción no oficial.