

Impacto del cambio de membrana en la eficiencia de la antena de 40m a 22, 45 y 87 GHz

M. Santander-García,
B. Tercero,
M. Gómez-Garrido

Informe Técnico IT-CDT 2017-17

Historial de revisiones

Versión	Fecha	Autor	Actualizaciones
1.0	10-11-2017	Autores	Primer borrador

Índice

1. Introducción	3
2. Observaciones	4
3. Procesamiento de los datos	4
3.1. Continuo - IDET	4
3.2. Líneas - FFTS	5
4. Resultados	6
4.1. Resultados en continuo	6
4.2. Resultados en líneas	10
5. Discusión	12
5.1. Deterioro progresivo de la eficiencia de apertura	12
5.2. Comparación de observaciones de líneas con otros radiotelescopios	14
6. Conclusiones	18
6.1. Nota sobre futuras medidas de la eficiencia	19
6.2. Nota sobre problemas adicionales encontrados en estas observaciones	20

1. Introducción

El reciente reemplazo de la membrana que cubre el vertex del radiotelescopio de 40 m, entre los días 18 (retirada de la antigua) y 20, 21 y 22 (instalación y sellado de la nueva) de septiembre de 2017, motivó una serie de medidas de la eficiencia de apertura (en adelante denominada simplemente “eficiencia”) antes, durante y después del proceso, a 22, 45 y 87 GHz (bandas K, Q y W). El objetivo de este informe es el análisis comparativo de los resultados para examinar el posible impacto de la nueva membrana en la eficiencia del radiotelescopio.

La eficiencia de apertura de una antena puede estimarse a partir de medidas de una fuente puntual o pequeña comparada con el tamaño del haz. En dicha situación, de acuerdo a [1]:

$$\eta_A = \frac{2k}{SA_g} C_S T'_A \quad (1)$$

donde η_A es la eficiencia de apertura, k la constante de Boltzmann, S la densidad de flujo de la fuente observada, A_g la apertura geométrica de la antena, C_S un factor de corrección (deconvolución) debido a los tamaños relativos de la fuente y el haz, y T'_A la temperatura de antena corregida de la opacidad atmosférica. Sustituyendo el valor de las constantes y de A_g , y teniendo en cuenta que la eficiencia delantera, η_f , es el factor de conversión entre T'_A y T_A^* , la temperatura corregida de atmósfera y eficiencia delantera, en la que se hallan calibrados los datos procedentes de la antena, tenemos que:

$$\eta_A = 2.196 \frac{C_S \eta_f T_A^*}{S} \quad (2)$$

En general la eficiencia de apertura es una función que depende suavemente de la elevación, pero en los términos expresados, se refiere a su valor en el cénit, donde es máxima, y así se entiende a lo largo de esta memoria.

En cuanto al factor de corrección C_S y definiendo x como la razón del tamaño de la fuente sobre el tamaño del haz ($x = \frac{\theta_s}{\theta_A}$), entonces, para una fuente cuya emisión sea asimilable a un disco homogéneo (como un planeta):

$$C_S = \frac{\left(\frac{x}{1.2}\right)^2}{1 - e^{-\left(\frac{x}{1.2}\right)^2}} \quad (3)$$

Por otro lado, esta eficiencia de apertura puede relacionarse con la eficiencia del haz principal (η_B) a través de la iluminación asumiendo un haz gaussiano:

$$\eta_B = \eta_A \frac{A_{\text{geom}} \Omega_{\text{mb}}}{\lambda^2} \quad (4)$$

donde A_{geom} es el área geométrica de la apertura, Ω_{mb} es el ángulo sólido del haz y λ es la longitud de onda. Tomando valores numéricos, la expresión se reduce a

$$\eta_B = 2.092 \times 10^{-5} \eta_A \frac{D^2 \theta^2}{\lambda^2} \quad (5)$$

siendo θ la anchura del haz a mitad de potencia (HPBW; Half Power Beam Width) medido en segundos de arco ("), D el diámetro del telescopio en metros (m) y λ en milímetros (mm).

Mediante esta expresión, y utilizando los valores calibrados de la η_f , podremos estimar el valor de la conversión entre T_A^* y la temperatura de haz principal T_{MB} . Conocer T_{MB} en observaciones de fuentes con tamaños menores del tamaño del haz resulta fundamental para poder comparar fácilmente las observaciones realizadas con el 40m con aquellas de otros instrumentos.

2. Observaciones

La tabla 1 resume las observaciones relativas a esta memoria, tanto con el backend de continuo (IDET, *Continuum IRAM detector*), como con el backend de líneas (FFTS, *Fast Fourier Transform Spectrometer*).

Fuente	Fecha	Frecuencias (GHz)	Elevación _{max} (°)	Estado de la membrana
<i>IDET backend (Continuo)</i>				
Venus	16-09-2017	22, 45, 87	63	Membrana antigua
Venus	18-09-2017	22, 45	50	Sin membrana
Venus	19-09-2017	22, 45, 87	62	Sin membrana
Venus	23-09-2017	22, 45, 87	59	Membrana nueva
Venus	24-09-2017	22, 45, 87	60	Membrana nueva
Saturno	18-09-2017	22, 45	27	Sin membrana
Saturno	20-09-2017	22, 45	27	Membrana nueva
Saturno	23-09-2017	22, 45	27	Membrana nueva
Saturno	24-09-2017	22, 45	27	Membrana nueva
<i>FFTS backend (Líneas)</i>				
OrionIRC2	17-09-2017	22, 45	44	Membrana antigua
OrionIRC2	19-09-2017	22, 45	44	Sin membrana
OrionIRC2	23-09-2017	22, 45	44	Membrana nueva

Cuadro 1: Log de las observaciones. Elevación_{max} corresponde a la máxima elevación observada, aquella a la que se ha calculado la eficiencia de apertura, en cada caso.

Las observaciones se llevaron a cabo en similares condiciones atmosféricas, con tiempo despejado. El procedimiento, en el caso de los backends IDET, consistió en una serie de barridos de puntería, corregidos sucesivamente, intercalados con frecuentes procedimientos de foco. En el caso de los backends FFTS, el procedimiento consistió en un ajuste de puntería, foco, puntería, seguido por una serie de medidas de la fuente siguiendo un patrón de 5 puntos.

3. Procesamiento de los datos

3.1. Continuo - IDET

Tras segmentar los archivos .40m y clasificarlos en base a día, planeta y polarización, ejecutamos la tarea de CLASS `pmReducV3.class`. Dicha tarea establece una ventana alrededor

del perfil resultante del barrido de puntería en azimut (y elevación), pasa una línea de base, ajusta una gaussiana al perfil del barrido y dispone los resultados en una tabla, junto con datos como la elevación, la temperatura ambiente y la temperatura de sistema.

El resultado fue analizado mediante la rutina (de IDL) `eficiencia40m.pro`. Esta rutina extrae la elevación, la temperatura de antena T_A^* , la temperatura ambiente y la temperatura de sistema de la tabla anterior y consulta los datos de tamaño aparente y densidad flujo de los planetas y días en cuestión en un archivo pre-generado a partir del modelo del software de GILDAS ASTRO. Luego calcula la eficiencia de apertura η_A de cada scan con arreglo a la ecuación 2, y devuelve la η_A correspondiente a la máxima elevación observada (calculada a partir de los 20 puntos más próximos en elevación) y su desviación estándar.

3.2. Líneas - FFTS

Para el estudio la variación de la eficiencia en líneas espectrales, se eligió observar Orión KL. Esta fuente resulta ideal para este propósito ya que es posible detectar líneas térmicas con una buena relación S/N en un tiempo corto de integración. Además, la complejidad de la fuente permite elegir en los análisis tanto líneas que proceden de fuentes puntuales como líneas procedentes de regiones extensas. Las líneas de emisión causadas por moléculas complejas abundantes en la región como CH_3CN , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ o CH_3OCOH provienen, principalmente, de las condensaciones de gas y polvo caliente (típicamente con tamaños menores de $10''$). Otras moléculas más simples, como el CS, se espera que presenten emisión más extendida, a lo largo de la nube molecular ambiente. Por otro lado, debido a que, en nuestra línea de visión, Orión KL se encuentra detrás de la región HII causada por las Estrellas del Trapecio, las líneas de recombinación del H y del He que encontramos son emitidas en esta región extensa (de tamaño mayor que el HPBW del telescopio a 22 y 45 GHz).

A pesar de todas las ventajas mencionadas, posibles errores de puntería resultan críticos en esta fuente en el análisis de la emisión procedente de las regiones compactas. Es importante señalar que existe gran diversidad química entre cada componente compacta de la región y errores pequeños en el apuntado no se traducen simplemente en una pérdida de intensidad uniforme para todas las líneas. Esto es debido a que una modificación del apuntado puede hacer que se pierda parte de la emisión de una de las condensaciones, pero favoreciendo, a la vez, la detección de la emisión de otra. En principio el tamaño del haz a 45 GHz es suficientemente grande para no observar estos efectos de manera significativa.

El rango de elevaciones observadas para Orión fue entre 30 y 45° para todas las sesiones de observación. Para realizar el estudio, hemos promediado los espectros obtenidos para cada día individualmente. Si bien no se realizará una comprobación de la variación de la eficiencia en función de la elevación, sí veremos cómo la membrana afecta a la observación de líneas espectrales.

4. Resultados

4.1. Resultados en continuo

Las eficiencias de apertura η_A resultantes de las diferentes observaciones —para cada planeta, día y polarización— pueden consultarse en la tabla 2 y en la figura 1.

Fuente	Fecha	η_A (%)	η_A (%)	η_A (%)	η_A (%)	η_A (%)	Elevación _{max} (°)	Estado de la membrana
		22 GHz (LCP)	22 GHz (RCP)	45 GHz (LCP)	45 GHz (RCP)	87 GHz (RCP)		
Venus	16-09-2017	43±8	42±6	28±3	30±3	16±2	63	Membrana antigua
	18-09-2017	37±5	38±3	25±1	25±1		50	Sin membrana
	19-09-2017	44±9	43±6	28±4	28±4	18±1	62	Sin membrana
	23-09-2017	39±7	39±7	22±4	23±5	15±1	59	Membrana nueva
	24-09-2017	40±8	38±2	22±3	23±3	14±1	60	Membrana nueva
Saturno	18-09-2017	46±11	38±5	26±1	26±1		27	Sin membrana
	20-09-2017	47±10	37±4	24±1	23±1		27	Membrana nueva
	23-09-2017	55±9	35±6	20±2	20±2		27	Membrana nueva
	24-09-2017	53±10	33±6	22±2	21±1		27	Membrana nueva

Cuadro 2: Eficiencias de apertura promedio resultantes en cada día, frecuencia, planeta y polarización.

Las incertidumbres proporcionadas en la tabla 2 y en la figura 1 responden únicamente a la dispersión de las medidas individuales y no deben, por tanto, ser consideradas como errores totales. En cambio, las incertidumbres dan una idea bastante aproximada del ruido de las medidas. Nótese, en particular, que el ruido con Saturno a 22 GHz es significativamente mayor que con Venus a la misma frecuencia. Esto es así debido a la baja relación señal a ruido que presenta Saturno a 22 GHz, lo que explica que las eficiencias η_A a 22 GHz calculadas usando Saturno a partir de las dos polarizaciones sean tan dispares, mientras que con Venus los valores obtenidos son coherentes. Es debido a este hecho que en lo sucesivo en esta memoria descartaremos los datos procedentes de observaciones de Saturno a esta frecuencia.

En cualquier caso, es importante señalar que el ruido de la polarización LCP a 22 GHz son sistemáticamente mayores que las correspondientes a la polarización RCP a la misma frecuencia —ya sea con Saturno o con Venus, véase la tabla 2, y figuras 2 y 3. Esta cuestión está siendo abordada actualmente mediante medidas de ruido de receptor con una carga fría de nitrógeno líquido.

En líneas generales, la eficiencia de apertura se comporta según lo esperado, siendo una función de la elevación casi plana, salvo a elevaciones muy bajas (véase como ejemplo la figura 3). Hemos estudiado asimismo el comportamiento de la eficiencia de apertura en función de la temperatura ambiente y la temperatura de sistema. Observamos, en general, ligeras caídas de eficiencia a 45 GHz, del orden de 4-7 % cuando la temperatura ambiente aumenta 4 K (p. ej. fig. 4). A 22 y 87 GHz no se aprecia tan fácilmente este comportamiento, o bien la caída en eficiencia es menor. Por último, hemos evaluado el impacto de la temperatura de sistema en la eficiencia de apertura (p. ej. fig. 5). No parece haber efectos sistemáticos claros en este sentido, aunque la eficiencia de apertura resulta algo menor a las T_{sys} más altas. En algunos casos se observan reducciones de hasta un ~ 5 -10 % entre 100 K y 350 K, mientras que en otros (los menos) no se aprecia reducción alguna.

La tabla 3 resume finalmente las eficiencias de apertura actuales promedio a diferentes frecuencias, antes y después del cambio de membrana.

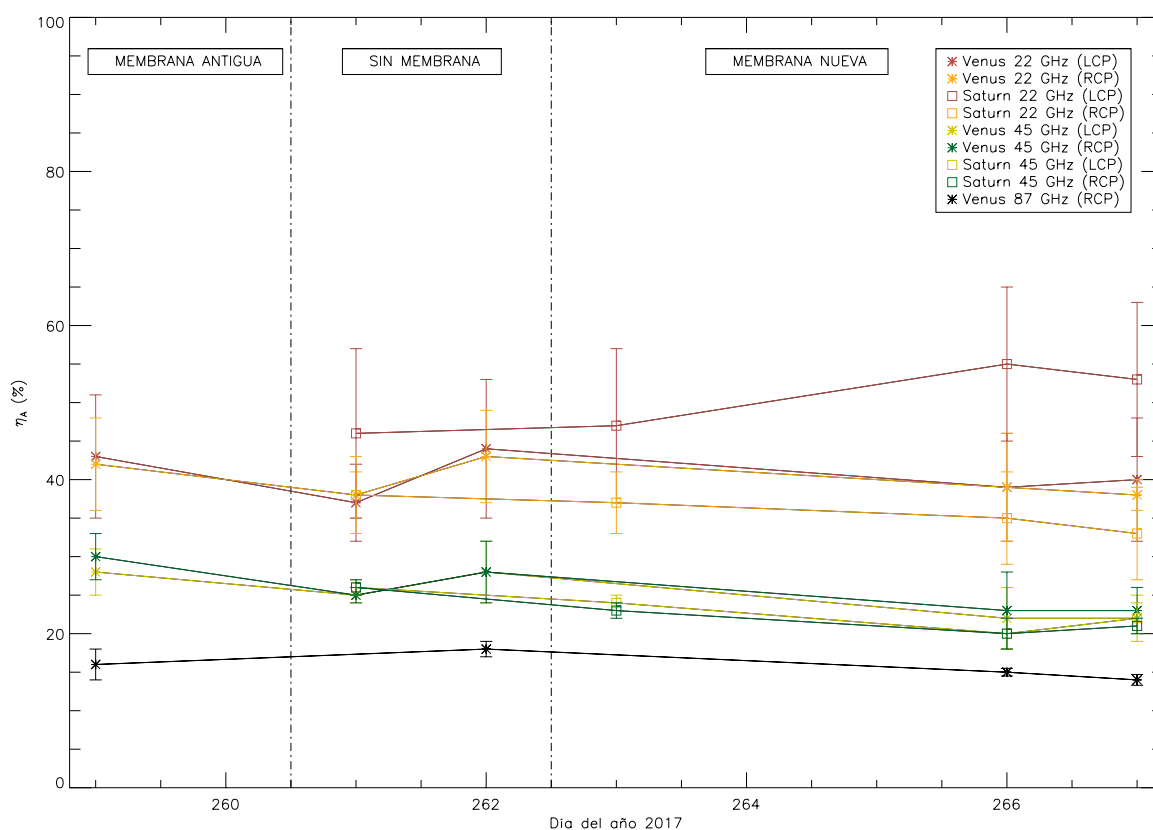


Figura 1: Impacto de la membrana en la eficiencia de apertura para diferentes frecuencias, polarizaciones y planetas considerados.

Estado	η_A (%)	η_A (%)	η_A (%)
	22 GHz	45 GHz	87 GHz
Membrana antigua	43 ± 5	29 ± 3	16 ± 2
Sin membrana	41 ± 3	26 ± 1	18 ± 1
Membrana nueva	37 ± 3	22 ± 1	15 ± 1

Cuadro 3: Eficiencias de apertura promedio resultantes en este trabajo. Las incertidumbres responden a la dispersión entre medidas y no a los errores reales.

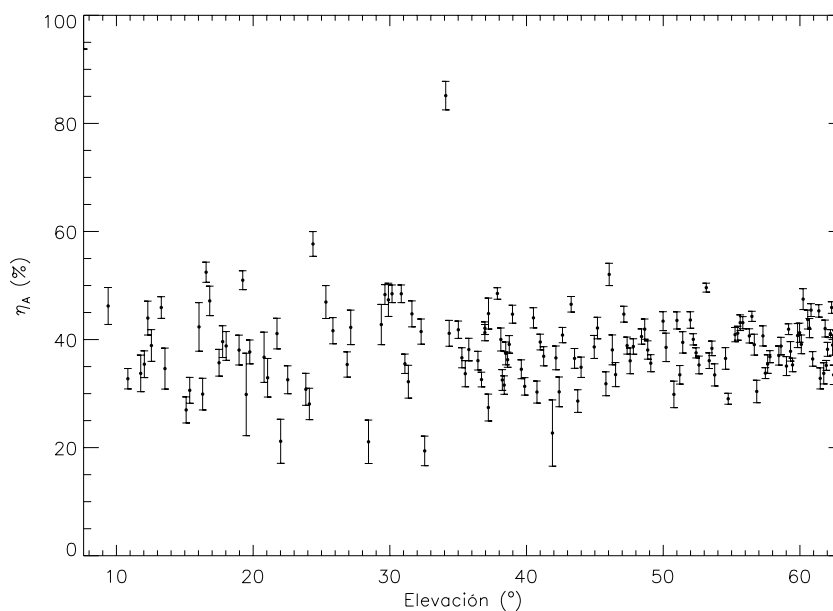


Figura 2: Eficiencia de apertura η_A a 22 GHz (polarización LCP) en función de la elevación, estimada mediante observaciones de Venus el día 16 de septiembre de 2017.

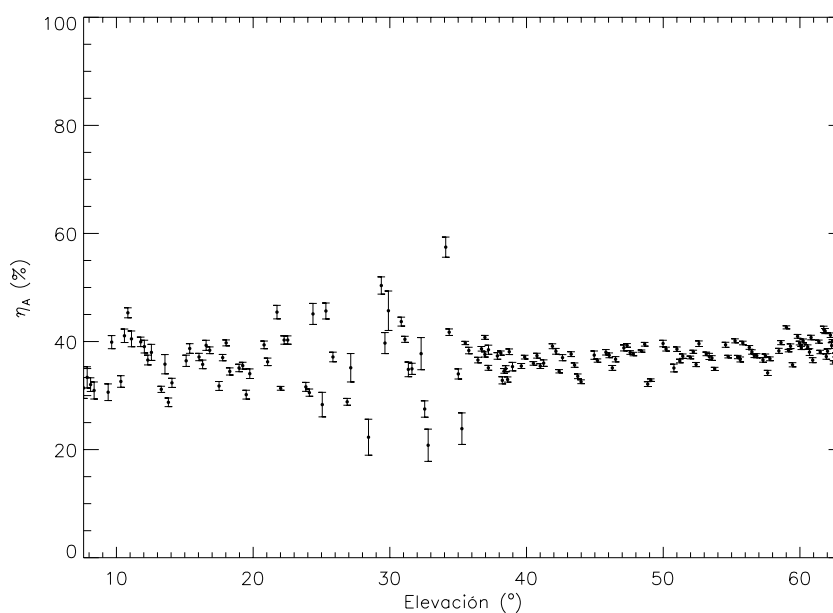


Figura 3: Eficiencia de apertura η_A a 22 GHz (polarización RCP) en función de la elevación, estimada mediante observaciones de Venus el día 16 de septiembre de 2017. Nótese que los errores de cada medida y su dispersión son significativamente menores que en la polarización LCP.

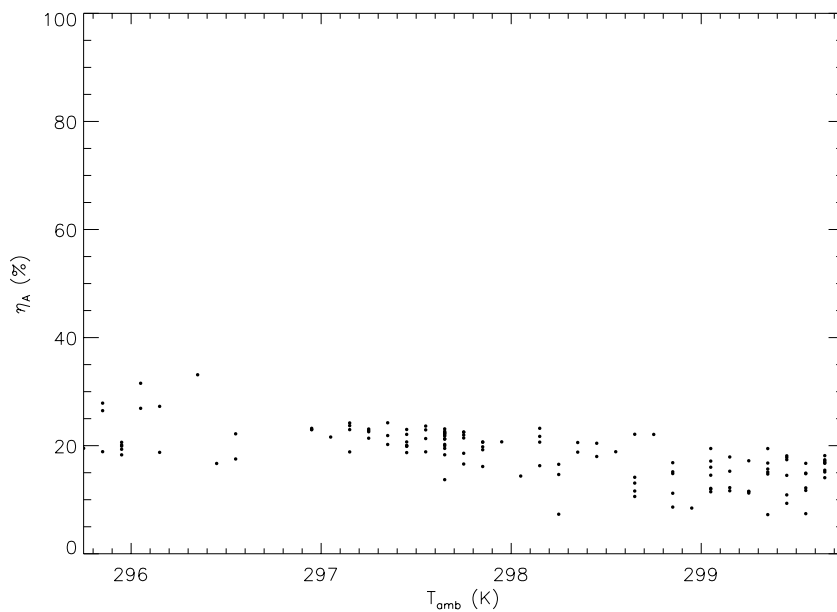


Figura 4: Eficiencia de apertura η_A a 45 GHz (polarización RCP) en función de la temperatura ambiente, estimada mediante observaciones de Venus el día 23 de septiembre de 2017.

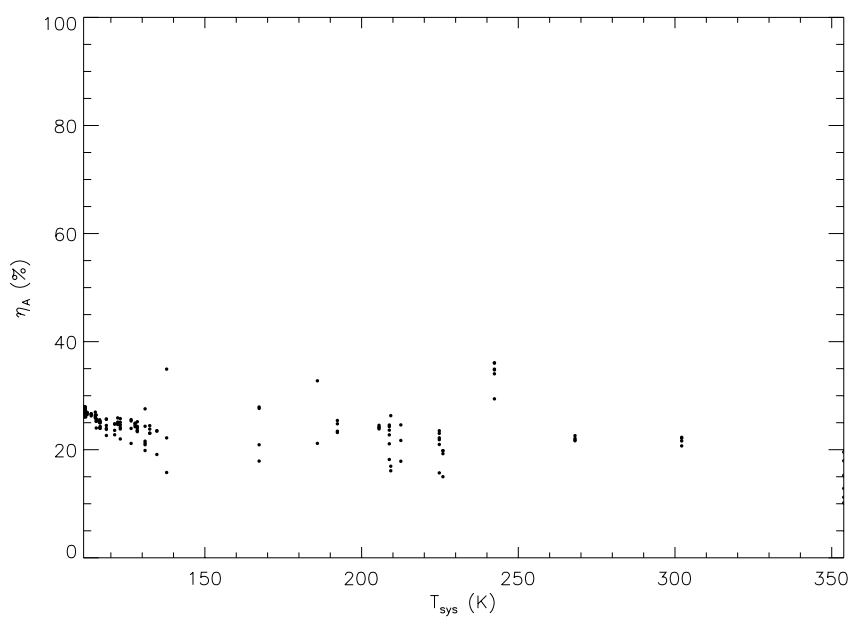


Figura 5: Eficiencia de apertura η_A a 45 GHz (polarización RCP) en función de la temperatura de sistema, estimada mediante observaciones de Venus el día 16 de septiembre de 2017.

En cuanto al impacto de la membrana, la variabilidad y dispersión de los datos no permite extraer conclusiones claras. Esto es debido, sobre todo, a las escasas medidas que pudieron tomarse antes del cambio de membrana, tan solo un día. En cualquier caso, a tenor de las medidas sin membrana, comparadas con las medidas con la membrana nueva, podría decirse que la membrana nueva produce una pérdida en torno a un 3-4 % de eficiencia de apertura respecto a la ausencia de membrana.

Con los valores de la eficiencia de apertura, podemos estimar la conversión Jy/K asumiendo una fuente puntual ($C_s = 1$) y, mediante la expresión 5, podemos calcular el valor de η_B . La Tabla 4 muestra la conversión Jy/K y los valores de η_B y η_{MB} , todo ello con la membrana nueva. Podemos observar que a 45 GHz el factor se sitúa actualmente en ~ 9 Jy/K. A modo de comparación, en medidas realizadas en 2015, el factor se situaba en 6.25 Jy/K (ver [8]).

Banda	K	Q	W
Frecuencia (GHz)	22	45	87
λ (mm)	13	7	3
HPBW (")	84	42	19
η_A	0.37 ± 0.03	0.22 ± 0.01	0.15 ± 0.01
η_i^\dagger	0.93	0.90	0.85
η_B	0.52 ± 0.04	0.27 ± 0.02	0.20 ± 0.02
η_{MB}	0.56 ± 0.05	0.30 ± 0.03	0.23 ± 0.03
Jy/K	5.5 ± 0.4	9.0 ± 0.7	12 ± 1

Cuadro 4: Eficiencias de haz, de haz principal y conversión Jy/K resultantes con la membrana nueva.

† Valores tomados de [9, 10]

4.2. Resultados en líneas

En las Figs. 6 y 7 se muestra un rango concreto de frecuencias de la comparación de los espectros de líneas obtenidos durante observaciones con la membrana antigua, sin membrana y con la membrana nueva en el intervalo de tiempo de seis días. Como se ha mencionado anteriormente, las observaciones fueron realizadas en similares condiciones atmosféricas y en los mismos intervalos temporales cada día. Esto minimiza el error que podría ser causado por factores relacionados con el momento de la observación.

Si nos fijamos en la emisión de las líneas de recombinación, observamos cómo el efecto de la membrana atenúa ligeramente (3-4 %) la intensidad de las líneas y que no existe una diferencia significativa entre las membrana nueva y la antigua. Esto ocurre de manera sistemática para todas las líneas observadas producidas por regiones extensas de la fuente de estudio y observamos el mismo comportamiento que para las medidas de continuo de los planetas.

Por otro lado, observando las líneas de NH_3 y HC_3N encontramos una diferencia significativa en la intensidad (del orden del 25 %) y en la forma para HC_3N entre los datos tomados con la membrana antigua y con la nueva. NH_3 es una molécula muy abundante en los hot cores de las regiones de formación de estrellas masivas y clásicamente sus niveles metaestables han

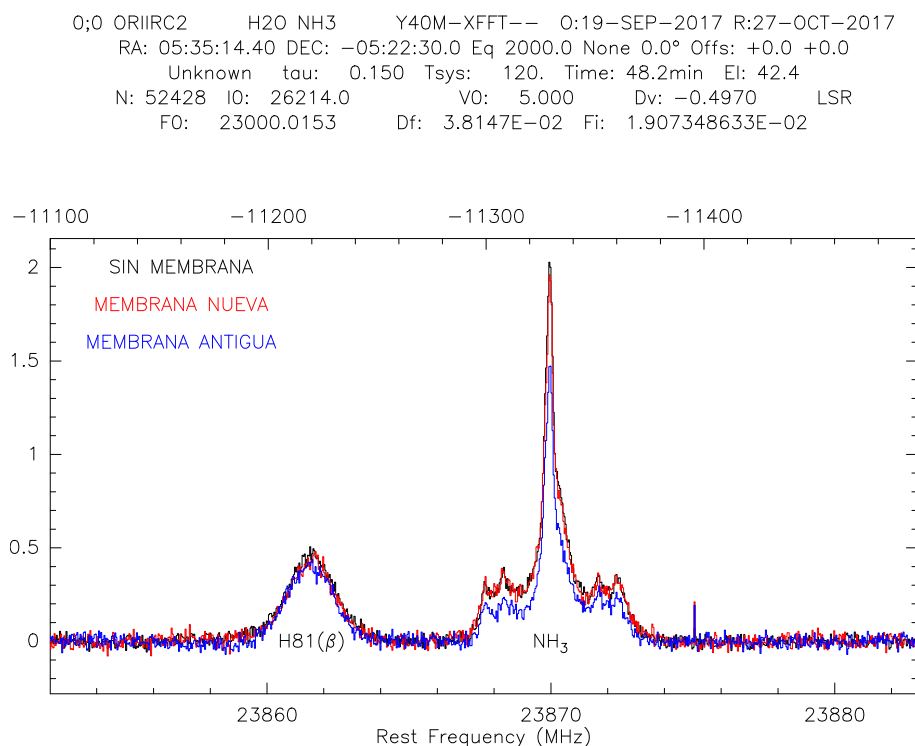


Figura 6: Líneas de $H81(\beta)$ y NH_3 observadas en banda K hacia Orión KL. Sin la membrana del vertex (espectro en negro), con la membrana antigua (espectro azul) y con la nueva (espectro rojo).

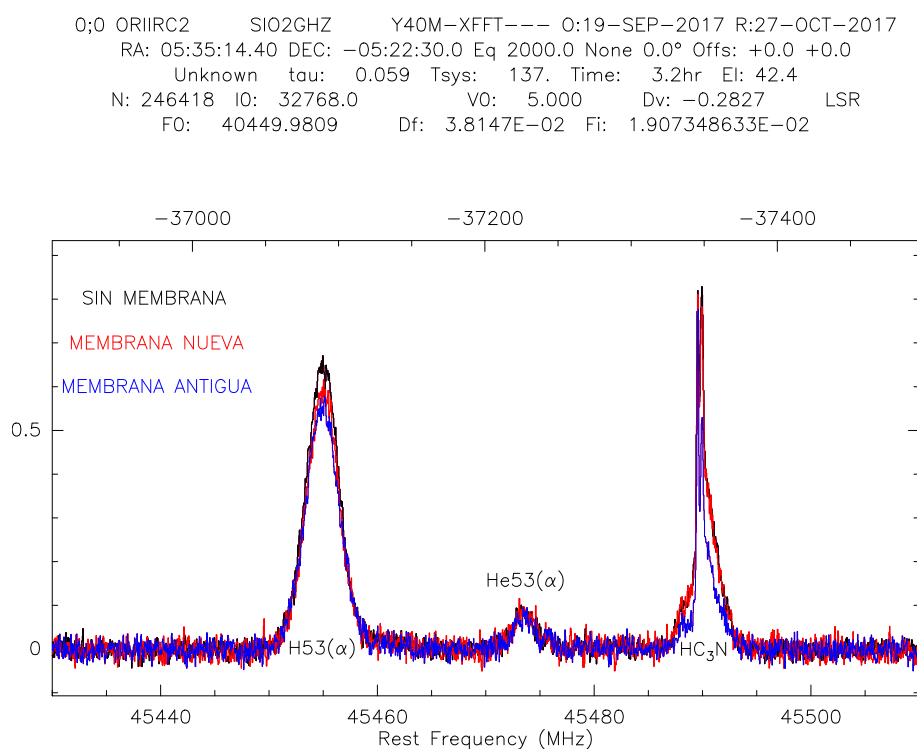


Figura 7: Líneas de $H53(\alpha)$, $He53(\alpha)$ y HC_3N observadas en banda Q hacia Orión KL. Sin la membrana del vertex (espectro en negro), con la membrana antigua (espectro azul) y con la nueva (espectro rojo).

sido observados para obtener la temperatura cinética de estas regiones. Aún siendo una especie relativamente sencilla cabe destacar que su emisión se concentra en las componentes más calientes de estas regiones. HC_3N es una especie muy abundante en una gran variedad de objetos astronómicos. En nubes moleculares se detecta tanto en objetos fríos como núcleos preestelares y núcleos en las primeras fases de formación estelar, en objetos templados como hot corinos y más calientes como hot cores. También se encuentra en las regiones de fotodisociación de estas nubes asociadas a regiones HII. De esta manera, las líneas de HC_3N detectadas con el radiotelescopio de 40m hacia Orión KL son el producto de la composición de la emisión de todas las componentes de la nube. Si nos fijamos, en la línea a 45 GHz, observamos dos picos principales de emisión. La componente espectral a mayor velocidad radial corresponde a aquella emitida por la nube ambiente (emisión extendida) mientras que la componente espectral hacia el azul corresponde a la emisión del núcleo caliente (emisión compacta). Además, esta línea presenta una componente ancha en forma de alas que se corresponde con la emisión de los flujos moleculares expulsados por la estrella masiva en formación.

Estas consideraciones nos permiten concluir que donde se encuentran las diferencias significativas entre las observaciones de la membrana antigua y la nueva es en la emisión de las especies que provienen de las regiones compactas (nótese que la emisión del pico procedente de la nube ambiente en HC_3N es similar en ambos espectros) o de aquellas más extensas pero con un tamaño menor que el tamaño del haz (como la componente del flujo molecular). Analizando las líneas observadas de otras especies que provienen de las regiones compactas, como por ejemplo las líneas de $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$, se observa este mismo comportamiento.

Ya que es difícil asumir que la membrana produzca un efecto en la forma del patrón de potencia del haz, decidimos comprobar si podría haber un problema de apuntado en los datos tomados con la membrana antigua el día 16 de septiembre de 2017. Para ello, comparamos los datos de este día con observaciones de Orión KL anteriores realizadas por MG el día 10 de julio de 2017. En esta comparación no se observó una diferencia significativa de intensidad en la línea de HC_3N y el otras procedentes de regiones compactas como aquellas de $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ y SO_2 . Sin embargo, no contamos con una amplia muestra de observaciones y descartamos la conclusión de que la membrana antigua produjera algún tipo de efecto en la forma del haz donde se perdiera eficiencia en la emisión procedente de zonas compactas.

5. Discusión

5.1. Deterioro progresivo de la eficiencia de apertura

Creemos necesario llamar aquí la atención sobre el considerable deterioro de la eficiencia experimentado por la antena a lo largo de los últimos años, que la sitúa cada vez más lejos de la máxima eficiencia teórica, véase la figura 8, que muestra la caída de eficiencia de apertura a 45 GHz a lo largo de los últimos años, a partir de observaciones astronómicas directas (2013: Bujarrabal, comunicación privada; 2015: [8]; 2016: [7];) e indirectas, mediante holografía (2012: [5]).

Finalmente, hemos estimado el *rms* de los errores de superficie del primario a partir de la ecuación de Ruze:

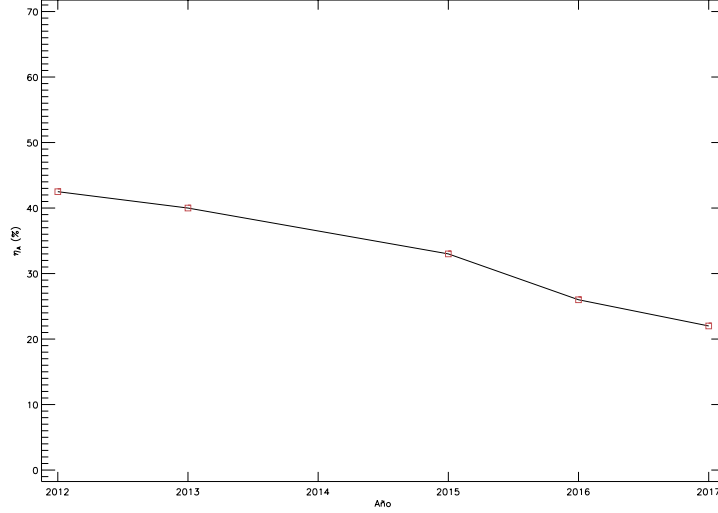


Figura 8: Deterioro de la eficiencia de apertura a η_A a 45 GHz con el paso del tiempo. Las medidas de 2013, basadas en observaciones astronómicas, no fueron publicadas (Bujarrabal, comunicación privada). Las de 2012 no son medidas astronómicas directas, sino deducidas a partir de medidas de holografía y el uso de la ecuación de Ruze ([5]). El resto corresponde a medidas directas astronómicas ([8], [7] y este trabajo).

$$\eta_{M1} = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma_S}{\lambda}\right)^2} \quad (6)$$

En ausencia de pérdidas debidas a otras causas (p. ej. astigmatismo), y siguiendo el mismo tratamiento hecho en [7], la rms de los errores de superficie actual que resulta de nuestros cálculos a 45 GHz es del orden de $570 \mu\text{m}$.

A otras frecuencias la situación varía sensiblemente, véase figura 9. Si atribuimos solo a los errores de superficie todo el problema que nos aleja de la eficiencia de apertura ideal, los resultados resultan dispares: la rms de los errores de superficie variaría entre $340 \mu\text{m}$ para 87 GHz y $870 \mu\text{m}$ para 22 GHz. En otras palabras, siempre y cuando los errores de superficie se distribuyan aleatoriamente, no parece que sean responsables, por sí solos, de la ineficiencia de la antena, dada la gran variación entre los valores resultantes. A la vista de esto, consideramos lo más probable que la caída en eficiencia no se deba solo al desajuste de los paneles (*rms*) sino a un factor adicional que pueda causar una caída importante de la eficiencia, como pueda ser el astigmatismo, o algo relativo a la rama del camino óptico que conduce a los receptores en banda K y Q, a 22 y 45 GHz.

En este sentido, observaciones continuadas de MG a lo largo de más de un año corroboran este deterioro de la eficiencia. La Fig. 10 muestra el área integrada de la línea de SiO $J=1-0 \ v=0$ observada en distintas fechas en la envoltura rica en oxígeno de la estrella evolucionada RX Boo. El estudio de la variabilidad de esta línea en varios tipos de estrellas evolucionadas llevado a cabo por [8] entre noviembre de 2013 y abril de 2015, muestra que ésta permanece constante en una estrella del mismo tipo que RX Boo, la estrella variable semiregular rica en oxígeno X Her. Por tanto, esto nos hace pensar que la línea de SiO $J=1-0 \ v=0$ presenta emisión térmica en este tipo de estrellas y que, por tanto, no se espera encontrar un descenso en la intensidad

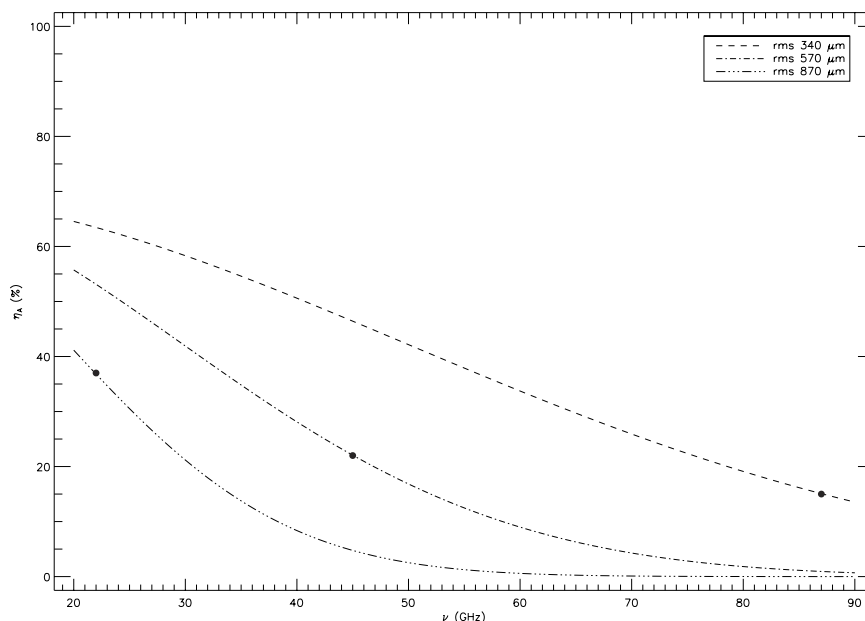


Figura 9: Eficiencias de apertura actuales a diferentes frecuencias (círculos negros) y eficiencia teórica para tres valores del rms de los errores de superficie (líneas discontinuas), supuesta toda imperfección atribuible a dichos errores de superficie.

de la línea, al contrario de lo que se observa en la Fig. 10. En conclusión, estas observaciones presentan una fuerte indicación del deterioro de la eficiencia de la antena en el último año.

Por otro lado, es interesante señalar que, según estas últimas observaciones mostradas, el deterioro de la eficiencia no sigue un ciclo que dependa de la estación del año. En este sentido, si la caída de la eficiencia fuera debido al astigmatismo, éste debería estar provocado por una deformación estructural y no solo al efecto esperado en verano debido a las altas temperaturas soportadas por el telescopio.

5.2. Comparación de observaciones de líneas con otros radiotelescopios

Con el fin de realizar un ejercicio práctico para comprobar la estimación de las eficiencias del haz principal compararemos líneas espectrales observadas con el 40m después del cambio de membrana y con otros radiotelescopios.

En primer lugar, queremos advertir de que esta comparación solo tendría realmente sentido cuando se observan fuentes puntuales. Desafortunadamente, no es sencillo encontrar este tipo de fuentes y aún menos que hayan sido observadas con otros telescopios a las mismas frecuencias de operación del 40m. Huelga decir que aún no teniendo sentido físico la conversión desde T_A^* a T_{MB} para fuentes que no se pueden considerar puntuales, esta práctica se realiza comúnmente en los análisis de barridos espectrales. Por ejemplo, en el caso de Orión KL, al convertir los datos a T_{MB} o a Jy, se asume que la mayoría de las líneas detectadas proceden de regiones mucho menores que el tamaño del haz principal.

La comparación se hará en T_{MB} con datos de Orión KL observado con el radiotelescopio de

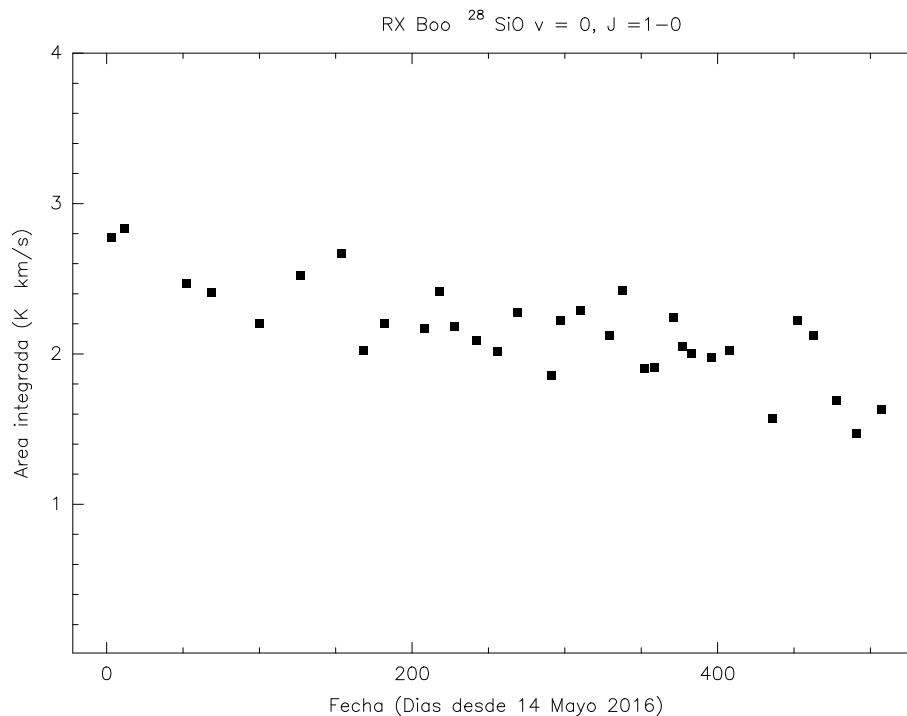


Figura 10: Área integrada de la línea de SiO $J=1-0$ $v=0$ observada en RX Boo en distintas fechas desde el 14 de mayo de 2016.

34m de Robledo de Chavela [6] y con datos de TMC-1 e IRC+10216 observados con el radiotelescopio de Nobeyama de 45m [4, 3]. Hemos seleccionado líneas espectrales que, en principio, proceden de regiones si no puntuales, de tamaño menor que el haz de estos telescopios. Además, es importante que el tamaño del telescopio sea similar pues de otro modo los efectos debidos a la no idealidad de la asunción de fuente puntual serían críticos. Para mostrar lo arriesgado de una comparación de este tipo, para Orión KL también se han comparado resultados a 22 GHz con aquellos del radiotelescopio de Effelsberg de 100m (HPBW $\sim 40''$ a 23 GHz) [2]. Otra consideración a tener en cuenta es la resolución espectral de los datos ya que vamos a comparar la intensidad del pico de emisión de la línea y no el área integrada. De esta manera, para poder evaluar correctamente las diferencias en algunos casos hemos tenido que degradar la resolución espectral de los datos del 40m promediando la emisión de varios canales.

Asumiendo fuentes puntuales, la razón de intensidades en T_{MB} para líneas observadas con estos telescopios y con el 40m viene dada en la Tabla 5.

Telescopio	Robledo 34m	Nobeyama 45m
Razón	$(34/40)^2$	$(45/40)^2$
Resultado	0.7	1.26

Cuadro 5: Razón de intensidades en T_{MB} entre otros telescopio y la antena de 40m para emisión de fuentes puntuales.

La Fig. 11 muestra una selección de líneas a distintas frecuencias y de distintas fuentes observadas con el radiotelescopio de 40m tras el cambio de la membrana en escala de T_{MB} . La conversión desde T_A^* se ha obtenido mediante la expresión $T_{MB} = T_A^*/\eta_{MB}$ y los resultados de la Tabla 4. Como ya se ha advertido, la resolución espectral varía dependiendo de los datos con los que se pretende hacer la comparación y viene reflejada en la Tabla 6.

La Tabla 6 muestra los resultados de la comparación llevada a cabo. Como resultado final, se ha estimado una η_{MB} teórica calculada para los otros telescopios asumiendo el valor de η_{MB} para el 40m obtenido en este informe y la razón teórica entre las intensidades dada en la Tabla 5. Este valor teórico puede compararse con el valor de esta eficiencia dado en las referencias.

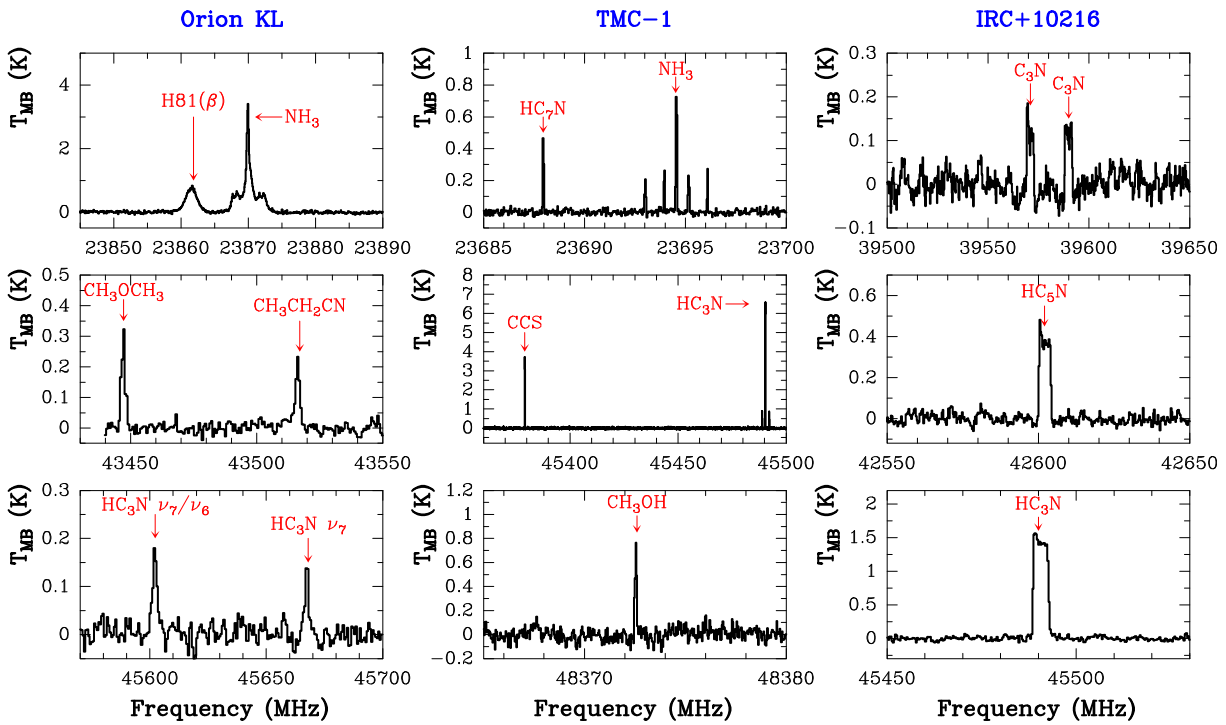


Figura 11: Selección de líneas a distintas frecuencias y de distintas fuentes observadas con el radiotelescopio de 40m tras el cambio de la membrana.

Recordando previamente la incertidumbre de este tipo de comparaciones apuntada más arriba, podemos observar en la Tabla 6 que los valores de η_{MB} teóricos resultan ser en torno a un factor 2 menores que los dados en las referencias [6] y [4] en 45 GHz. Este resultado por sí solo, implicaría o una mejor eficiencia del 40m que la que muestran nuestros resultados de las observaciones de continuo o que los otros autores han sido demasiado optimistas en el cálculo de sus eficiencias.

Por otro lado, los valores de [3] están por debajo de los que obtenemos con una $\eta_{MB} = 0.30$ para el 40m. Este resultado apunta a la dirección contraria del resultado anterior, es decir, que nuestra eficiencia podría ser un factor 1.3 más baja que la medida. Es interesante señalar que BT en observaciones del 2014 realizadas con el 40m hacia IRC+10216 obtuvo un valor de $\eta_{MB} = 0.35$ comparando las líneas de C_6H a 48.5 GHz con aquellas proporcionadas por [3] y realizando la operación contraria, esto es, asumir la η_{MB} de 0.75 de [3] como el factor invarian-

Orión KL											
Línea	40m			Otros					Comparación		
	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Telescopio	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Refs.	Razón ⁽¹⁾	η_{MB}	Calculada ⁽²⁾
H81(β)	76 kHz	0.56	0.8	Effelsberg 100m	61 kHz	†	0.5	[2]	0.89	††	
NH ₃ 3-3	76 kHz	0.56	3.4	Effelsberg 100m	61 kHz	†	5.0	[2]	1.47	††	
CH ₃ OCH ₃	0.6 MHz	0.30	0.33	Robledo 34m	0.7 MHz	0.52	0.095	[6]	0.29	0.21	
CH ₃ CH ₂ CN	0.6 MHz	0.30	0.23	Robledo 34m	0.7 MHz	0.52	0.065	[6]	0.28	0.21	
HC ₃ N ν_7/ν_6	0.6 MHz	0.30	0.18	Robledo 34m	0.7 MHz	0.52	0.07	[6]	0.39	0.28	
HC ₃ N ν_7	0.6 MHz	0.30	0.14	Robledo 34m	0.7 MHz	0.52	0.05	[6]	0.36	0.26	

TMC-1											
Línea	40m			Otros					Comparación		
	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Telescopio	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Refs.	Razón ⁽¹⁾	η_{MB}	Calculada ⁽²⁾
HC ₇ N	38 kHz	0.56	0.47	Nobeyama 45m	37 kHz	0.67	0.67	[4]	1.42	0.76	
NH ₃ (1-1)	38 kHz	0.56	0.72	Nobeyama 45m	37 kHz	0.67	1.06	[4]	1.47	0.78	
CCS	38 kHz	0.30	3.76	Nobeyama 45m	37 kHz	0.75	2.28	[4]	0.61	0.36	
HC ₃ N	38 kHz	0.30	6.56	Nobeyama 45m	37 kHz	0.75	4.81	[4]	0.73	0.44	
CH ₃ OH	38 kHz	0.30	0.77	Nobeyama 45m	37 kHz	0.75	0.35	[4]	0.45	0.27	

IRC+10216											
Línea	40m			Otros					Comparación		
	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Telescopio	δ	η_{MB}	T_{MB} (K)	Refs.	Razón ⁽¹⁾	η_{MB}	Calculada ⁽²⁾
C ₃ N	0.3 MHz	0.30	0.18	Nobeyama 45m	0.25 MHz	0.75	0.27	[3]	1.50	0.89	
C ₃ N	0.3 MHz	0.30	0.14	Nobeyama 45m	0.25 MHz	0.75	0.22	[3]	1.57	0.94	
HC ₅ N	0.3 MHz	0.30	0.49	Nobeyama 45m	0.25 MHz	0.75	0.80	[3]	1.63	0.97	
HC ₃ N	0.3 MHz	0.30	1.58	Nobeyama 45m	0.25 MHz	0.75	3.20	[3]	2.03	1.21	

Cuadro 6: Comparación entre la intensidad de una selección de líneas espectrales observadas con el 40m y con otros telescopios.

(¹): T_{MB} (Otros) / T_{MB} (40m).

(²): η_{MB} teórica calculada para los otros telescopios asumiendo el valor de η_{MB} obtenido en este informe y la razón teórica entre las intensidades dada en la Tabla 5.

†: Los autores dan una conversión de 1.4 K/Jy con T_{MB} .

††: Si asumiéramos la razón teórica entre intensidades de $(100/40)^2$, las intensidades de las líneas de Effelsberg serían 6.25 veces mayores que las del 40m. En ese caso, la conversión K/Jy de Gong et al. estaría subestimada un factor ~ 4 . Nótese que esta comparación carece de sentido (ver texto).

te. En esta ocasión, los datos tomados tras la colocación de la nueva membrana no poseen la relación S/N suficiente para detectar estas líneas de C_6H y poder realizar esta comparación de nuevo. Este resultado, otra vez por sí solo, apuntaría al deterioro de la eficiencia con el tiempo que parece haber sufrido el telescopio.

Con respecto a los datos a 22 GHz, podemos destacar cómo una comparación con las observaciones del telescopio de Effelsberg nos proporcionaría el resultado con el factor más elevado de discrepancia (un factor 4 en la conversión K/Jy dada por [2]). Como ya hemos dicho, no creemos que los resultados de dos telescopios con la diferencia del diámetro del reflector principal tan elevada puedan ser comparables salvo para fuentes puntuales puras o en aquellas donde el tamaño de la fuente estuviera bien determinado y pudiera realizarse una convolución precisa. Por último, los resultados obtenidos para TMC-1 a 22 GHz (comparación con [4]) son los únicos en donde apenas habría conflicto entre las eficiencias comparadas (factor 1.16).

En definitiva, no hay conclusiones definitivas sobre la eficiencia que puedan extraerse de la comparación de las líneas espectrales observadas con el 40m y aquellas adquiridas con otros instrumentos. Para minimizar la incertidumbre referente a la propia observación como podría ser los errores de apuntado, sería interesante que los usuarios del 40m realizaran periódicamente comparaciones sencillas con los datos de otros telescopios y de las propias del 40m anteriores con el fin de contar con una muestra significativa que permita realizar una labor comparativa más amplia.

6. Conclusiones

La eficiencia de apertura que medimos con la membrana nueva parece ligeramente inferior a la eficiencia con la membrana antigua, aunque la escasez de los datos no permite afirmar tal cosa de manera categórica. Lo que sí podemos concluir es que la membrana supone una caída ligera de la eficiencia: con la membrana nueva, esta es del orden de 3-4 % menor que sin membrana. En cualquier caso, el efecto provocado por ambas membranas no supone un descenso alarmante de la eficiencia del telescopio. Aún siendo los efectos en la eficiencia similares, cabe destacar que, a fecha de hoy (transcurridos dos meses desde el cambio de la membrana) usuarios del radiotelescopio de 40m (J. R. Pardo, comunicación privada) han apreciado beneficios en el cambio de la membrana a la hora de realizar observaciones astronómicas. Concretamente, parece que las observaciones en condiciones atmosféricas adversas (humedad relativa elevada o pequeñas lloviznas) han mejorado significativamente con el cambio de membrana. Es posible que la antigua membrana absorbiera una cantidad mayor de vapor de agua y eso, inevitablemente, se hallara reflejado a la hora de realizar observaciones.

En cualquier caso, las eficiencias de apertura que medimos tras el cambio de membrana a todas las frecuencias observadas son, en nuestra opinión, inaceptablemente bajas. La caída progresiva de la eficiencia, evidenciada en las figuras 8 y 10, es lo bastante grave como para dedicar cuantos recursos sean necesarios a su solución.

A este respecto, consideramos que la primera medida a tomar debería ser la realización de nuevas medidas de holografía a gran resolución y el subsiguiente ajuste de los paneles. De no solucionarse el problema de ese modo, estaríamos ante la constatación de un problema no resuelto que provoca una fuerte caída de la eficiencia y que debemos encontrar. En nuestra opi-

nión, uno de los candidatos que nos impedirían llegar siquiera cerca de la eficiencia teórica ideal sería una fuerte componente de astigmatismo, tal y como parecen indicar las últimas medidas de holografía, realizadas en 2012 ([5]). Además de estas nuevas medidas de holografía, proponemos medir (i.e. realizar un cartografiado de) el haz del telescopio a diferentes elevaciones, con el fin de extraer más información que nos ayude a dar con una solución definitiva al problema.

En caso de que la mayor fuente de pérdida de eficiencia se deba, en efecto, al astigmatismo, será necesario, a nuestro juicio, regular la temperatura de la estructura del primario de manera que no haya diferencias de temperatura entre diferentes partes del primario que den lugar a un fuerte astigmatismo. Esto podría hacerse bien mediante la instalación de una ventilación adecuada en la estructura trasera del primario, bien mediante actuadores en los diferentes paneles que la componen. Cada uno de estos métodos presenta ventajas e inconvenientes en cuanto a su coste, implementación y mantenimiento, que será necesario abordar de cara a que la antena de 40m sea realmente competitiva en el terreno radioastronómico.

6.1. Nota sobre futuras medidas de la eficiencia

De cara a que las futuras medidas de la eficiencia de apertura a diferentes frecuencias sean lo más precisas posibles, los autores sugerimos estudiar la implantación de nuevas pautas. En concreto:

- Instalar cargas frías viables para ser utilizadas durante la calibración, en lugar de utilizar la temperatura del cielo extraída de un modelo.
- Realizar *skydips* para evaluar correctamente la opacidad, τ .
- Prescindir de las observaciones de Venus en favor de observaciones de Marte. El motivo es la mayor incertidumbre en el flujo de Venus debido a que presenta fases y una atmósfera en rápida rotación, y que no se comporta como un cuerpo negro (a juzgar por el modelizado ofrecido por ASTRO), además de su tamaño considerablemente mayor que el del planeta rojo. (Nótese, sin embargo, que con la eficiencia de apertura actual, los intentos por observar Marte a 22 GHz con suficiente señal a ruido han sido totalmente infructuosos.)
- Estudiar mejor los flujos ofrecidos por ASTRO y buscar una solución mejor, de ser necesario: los flujos de ASTRO responden a una extrapolación realizada a partir de datos tomados a frecuencias superiores a los 100 GHz y no documentados. Con la ayuda de A. Fuente, se contactó con los desarrolladores de GILDAS para conocer con exactitud cómo se realizaba la extrapolación. Para Venus, Urano y Neptuno usa un índice espectral de -0.35 para extrapolar la temperatura de brillo a frecuencias menores, y para Marte la reescala de acuerdo a la distancia heliocéntrica (J. Boissier, comunicación privada). Una posible solución pasaría por la petición a Effelsberg o a Green Bank de los datos que usan en dichos observatorios para calibrar la eficiencia de apertura de sus radiotelescopios.

6.2. Nota sobre problemas adicionales encontrados en estas observaciones

Durante este trabajo se encontraron diversos problemas en el funcionamiento general del radiotelescopio. Con la colaboración de F. J. Beltrán, V. Bujarrabal, J. González, J. A. López-Pérez, M. Patino, P. Sánchez y P. de Vicente ha sido posible encontrar soluciones:

- En las medidas de continuo se encontraba una diferencia muy significativa en la intensidad de las observaciones dependiendo de la polarización (este problema no se observaba en líneas espectrales). Además, las T_{sys} para ambas polarizaciones resultaban sospechosamente similares. Las intensidades variaban proporcionalmente al cambiar la potencia de entrada del receptor y el problema se intercambiaba al cambiar los cables (la fibra) de entrada a cada canal del detector. Tras varias pruebas, se detectó el problema (provocado por un error de software) y fue solucionado.
- Problemas adicionales de software que fueron solucionados y que provocaban también la diferencia de intensidad de las medidas astronómicas entre LCP y RCP se hallaron al realizar medidas en continuo y en pseudocontinuo simultáneas a 22 y 45 GHz.
- A 22 GHz el ruido de la polarización LCP era significativamente mayor que el de la RCP. Para encontrar el causante de este deterioro se realizaron medidas de ruido del receptor con nitrógeno. Se concluyó que la temperatura del receptor no era significativamente diferente para cada polarización. Tras esto, se comprobaron los cables de fibra óptica de la segunda frecuencia intermedia que llegan a los backends y fue en uno de los cables donde se encontró el problema. Con el reemplazo del cable de fibra óptica quedó solucionado el problema.

Referencias

- [1] Baars, J.W.M., “The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication: Theory and Practice”, 2007, Springer Science & Business Media
- [2] Gong et al., 2015, A&A, 581, A48
- [3] Kawaguchi et al., 1995, PASJ, 47, 853
- [4] Kaifu et al. 2004, PASJ, 56, 69
- [5] López-Pérez, J. A., en preparación
- [6] Rizzo et al. 2017, A&A, 605. A76
- [7] Rodríguez, M., Gómez-Garrido, M., & de Vicente, P., 2017, IT-OAN 2017-12
- [8] de Vicente, P., et al., 2016, A&A, 589, 74
- [9] P. de Vicente, 2010, IT-OAN 2010-10
- [10] P. de Vicente, 2012, IT-OAN 2012-09