

# 6

## Observación de Titán mediante fotometría de banda estrecha en la banda del metano de 890 nm

Antoni Ardanuy, Carme Bastús, Ricard Casas

*(Agrupación Astronómica de Sabadell)*

### Resumen / Abstract

**Objetivo:** Medida de la actividad atmosférica del satélite Titán mediante la observación de la variabilidad en la banda del metano.

**Método:** Fotometría de banda estrecha en la banda del metano de 890 nm con un telescopio terrestre.

**Resultados:** Se han detectado problemas en las medidas realizadas en la banda de referencia de 940 nm y se ha creado un modelo para su resolución.

**Conclusiones:** La fotometría de banda estrecha en estas regiones espectrales requiere tener presente la existencia de moléculas de la atmósfera terrestre absorbentes en estas longitudes de onda.

***Aim:** To measure the atmospheric activity of the satellite Titan by observing its variability in the methane band.*

***Method:** Narrow-band photometry with a terrestrial telescope in the wavelength 890 nm corresponding to methane.*

***Results:** Some problems in the measures have been detected in the reference region of the 940 nm. A model has been developed to solve them.*

***Conclusions:** Narrow-band photometry in these spectral regions requires taking into account the existence of molecules absorbent at these wavelengths in the earth's atmosphere.*

## Introducción

Titán es el mayor satélite de Saturno, con un diámetro del orden de los 5.000 km, una atmósfera predominantemente de nitrógeno (94%) y metano (5%), y temperaturas del orden de  $-179$  °C. En estas condiciones de temperatura, el metano sufre un ciclo muy similar al del agua en la Tierra: existen lagos de metano líquido, se evapora y llueve, incluso con tormentas. La diferencia es que llueve metano en lugar de agua.

Estas tormentas presentan una actividad que, a priori, se puede detectar ópticamente y para ello en la edición de diciembre de 2005 de la Convención de Observadores, que organiza bianualmente la Agrupación Astronómica de Sabadell, el investigador planetario Agustín Sánchez-Lavega propuso un método basado en realizar fotometría del satélite, utilizando la banda del metano a 890 nm. En esta banda se podría detectar la variación de la luminosidad debido a la fuerte absorción atmosférica de Titán y, por tanto, sensible a los cambios en su atmósfera. El método propuesto consiste básicamente en comparar la señal recibida en esta banda con otra de referencia que sea estable.

Las bandas de observación propuestas para realizar el experimento están en la región espectral del infrarrojo cercano y son:

- **890 nm:** banda del metano, caracterizada por:
  - Presentar una fuerte absorción del metano atmosférico de Titán en esta longitud de onda.
  - Posibilidad de revelar el comportamiento de la atmósfera como ya se ha explicado, detectando y midiendo la variabilidad en las medidas fotométricas debido a la actividad atmosférica.
- **940 nm:** banda del llamado *continuo*, también caracterizada por:
  - La atmósfera del satélite resulta transparente en esta banda y por tanto permite observar la superficie del satélite.
  - Se puede emplear como banda de referencia respecto a la anterior por estar libre del efecto de absorción del metano atmosférico de Titán.

En la figura 1 se muestra un espectro de la atmósfera de Titán, apreciándose perfectamente la banda de 890 nm, sobre la cual se va a realizar las medidas correspondientes. También se aprecia como en la longitud de

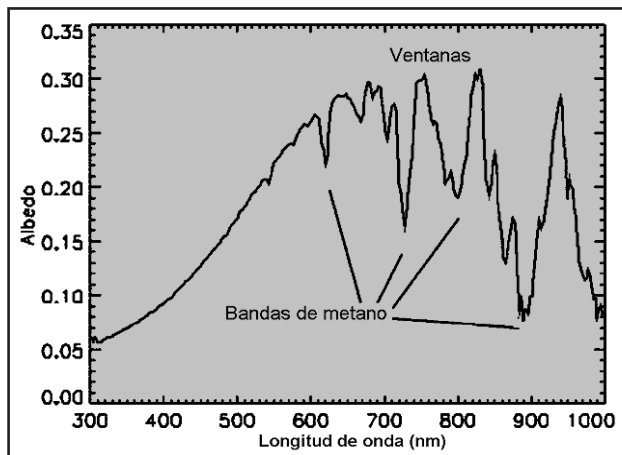


Figura 1. Bandas de 890 y 940 nm en la observación de Titán.

onda de 940 nm hay una ventana de observación de la superficie del satélite.

## Observaciones

El equipo necesario para realizar las medidas está al alcance de muchos aficionados. Hay que tener en cuenta que Titán es un objeto relativamente brillante (8ª magnitud en el visible) pero las medidas se van a realizar dentro de la región del infrarrojo próximo, lo cual lleva a tomar algunas precauciones. La abertura necesaria es relativamente modesta, pero a mayor abertura, mayor relación señal a ruido para la misma cámara y el mismo tiempo de exposición. Telescopios de aberturas grandes pueden saturar la imagen de Titán si los tiempos de exposición son demasiado largos. Sin embargo, por otra parte son necesarias longitudes focales relativamente largas para separar adecuadamente al satélite del planeta, el cual perturba las medidas con su luz.

Otra precaución a tomar es sobre la cámara empleada, que debe ser sensible al infrarrojo cercano. Si bien la mayoría de las cámaras CCD lo son, hay que comprobar previamente la curva de respuesta del chip empleado, puesto que posteriormente va a ser necesario conocerla y evitará la sorpresa de estar tomando imágenes en una zona en que la cámara puede no tener sensibilidad (también hay que tener en cuenta que el uso de filtros de banda estrecha reduce notablemente la cantidad de luz recibida). Si la

cámara lleva algún tipo de filtro infrarrojo, hay que retirarlo obligatoriamente.

Se puede resumir el equipo necesario en:

- Un telescopio con abertura modesta, aunque mayor abertura, mejor relación señal a ruido.
- Cámara CCD monocroma sensible en las bandas de medida. Hay que tener en cuenta que las dos bandas están en el infrarrojo y que alguna cámara puede no ser suficientemente sensible.
- Filtros de banda estrecha (10 nm) en las bandas de interés: 890 nm (metano) y 940 nm (continuo).

En el presente trabajo se han realizado las observaciones con el equipo estándar del observatorio de la Agrupación en Sabadell, que consiste en:

- Telescopio Newton de 500 mm,  $f/4$ , lo que equivale a 2 m de focal.
- Cámara CCD FLI-CM9 (512 x 512 píxeles).
- Filtros de banda estrecha (10 nm, de la marca Edmund Optics), 890 nm y 940 nm.
- Software de procesado básico: Astroart.

En cuanto al procesado y a los programas necesarios basta emplear cualquiera que pueda realizar una reducción estándar (*darks* y *flats*) y una medida fotométrica, no relativa, sino absoluta (cuentas o flujo del objeto medido).

La técnica empleada es muy parecida a la de la observación de estrellas variables, aunque ligeramente modificada. En lugar de emplear una estrella de referencia se utiliza el propio objeto como referencia, pero en otra banda de observación en la que la luz recibida sea estable. En concreto, en este caso se emplea la banda del continuo (940 nm) como referencia y se mide la otra banda (890 nm). Así, pues, al final basta con hacer el cálculo de la relación de flujos en las dos bandas:

$$\frac{\text{flujo 890 nm (variable)}}{\text{flujo 940 nm (referencia)}}$$

Un problema práctico que aparece durante la observación es la presencia muy cercana del planeta Saturno. De hecho, focales de los telescopios demasiado cortas pueden arruinar la observación y, según se ha comentado con anterioridad, es preferible emplear telescopios de focal larga. La presencia de la luz difusa de Saturno es difícil de evitar incluso con el empleo de



Figura 2. **Izquierda:** Imagen de Saturno y Titán en la banda de 890 nm. **Derecha:** Los mismos objetos en la banda de 940 nm. Véase que debido a la menor sensibilidad de la cámara en esta región del espectro aparece más ruido de fondo.

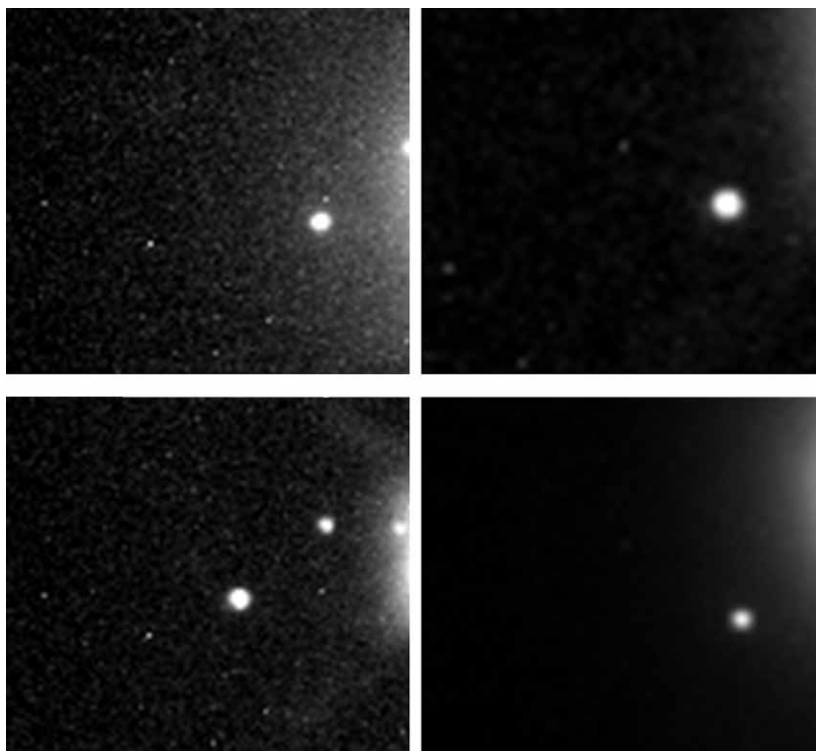


Figura 3. Diferentes imágenes en las que se advierte la dificultad de separar Titán del planeta Saturno y cómo la luz de éste perturba la imagen. **Arriba:** Imágenes en la banda de 890 nm. **Abajo:** Imágenes en la banda de 940 nm.

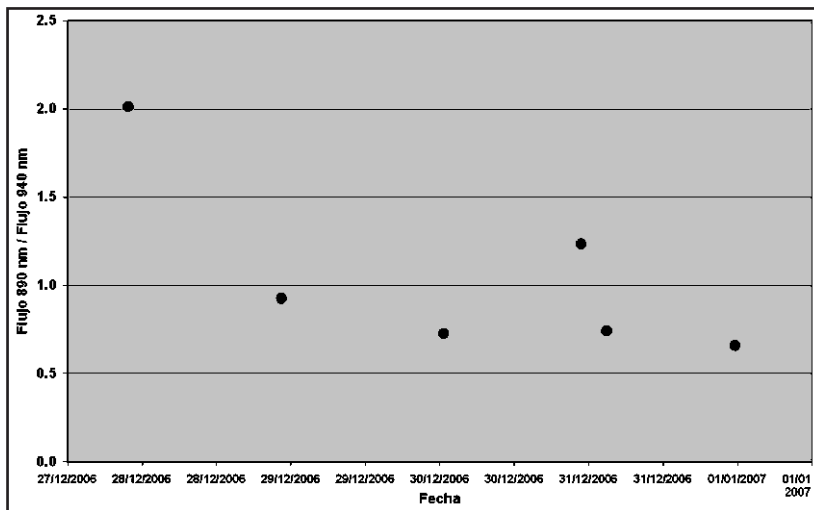


Figura 4. Datos de relación de flujos representados según la fecha de observación.

filtros, como se observa en las figuras 2 y 3. Para reducir la dispersión de la luz es importante mantener las partes ópticas limpias de polvo y humedad.

## Análisis de los primeros resultados

Se realizó una campaña de medidas durante la temporada de visibilidad de Saturno en los años 2006 y 2007. A partir de las observaciones y la reducción de las imágenes según el procedimiento estándar con *darks* y *flats*, se calculó la relación de flujos a 890 nm y 940 nm para cada observación, representando los datos en una gráfica según la fecha de observación, como se muestra en la figura 4. El resultado es especialmente sorprendente por la elevada variabilidad, que se muestra muy por encima de lo esperado, y que indica que seguramente hay algún factor que afecta a las medidas realizadas.

Una manera de averiguar la razón que causa esta elevada variabilidad es emplear en el eje de abscisas otra variable diferente, como, por ejemplo, la altura del objeto sobre el horizonte en el momento de la observación, sobre la que recae la sospecha de que tiene alguna influencia en los resultados. Se muestran los puntos alineados en una curva mucho más familiar, una curva que decae con la altura sobre el horizonte (figura 5). Esta información aporta más pistas sobre qué puede estar sucediendo. Es más, se puede

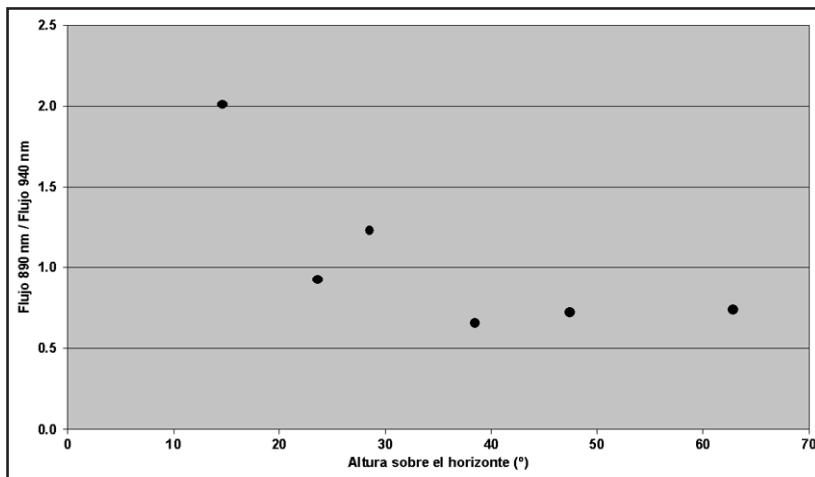


Figura 5. Resultado de representar los datos según la altura sobre el horizonte y no según la fecha. Aparentemente la alineación se parece a una curva del estilo de una exponencial decayendo.

suponer que la caída tiene que ver con algún componente de la atmósfera terrestre más que con cualquier otra variable externa, por la mencionada dependencia con la altura sobre el horizonte (o distancia cenital, que resulta equivalente pero en sentido opuesto).

Realizando un análisis más detallado de la situación, se puede hacer un encadenamiento lógico de factores. La atmósfera terrestre contiene vapor de agua y éste presenta una banda de absorción importante a 940 nm. Por lo tanto, el problema más importante para medir la atmósfera de Titán es la propia atmósfera terrestre, principalmente si se eligen las bandas mostradas. Estas bandas fueron propuestas seguramente a raíz de observaciones realizadas con el Telescopio Espacial Hubble, con el que obviamente no se necesita tener en cuenta la atmósfera de la Tierra. Pero a nivel de suelo, la banda de 940 nm se usa precisamente para medir el contenido de vapor de agua en la atmósfera terrestre.

La absorción atmosférica es variable en la banda de referencia de 940 nm, correspondiente al vapor de agua, cuando realmente se esperaba que fuera fija. En cambio, en la banda de 890 nm no se produce esta absorción tan acusada. Así, pues, la referencia teórica de 940 nm no sirve. La conclusión es que las dos bandas elegidas son variables, una porque es influida por la

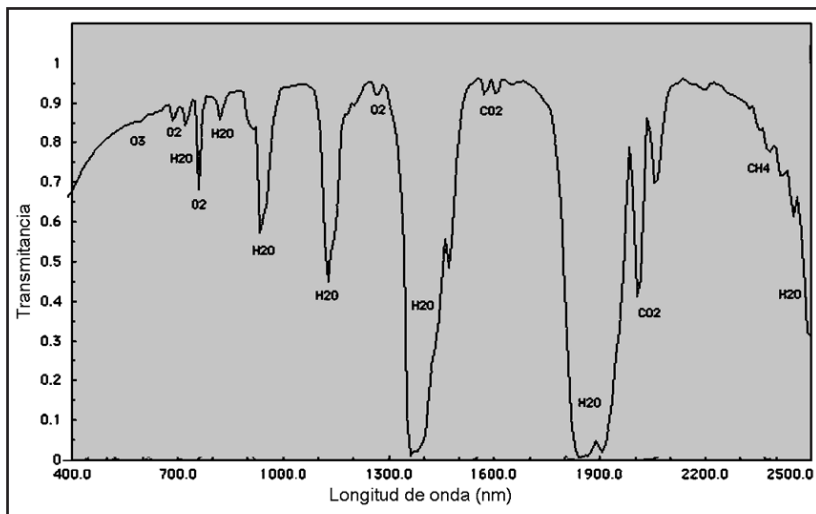


Figura 6. Datos de transmitancia atmosférica a diferentes longitudes de onda según Landsat. ©.

presencia del metano atmosférico de Titán y la otra por la influencia de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera terrestre. En consecuencia la relación de flujos resulta también variable, pero en un sentido totalmente impredecible si no se realizan correcciones adecuadas en las observaciones.

Se ha ideado un modelo de absorción atmosférico, simple de calcular con datos fáciles de obtener de estaciones meteorológicas, principalmente para las observaciones ya realizadas a fin de poder así corregir los errores detectados. Si bien no es preciso ni perfecto, permite evaluar el impacto del efecto del vapor de agua terrestre y corregir en gran parte su influencia.

La figura 6 muestra una gráfica de la absorción atmosférica terrestre calculada para los satélites de observación Landsat. Se observa claramente que hay una fuerte absorción en el entorno de los 940 nm debida al vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Esta absorción es mínima a 890 nm. Para verificar estos datos, se construyen unas gráficas con la base de datos espectrales HITRAN (la de más alta resolución espectral existente, aunque hay otras de baja resolución). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7. En ambas gráficas se representa la transmitancia (el factor inverso de la absorción) en función de la longitud de onda para las dos regiones de interés. Se puede observar perfectamente en la gráfica de HITRAN como en la región de los 890 nm



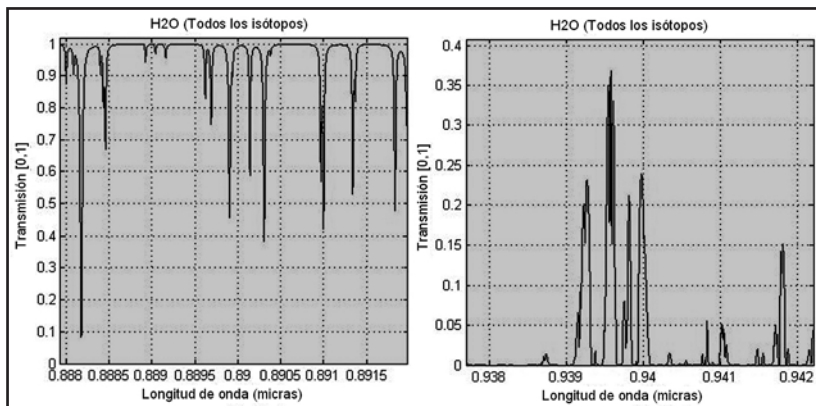


Figura 7. Representación de datos de la base espectral HITRAN en las dos longitudes de onda de interés. En el eje de ordenadas (eje Y) está la transmitancia (la inversa de la absorción) y en el eje X la longitud de onda. Nótese que la longitud de onda está expresada en micras; por lo tanto, hay que multiplicar por 1.000 para pasar a nanómetros (nm), ya que 1 micra = 1.000 nm. **Izquierda:** Líneas espectrales alrededor de 890 nm para el vapor de agua. **Derecha:** Líneas espectrales alrededor de 940 nm para la misma molécula.

apenas hay líneas de absorción del H<sub>2</sub>O y, en cambio, en la región de los 940 nm la absorción es muy importante y apenas hay transmisión de luz.

Esta confirmación queda ya totalmente ratificada empleando las gráficas obtenidas con datos de estudios realizados en los observatorios de los telescopios Gemini, como se muestra en la figura 8, donde en el eje de las abscisas aparece la longitud de onda y se representan las curvas a diferentes masas de aire (relacionadas con la altura sobre el horizonte: el valor 1 de la masa de aire resulta cuando la luz proviene del cenit y atraviesa el mínimo grosor de atmósfera en el punto de observación, y a partir de ahí aumenta la cantidad de aire atravesado). Cuanta más masa de aire, más absorción. Esta es la razón por la cual los telescopios infrarrojos se sitúan en lugares elevados y secos. Por otra parte, cada gráfica está obtenida a una presión parcial de vapor de agua diferente (la presión parcial indica el contenido de vapor en el aire). De esta forma, también se observa que a más cantidad de vapor de agua, más absorción.

## Nuevos cálculos

Una vez se verificó que, efectivamente, la absorción a 940 nm es la

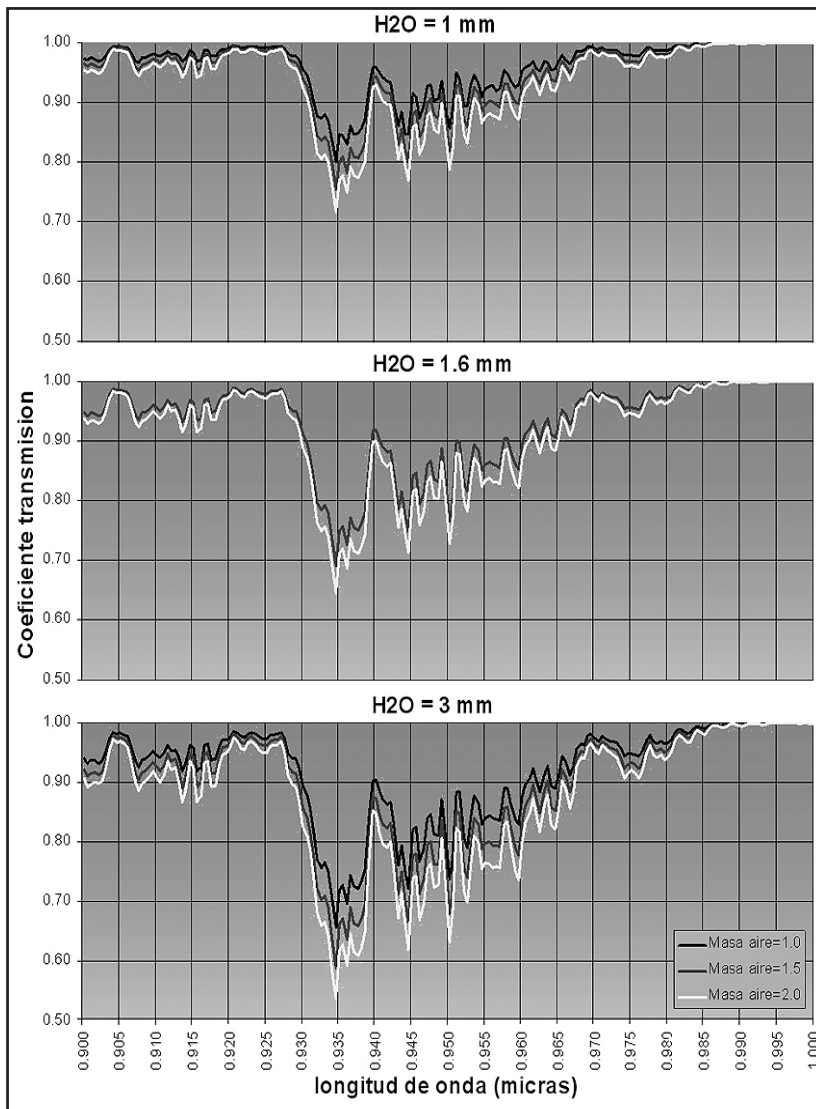


Figura 8. Datos obtenidos de los estudios realizados en los telescopios Gemini ©. Cada una representa la transmisión de luz según la longitud de onda, la masa de aire y la cantidad de vapor en la atmósfera. **Arriba:** Curvas para una presión parcial de vapor de 1 mm de mercurio. **Centro:** Las mismas curvas para una presión de 1,6 mm. **Abajo:** Las mismas curvas a una presión de 3 mm.

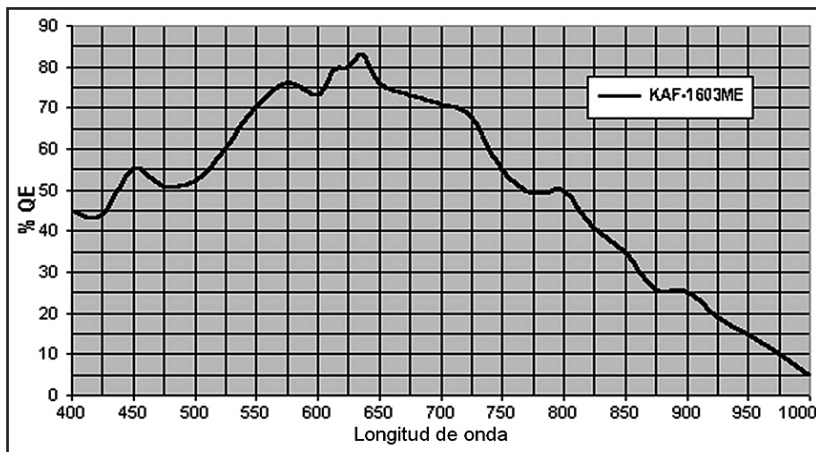


Figura 9. Ejemplo de la curva de respuesta espectral de la cámara ST-8 de SBIG.

posible fuente principal de problemas en las medidas, se intentó realizar un modelo para poder repetir los cálculos y obtener mejores resultados.

Viendo los datos de los que se puede disponer fácilmente, se emplean los siguientes:

- Respuesta espectral de la CCD a las longitudes de 890 y 940 nm, dado que existe una dependencia con la longitud de onda y en este caso importa su valor relativo. Si bien esto no sería estrictamente necesario en el caso de emplear siempre el mismo instrumento, permite normalizar el resultado para poder comparar diferentes instrumentos o si hay algún reajuste de la cámara, cambio de cámara, etc. En la figura 9 se muestra un ejemplo de curva de respuesta espectral.
- Altura sobre el horizonte del objeto en el momento de la observación para así obtener la distancia cenital y de aquí la masa de aire atravesada.
- Humedad ambiente en superficie obtenida de los datos de la estación de Meteocat (Servei Meteorològic de Catalunya) en Cerdanyola, la más próxima.
- Datos de presión parcial de vapor (radiosondeo diario de la Universidad de Barcelona, en Barcelona) corregidos a la altitud de Sabadell. De este dato y del anterior se puede estimar la cantidad absoluta atravesada de vapor de agua.

Con todo ello se calculan los factores aplicados para realizar una

**Tabla 1. Cálculo de los resultados aplicando los factores de corrección explicados**

(1) Flujo 890 nm (2) Flujo 940 nm (3) Altura horizonte (°) (4) Fecha TU (5) 890 / 940 (6) Efecto CCD (7) Humedad relativa (1) (8) Presión vapor (mm Hg) (2) (9) Corrección Sabadell (0,9)								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
240450	119480	14,6	27/12/06 21:43	2,01	1,26	87%	7,38	6,642
164314	177373	23,6	28/12/06 22:27	0,93	0,58	87%	7,53	6,024
240238	330790	47,4	30/12/06 00:35	0,73	0,45	70%	6,32	5,056
164252	133239	28,5	30/12/06 22:45	1,23	0,77	84%	16,58	13,264
199165	267964	62,8	31/12/06 02:51	0,74	0,46	77%	16,58	13,264
806741	22356	38,4	31/12/06 23:35	0,66	0,41	81%	15,42	12,336

(1) Distancia cenital (rad) (2) r (masas de aire) (3) $\alpha$ 890 nm (4) $\alpha$ 940 nm (5) Atenuación 890 (6) Atenuación 940 (7) 890 corregida (8) 940 corregida (9) 890 / 940								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1,32	3,92	0	0,344	1,000	0,260	751406	2300483	0,327
1,16	2,49	0	0,323	1,000	0,447	513481	1983449	0,259
0,74	1,36	0	0,289	1,000	0,675	750744	2449567	0,306
1,07	2,09	0	0,533	1,000	0,328	513288	2031307	0,253
0,47	1,12	0	0,533	1,000	0,549	622391	2438878	0,255
0,90	1,61	0	0,509	1,000	0,441	252106	1386054	0,182

(1) Meteocat, Cerdanyola del Vallès.

(2) En Barcelona.

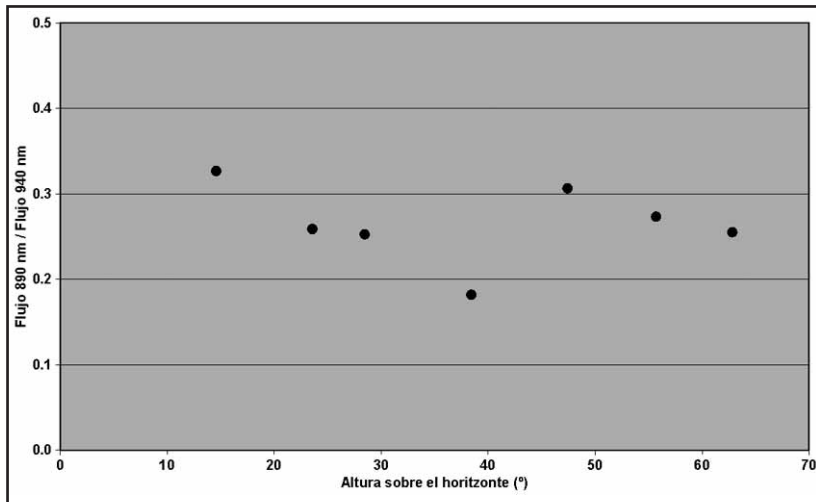


Figura 10. Nuevos resultados con la aplicación de la corrección indicada.

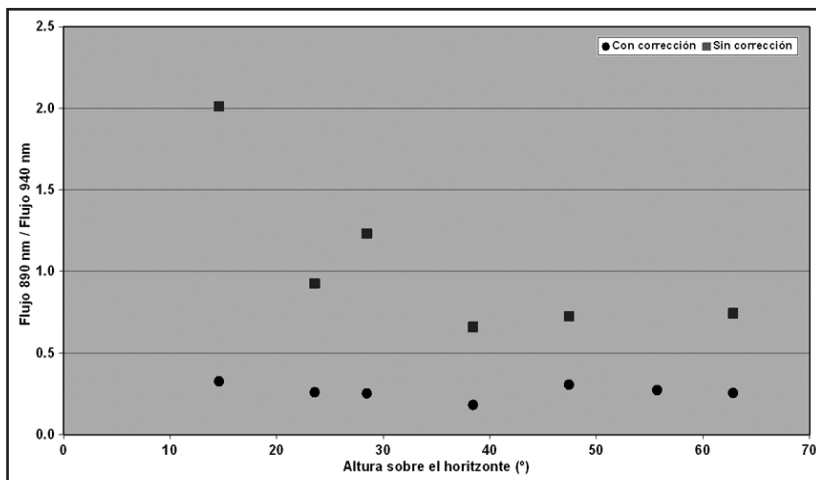


Figura 11. Comparación de los resultados obtenidos con la corrección propuesta. Si se compara con los datos originales se observa como desaparece la variabilidad extrema. Los valores del cociente de flujos también son diferentes debido a todos los factores que ahora se han aplicado.

corrección de los valores fotométricos en las dos bandas por separado, teniendo en cuenta que:

- Se considera la atenuación por vapor de agua a 940 nm.
- No se considera afectación a 890 nm (atenuación = 0, o transmitancia = 1).
- Se extrapolan los datos de los Observatorios Gemini para calcular la absorción en función de la presión parcial de vapor en la atmósfera.

De aquí se presupone un modelo de atenuación de forma exponencial, empleado usualmente en cálculos de atenuaciones:

$$\text{Transmisión} = A \cdot e^{-\alpha \cdot r}$$

donde  $\alpha = a \cdot \text{pv}^b$  (a, b son coeficientes y pv es la presión parcial del vapor de agua), r = número de masas de aire atravesadas ( $r > 1$  siempre,  $r = 1$  con el objeto en el cénit).

A partir de estos valores de atenuación se recalcularon los resultados como muestra la tabla 1 y se obtuvo la gráfica de la figura 10. Finalmente en la figura 11 se puede observar la comparación con los datos originales y se observa como ha desaparecido la variabilidad extrema original. Ahora los resultados son más coherentes con lo esperado, aunque la pequeña variabilidad remanente aún puede ser debida a las propias medidas o a los errores intrínsecos en la corrección aplicada. Haría falta calcular o medir los días de tormenta en Titán para saber si con este ruido de medida remanente es posible detectar la actividad atmosférica.

Otros efectos perturbadores y que aquí no se han analizado son, por ejemplo, la dispersión de luz de Saturno, que afectará más o menos según la proximidad del satélite al planeta.

## Conclusiones

La fotometría en bandas del infrarrojo es delicada, especialmente por la presencia del vapor de agua, además de otras moléculas de la atmósfera terrestre, fuertemente absorbente a determinadas longitudes de onda.

Es importante caracterizar bien el comportamiento del instrumental y del lugar de observación e idealmente poder observar a tanta altura sobre el nivel del mar como sea posible, y desde un lugar tan seco como también sea posible. El observatorio de Sabadell desgraciadamente no cumple ninguno de los dos requisitos; de ahí la necesidad de trabajar realizando las correcciones.



Figura 12. Efectos de la observación de Titán a diferentes bandas (misión Cassini/Huyguens). **Izquierda:** 890 nm. **Derecha:** 940 nm. © ESA/NASA.

En próximas campañas se pretende repetir las observaciones intentando utilizar un modelo de calibración de las observaciones para realizar las correcciones pertinentes. Para ello se intentará hacer uso de:

- Estrellas de calibración catalogadas próximas al objeto de observación, siempre que no sean estrellas variables.
- Corrección por altura (masa de aire atravesada) de las observaciones como en el método actual.
- Un modelo de ajuste mejorado, calculando si es posible el contenido de vapor de agua atmosférico terrestre con más precisión.
- Usar otra banda de referencia diferente de los 940 nm, que sea estable y fácil de medir, lo cual obliga a estar por debajo de los 890 nm. Por encima de los 830 nm parece una buena elección a priori, siempre que existan filtros disponibles.
- Uso del nuevo observatorio de la Agrupación en el Montsec, más alto sobre el nivel del mar y en general más seco que Sabadell. El uso de una focal mayor del telescopio también puede permitir separar mejor Titán de Saturno.