

Capítulo 2

Método experimental para mediciones de intensidades y temperaturas rotacionales de $O_2(b(0-1))$ y de $OH(6-2)$

2.1 - Instrumento y técnica de medición

El instrumento usado para medir las emisiones nocturnas de $O_2(b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$ (0-1) y de $OH(X^2\Pi)(6-2)$ es un espectrómetro con filtro interferencial inclinable que abarca el rango de longitudes de onda de 8450 a 8670 Å, con una resolución espectral de 12 a 14 Å. Fue diseñado por Scheer [1987]. La posibilidad de cubrir este rango espectral con un único filtro ha sido indicada por Noxon [1978].

Se mide en dirección cenital con una apertura de campo rectangular de 2° (este-oeste) por 0.4° (norte-sur). En promedio, cada 117s se obtiene un par de temperaturas rotacionales. El error estadístico es en ambas bandas menor a 5K, y en caso de alta intensidad de airglow menor a 3K.

En mi tesis de Licenciatura [Reisin, 1987] hice una detallada descripción de las características y de la calibración del instrumento. Aquí, se resumirán los aspectos principales de la técnica de medición.

El instrumento consiste básicamente de dos cámaras unidas a través de un tubo óptico (ver figura 2.1; [Reisin, 1987]). La cámara superior, por donde entra la luz, contiene un filtro interferencial (de 8670Å a incidencia normal) montado sobre un plato inclinador, el cual es inclinable hasta 30° mediante un mecanismo controlado por computadora. Este mecanismo consiste de un motor paso-a-paso que gira un tornillo micrométrico (no mostrado en la figura) el cual empuja el borde del plato inclinador. El rango total de giro corresponde a casi 5000 pasos del motor, dando una resolución mecánica muy fina con pasos menores a 0.1Å. Un sensor basado en un termistor permite registrar la temperatura de la cámara.

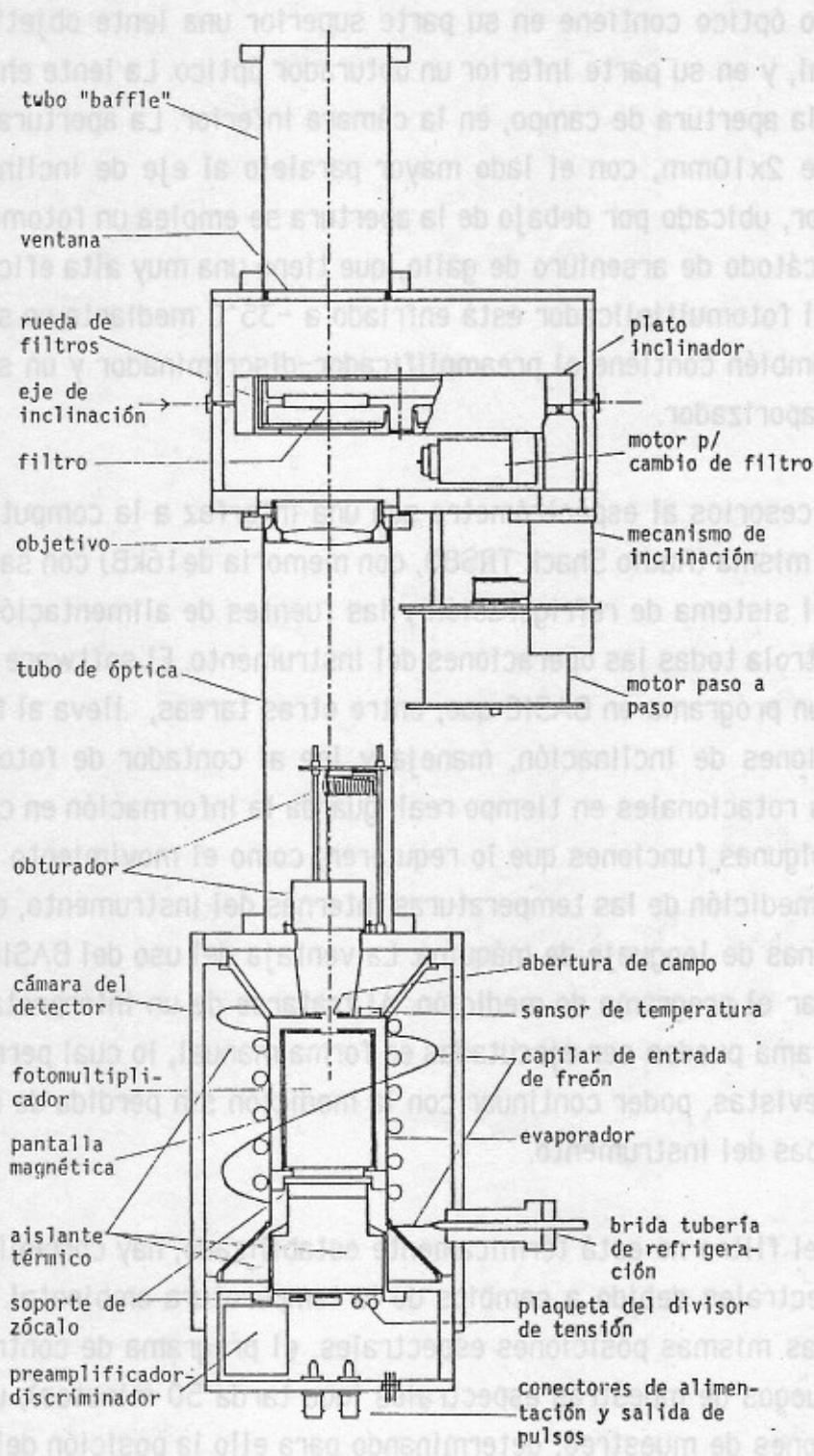


Figura 2.1: Esquema del espectrómetro utilizado.

El tubo óptico contiene en su parte superior una lente objetivo de 28 cm de longitud focal, y en su parte inferior un obturador óptico. La lente enfoca el haz incidente hacia la apertura de campo, en la cámara inferior. La apertura de campo es un rectángulo de 2x10mm, con el lado mayor paralelo al eje de inclinación del filtro. Como detector, ubicado por debajo de la apertura se emplea un fotomultiplicador RCA C31034 con cátodo de arseniuro de galio, que tiene una muy alta eficiencia de detección (17%). El fotomultiplicador está enfriado a -35°C mediante un sistema de freón. La cámara también contiene el preamplificador-discriminador y un sensor de temperatura del evaporizador.

Los accesorios al espectrómetro son una interfaz a la computadora, la microcomputadora misma (Radio Shack TRS80, con memoria de 16kB) con salida a impresora y cassette, el sistema de refrigeración y las fuentes de alimentación. La microcomputadora controla todas las operaciones del instrumento. El software correspondiente consiste en un programa en BASIC que, entre otras tareas, lleva al filtro a las diferentes posiciones de inclinación, maneja y lee al contador de fotones, calcula las temperaturas rotacionales en tiempo real, guarda la información en cassette y la imprime. Solo algunas funciones que lo requieren, como el movimiento del motor paso-a-paso y las medición de las temperaturas internas del instrumento, están implementadas en rutinas de lenguaje de máquina. La ventaja del uso del BASIC es la facilidad para modificar el programa de medición. Al tratarse de un interpretador, subfunciones del programa pueden ser ejecutadas en forma manual, lo cual permite en circunstancias imprevistas, poder continuar con la medición sin pérdida de datos y, además, facilita pruebas del instrumento.

Como el filtro no está térmicamente estabilizado, hay corrimientos en las posiciones espectrales debido a cambios de la temperatura ambiental. Para muestrear siempre en las mismas posiciones espectrales, el programa de control realiza, después de 28 juegos de muestras espectrales (que tarda 50 minutos), una reasignación de las posiciones de muestreo, determinando para ello la posición del máximo del pico P4 del OH (lo cual tarda poco menos que 5min). Por este motivo, los datos finales no son temporalmente equidistantes.

Los rasgos de las emisiones de OH en el rango espectral del instrumento son

las líneas P4, P5, P6, P7 y P8 de la banda (6-2). El instrumento cubre toda la rama R y parte de la rama P de la banda del O_2 . La figura 2.2 muestra un barrido completo del rango espectral de las emisiones nocturnas. Los dos picos a la derecha corresponden a ambas ramas de la banda del O_2 con las componentes rotacionales no resueltas. Los otros picos corresponden a las líneas rotacionales de P4 a P7 del OH, de izquierda a derecha, respectivamente. La deformación en cada uno de los flancos izquierdos de los picos de OH indica la presencia de la componente menor del doblete de spin. El doblete P8 se encuentra en la región del valle de la banda de O_2 . Las posiciones de muestreo usadas por el instrumento para la determinación de intensidades y temperaturas se indican con líneas verticales.

Para determinar las temperaturas rotacionales es necesario calcular los espectros de emisión. Para el cálculo de los niveles de energía se usan, en el caso del O_2 , las constantes moleculares dadas por Herzberg [1950] y, para el OH, las constantes de Coxon y Foster [1982]. Cada línea de longitud de onda λ tiene una velocidad de emisión por unidad de volumen del emisor (o fuerza de línea), $S(\lambda)$, que es proporcional a la probabilidad de transición espontánea (coeficiente de Einstein). Para el O_2 , las probabilidades de transición se calculan utilizando los factores de peso dados por Watson [1968] (ver Ritter y Wilkerson [1987]). Para el OH se utilizan los coeficientes de Einstein dados por Mies [1974].

Para las líneas de una banda de emisión, $S(\lambda)$ también es proporcional a la población del estado inicial que depende de la temperatura rotacional. Esta dependencia es la base para la determinación espectroscópica de la temperatura rotacional. Ya que las emisiones atmosféricas de O_2 y OH se encuentran en equilibrio termodinámico local, la temperatura rotacional coincide con la temperatura cinética y en este texto se usa directamente el término "temperatura de O_2 " (u OH). Estas temperaturas corresponden, en realidad, a un promedio pesado por el perfil de intensidades, en las respectivas capas de emisión. Según mediciones directas, la capa de O_2 (excitado) tiene un máximo de emisión a 95km de altura aproximadamente, mientras que el máximo de la capa de OH se encuentra a 87km. Ambas capas tienen un ancho (a mitad del máximo) de aproximadamente 10km.

Para determinar las temperaturas rotacionales a partir de las intensidades medidas es necesario tomar en cuenta las características del instrumento, es decir

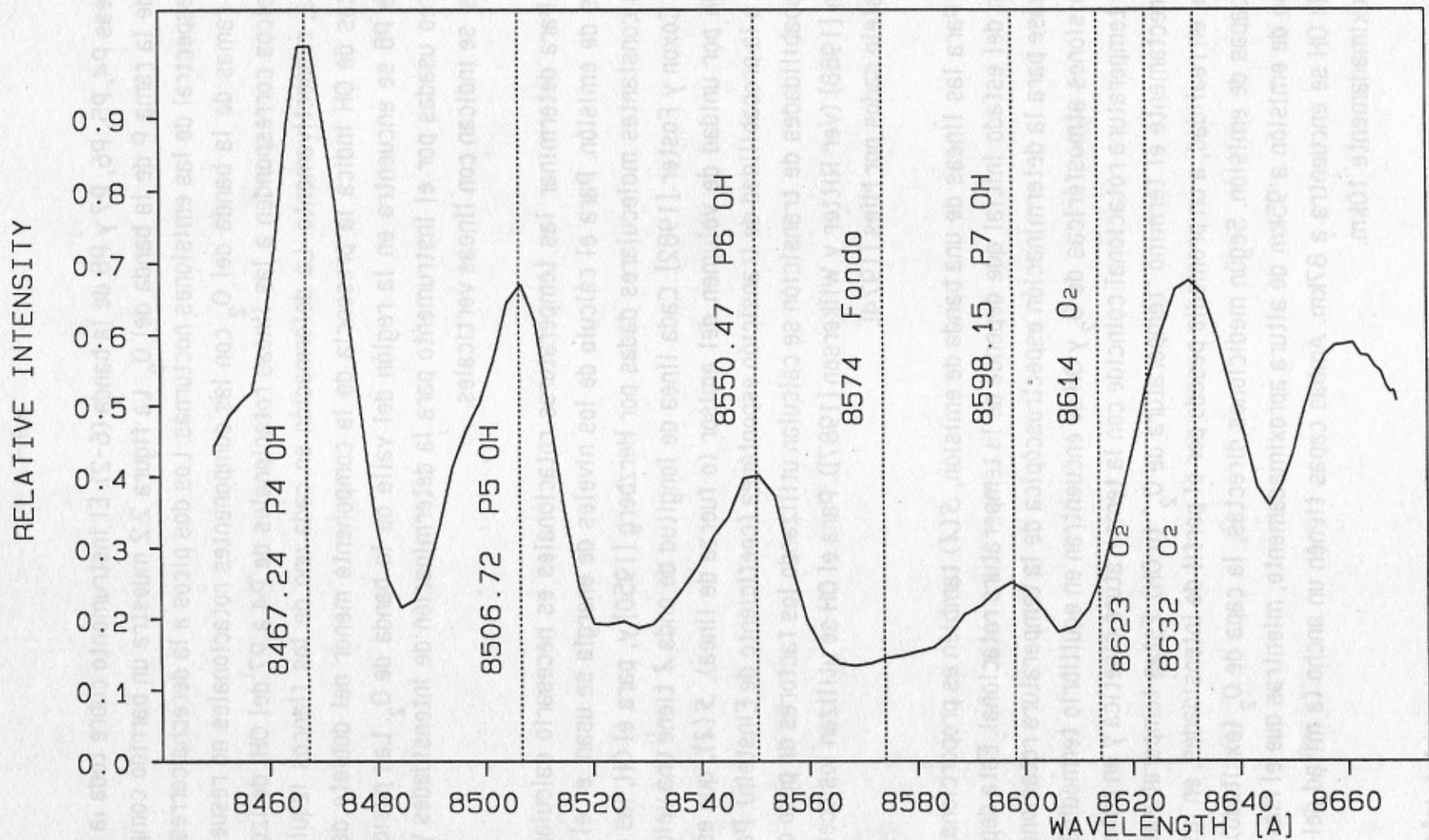


Figura 2.2: Barrido espectral del cielo nocturno.

la calibración de longitud de onda y la función del instrumento. La calibración de longitud de onda, $\lambda(\rho)$, define la longitud de onda en función de la inclinación del filtro, dada en número de pasos del motor paso-a-paso ρ . Para calibrar $\lambda(\rho)$, se utilizó 6 líneas conocidas de una lámpara de neón. $\lambda(\rho)$ también depende de la temperatura del filtro interferencial y por eso la calibración debe ser hecha en el rango de temperaturas ambientales que ocurren en la práctica.

La función del instrumento representa la forma del espectro medido por el espectrómetro expuesto a luz monocromática. Esta función puede ser factorizada como $F(\lambda, \lambda') = A(\lambda, \lambda') R(\lambda')$ donde λ' es la longitud de onda de la luz y λ la longitud de onda a la cual el instrumento está sintonizado. El factor $A(\lambda, \lambda')$ describe la resolución del instrumento y está normalizado como $A(\lambda, \lambda) = 1$ ya que toda la variación espectral de la sensibilidad se describe por $R(\lambda')$. $A(\lambda, \lambda')$ indica la parte relativa de la intensidad medida por el instrumento en λ . Para cada λ' fijo, $A(\lambda, \lambda')$ puede ser aproximado por dos funciones gaussianas diferentes, según si λ' es mayor o menor que λ . Los semianchos de estas gaussianas decrecen con λ entre 5.3Å y 4.4Å para la parte izquierda de la gaussiana ($\lambda < \lambda'$) y entre 6.6Å y 4.5Å para la parte derecha.

A partir de las fuerzas de línea y de la función del instrumento se construye para el O_2 y el OH la convolución

$$G(\lambda) = F_c \sum S(\lambda') F(\lambda, \lambda') \quad (2.1)$$

donde la suma se hace sobre todas las líneas de emisión que afectan en el rango espectral del instrumento. La constante F_c es un factor de escala y puede ser definida igual a uno ya que aquí sólo interesan las intensidades relativas. $G(\lambda)$ es denominado "espectro sintético" porque describe cómo el espectro de las emisiones moleculares sería observado por el espectrómetro. Una técnica usual para determinar temperaturas es medir un barrido total del espectro y encontrar la temperatura rotacional para la cual el espectro sintético ajuste mejor los datos.

Otra forma más eficiente es considerar los valores de $G(\lambda)$ en sólo tres ó cuatro longitudes de onda, $\lambda_1, \dots, \lambda_4$, estratégicamente elegidas para maximizar la sensibilidad con respecto a la temperatura y, en mediciones reales, minimizar el ruido esta-

dístico. A partir de estos valores se construyen los coeficientes de Shagaev [1974] como

$$\chi = \frac{G(\lambda_1) - G(\lambda_2)}{G(\lambda_3) - G(\lambda_4)} \quad (2.2)$$

Nótese que al tratarse de un cociente de intensidades, no es necesario conocer las intensidades absolutas, como ya fue mencionado. Una vez calculada, a través de los espectros sintéticos, la dependencia de χ con respecto a la temperatura rotacional puede ser utilizada directamente para obtener las temperaturas a partir de los correspondientes χ medidos.

La tabla 2.1 indica las posiciones de muestreo seleccionadas para las mediciones (ya mostradas en la figura 2.2). En las campañas anteriores a 1987, donde no se ha medido el fondo espectral, se ha utilizado para el O_2 el coeficiente de Shagaev de tres valores, $\chi = [G_8 - G_6]/[G_8 - G_7]$. Aquí se ha simplificado la notación definiendo $G_i = G(\lambda_i)$, donde los i corresponden a las longitudes de onda de la tabla 2.1. Para el OH se utilizó el esquema de cuatro valores, $\chi = [G_1 - G_3]/[G_2 - G_5]$.

Tabla 2.1: Posiciones de muestreo utilizadas en las campañas de medición.

índice	λ [Å]	fuerce
1	8467.24 (P4)	OH
2	8506.72 (P5)	OH
3	8550.47 (P6)	OH
4 *	8574	Fondo
5 **	8598.15 (P7)	OH
6	8614	O_2
7	8623	O_2
8	8632	O_2

(*) utilizado a partir de la campaña de 1987

(**) utilizado antes de 1987

Una sensible mejora en la calidad de los datos fue logrado a partir de la campaña de 1987 por la medición del fondo espectral en vez de la línea P7 del OH [Reisin, 1987]. Desde entonces, se usa para el O_2 , $x = (G_7 - G_4)/(G_8 - G_6)$ y para el OH, $x = (G_2 - G_4)/(G_1 - G_3)$.

En el cálculo de espectros sintéticos según la ecuación (2.1) no se incluye el fondo espectral debido a la luz de las estrellas, y eventualmente de la Luna, etc. En contraste, el fondo está presente en las mediciones. Sea $S_0(\lambda')$ la función continua que representa la variación espectral del fondo. La señal medida por el instrumento es

$$G'(\lambda) = \sum S(\lambda') F(\lambda, \lambda') + \int S_0(\lambda') F(\lambda, \lambda') d\lambda' \quad (2.3)$$

En primera aproximación, se puede suponer el fondo constante en todo el rango espectral, o sea

$$S_0(\lambda') = K \quad (2.4)$$

Usando (2.1) y (2.4) se puede reescribir (2.3) como

$$G'(\lambda) = G(\lambda) + KM(\lambda) \quad (2.5)$$

donde

$$M(\lambda) = \int F(\lambda, \lambda') d\lambda' \quad (2.6)$$

Usando la notación $G'_i = G'_i(\lambda_i)$ y $M_i = M(\lambda_i)$ en (2.5),

$$G'_i = G_i + KM_i \quad (2.7)$$

Como no hay líneas de emisión próximas a λ_4 (fondo espectral), $G_4 \cong 0$. Por (2.7) se tiene

$$K = G'_4 / M_4 \quad (2.8)$$

En el esquema de muestreo que incluye el fondo, es entonces posible aislar las

emisiones moleculares del fondo usando los valores conocidos G'_i y M_i

$$G_i = G'_i - G'_4 M_i / M_4 \quad (2.9)$$

Luego, se reemplazan, en los coeficientes x , los valores de G_i por la expresión (2.9) corrigiendo de este modo el fondo espectral. En el esquema de muestreo sin medición del fondo espectral (campañas anteriores a 1987), se aproxima la corrección, reemplazando directamente G_i por G'_i . Dado que, tanto el numerador como el denominador de x en (2.2), son diferencias de intensidades, al menos en primer orden, el fondo es corregido (teniendo en cuenta que las razones M_i/M_k son aproximadamente uno y que los fondos en las campañas afectadas fueron relativamente pequeños con respecto a la señal).

2.2 - Mejoras y avances en la técnica de medición

En la sección anterior se han discutido los principales aspectos de la técnica de medición. Posteriormente al trabajo de Reisin [1987] se han introducido nuevas mejoras en el procesamiento de las mediciones. Estos son, en el orden de importancia para el presente trabajo:

- 1) Determinación de las intensidades de banda.
- 2) Corrección de altos fondos causados por el espectro solar.
- 3) Recalibraciones de $\lambda(\rho)$ para todas las campañas.

El último punto no será tratado en detalle porque, al afectar únicamente los valores medios de temperaturas, no tiene impacto en el presente contexto. Sólo se menciona que se han podido compatibilizar las temperaturas e intensidades entre las distintas campañas de medición corrigiendo las variaciones en la calibración de $\lambda(\rho)$. Esto no influye en los resultados de las variaciones de marea y ondas gravitatorias.

2.2.1 - Intensidades de banda

La intensidad total de banda de la emisión molecular (también llamado "tasa de

emisión"), I_b , es un parámetro importante en el estudio de las ondas atmosféricas, porque se usa en los modelos que analizan los efectos de las ondas sobre la luminiscencia. I_b es la suma de todas las fuerzas de línea de una banda, es decir

$$I_b = \sum S(\lambda) \quad (2.10)$$

Para determinar I_b a partir de las muestras espectrales, G'_i , se utiliza el siguiente método. Se define como intensidad medida, I_m , como una combinación lineal de los G_i de la siguiente forma

$$I_m = G(\lambda_1) + G(\lambda_2) + G(\lambda_3) - C G(\lambda_4) \quad (2.11)$$

donde

$$C = \{M(\lambda_1) + M(\lambda_2) + M(\lambda_3)\} / M(\lambda_4) \quad (2.12)$$

es una constante calculable a partir de (2.6).

Usando (2.5) en (2.11) se ve que

$$I_m = G'(\lambda_1) + G'(\lambda_2) + G'(\lambda_3) - C G'(\lambda_4) \quad (2.13)$$

que es independiente del fondo espectral, K , por lo cual puede ser determinado de las mediciones aún sin conocer el fondo. Por esta característica lo llamamos "intensidad medida".

Para el muestreo que incluye el fondo espectral, se usa para el caso del O_2

$$I_m = G_8 + G_7 + G_6 - G_4(M_8 + M_7 + M_6) / M_4 \quad (2.14)$$

y para el OH

$$I_m = G_1 + G_2 + G_3 - G_4(M_1 + M_2 + M_3) / M_4 \quad (2.15)$$

Para el muestreo sin inclusión del fondo espectral, se usa para el O_2

$$I_m = G_8 + G_7 - G_6(M_8 + M_7) / M_6 \quad (2.16)$$

y para el OH

$$I_m = G_1 + G_2 + G_3 - G_5(M_1 + M_2 + M_3) / M_5 \quad (2.17)$$

(nótese que (2.16) corresponde a un esquema de tres y no cuatro posiciones de muestreo, pero que también es independiente del fondo espectral al utilizar los valores medidos G'_i).

Entonces, se pueden calcular, por una parte, las intensidades de banda I_b mediante la ecuación (2.10) para distintas temperaturas rotacionales T . Por otra parte, mediante el cálculo del espectro sintético (2.1) en las posiciones de muestreo, se pueden calcular I_m usando las ecuaciones (2.14) ó (2.16) en el caso del O_2 y (2.15) ó (2.17) en el caso del OH. Con estos elementos se obtiene la siguiente función

$$R(T) = I_m / I_b \quad (2.18)$$

Con eso, en la práctica, puede ser hallada la intensidad de banda, I_b , ya que I_m es fácilmente calculable de las mediciones, a través de (2.13). Como en el caso de las intensidades medidas, las intensidades de banda son dadas en unidades relativas.

La figura 2.3 muestra las curvas $R(T)$ para las distintas combinaciones I_m dadas por (2.14-17). La característica más saliente de las curvas de abajo (figura 2.3.b), correspondientes a las combinaciones (2.14) y (2.15), es que son crecientes. De acuerdo a (2.18), a I_m fijo, un incremento en la temperatura rotacional implica un decremento en I_b . Esto genera un acoplamiento (anticorrelación) entre las temperaturas e intensidades que debe ser tenido en cuenta en el análisis de ondas gravitatorias (ver capítulo 7). Para I_m obtenidos con las combinaciones (2.16) y (2.17) (figura 2.3.a), las curvas suben más suavemente que en los otros dos casos, y a partir de 200K, los $R(T)$ son casi constantes. Así, en este caso, el acoplamiento entre T e I_b es, afortunadamente, menores, por lo cual las intensidades de banda son menos afectadas por el mayor nivel de ruido de las temperaturas.

2.2.2 - Corrección de altos fondos

Frecuentemente en la campaña de 1990 en "El Arenosillo" (ver capítulo 3), la desviación de la luz lunar hacia el campo de vista del instrumento, a través de bruma y aerosoles, generó grandes fondos espectrales, situación no existente en las otras

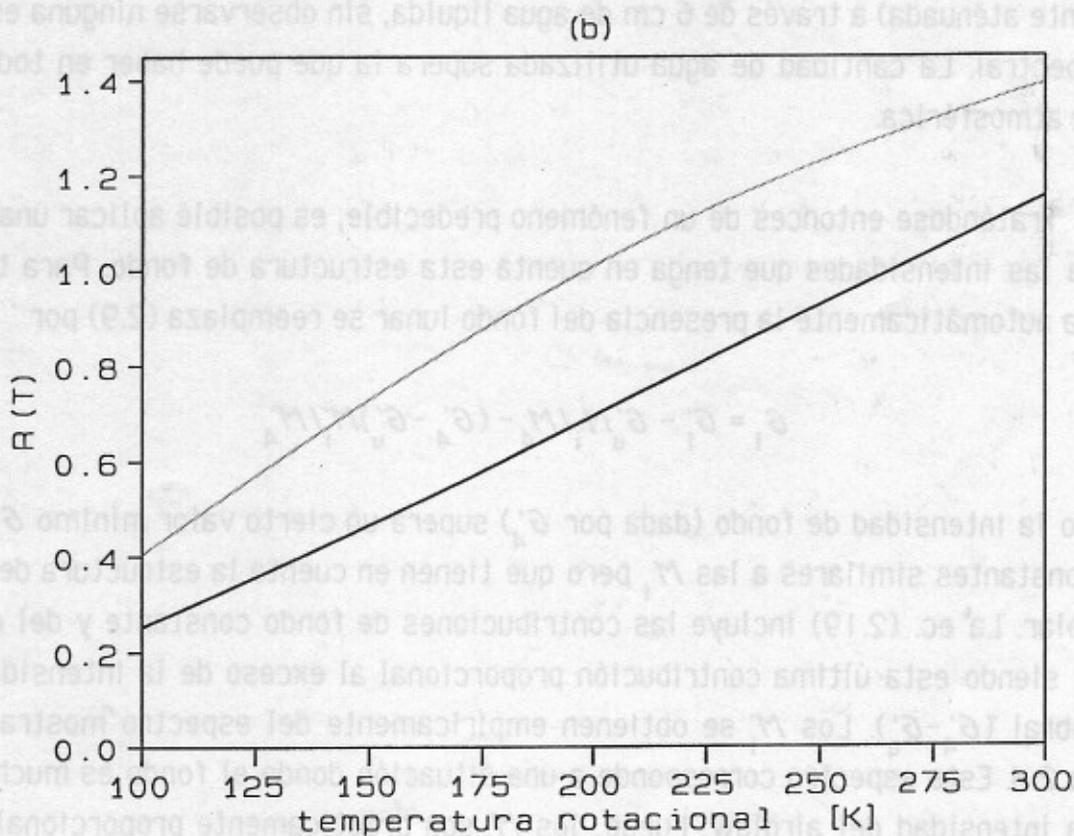
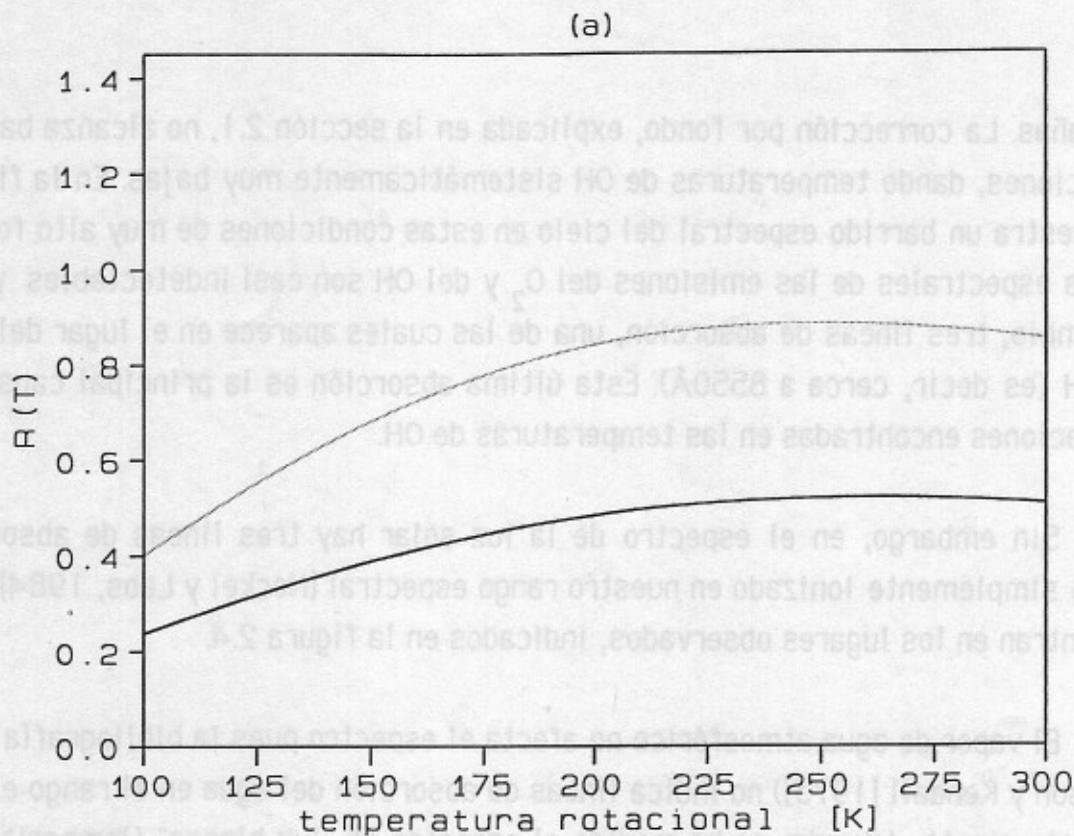


Figura 2.3: Razón de intensidad medida sobre intensidad de banda en función de la temperatura rotacional; con esquema previo a la campaña de 1987, (a), y con el esquema actual, (b). La curva llena corresponde al O₂ y la punteada al OH.

campañas. La corrección por fondo, explicada en la sección 2.1, no alcanza bajo estas condiciones, dando temperaturas de OH sistemáticamente muy bajas. En la figura 2.4 se muestra un barrido espectral del cielo en estas condiciones de muy alto fondo. Los rasgos espectrales de las emisiones del O_2 y del OH son casi indetectables y se ven, en cambio, tres líneas de absorción, una de las cuales aparece en el lugar del pico P6 del OH (es decir, cerca a 8550Å). Esta última absorción es la principal causa de las desviaciones encontradas en las temperaturas de OH.

Sin embargo, en el espectro de la luz solar hay tres líneas de absorción de calcio simplemente ionizado en nuestro rango espectral [Neckel y Labs, 1984], que se encuentran en los lugares observados, indicados en la figura 2.4.

El vapor de agua atmosférico no afecta el espectro pues la bibliografía (por ej., Harrison y Kendall [1973]) no indica líneas de absorción del agua en el rango espectral del instrumento. Además, se ha medido el espectro de "luz blanca" (lamparita incandescente atenuada) a través de 6 cm de agua líquida, sin observarse ninguna estructura espectral. La cantidad de agua utilizada supera la que puede haber en toda la columna atmosférica.

Tratándose entonces de un fenómeno predecible, es posible aplicar una corrección a las intensidades que tenga en cuenta esta estructura de fondo. Para tomar en cuenta automáticamente la presencia del fondo lunar se reemplaza (2.9) por

$$G_i = G'_i - G'_u M_i / M'_4 - (G'_4 - G'_u) M'_i / M'_4 \quad (2.19)$$

cuando la intensidad de fondo (dada por G'_4) supera un cierto valor mínimo G'_u . Los M'_i son constantes similares a las M_i pero que tienen en cuenta la estructura del espectro solar. La ec. (2.19) incluye las contribuciones de fondo constante y del espectro solar, siendo esta última contribución proporcional al exceso de la intensidad sobre el umbral ($G'_4 - G'_u$). Los M'_i se obtienen empíricamente del espectro mostrado en la figura 2.4. Este espectro corresponde a una situación donde el fondo es mucho mayor que la intensidad del airglow. Luego, los M'_i son prácticamente proporcionales a las intensidades en las posiciones de muestreo (la pequeña contribución del airglow es estimada y restada). El valor de G'_u se elige empíricamente de los valores de fondo

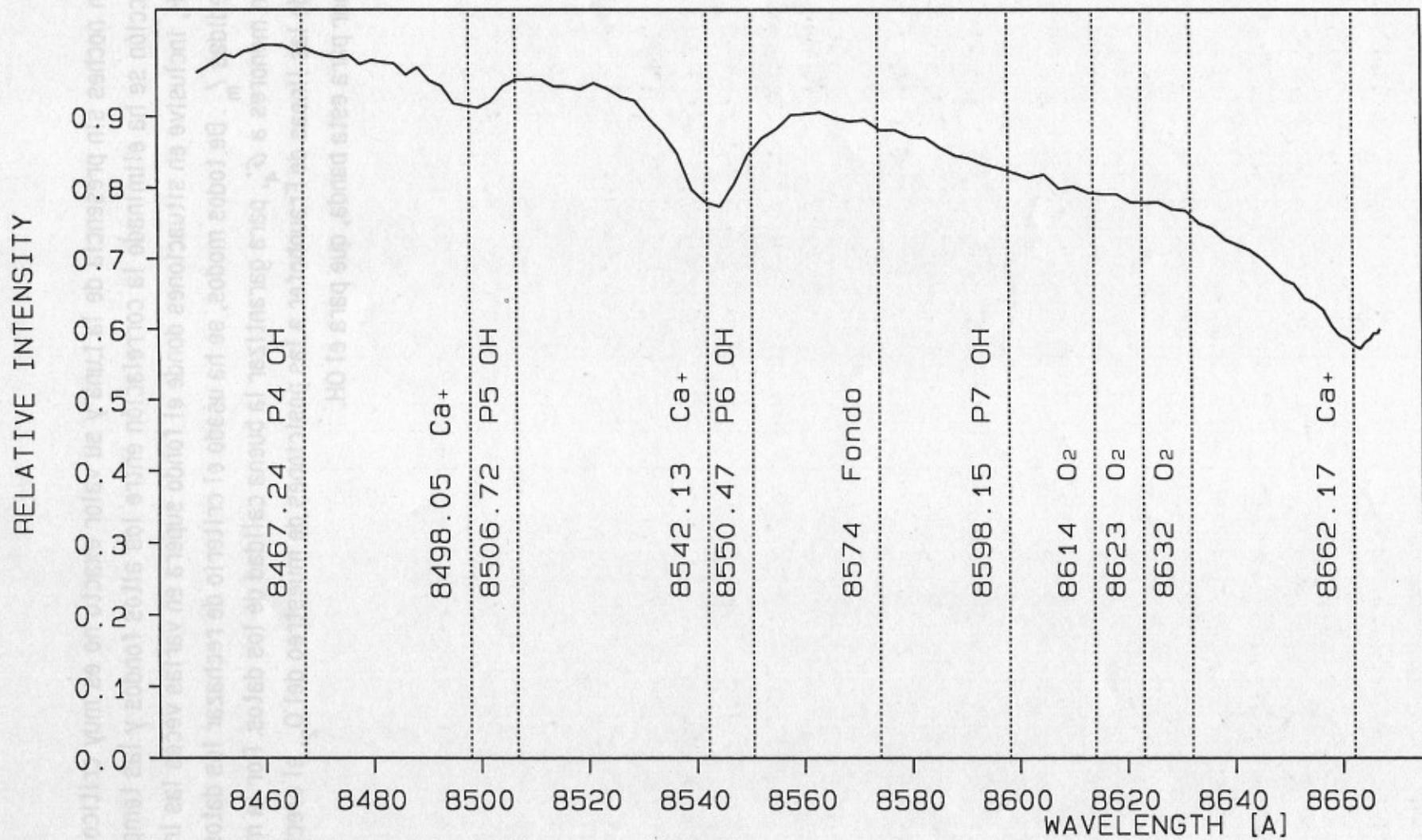


Figura 2.4: Barrido espectral en noche con muy alto fondo.

RELATIVE INTENSITY

medidos en noches sin presencia de la Luna y su valor exacto no es muy crítico. Con esta corrección se ha eliminado la correlación entre los altos fondos y las temperaturas de OH, inclusive en situaciones donde el fondo supera en varias veces las intensidades medidas I_m . De todos modos, se ha usado el criterio de rechazar los datos cuyos I_m sean menores a G'_4 , para garantizar la buena calidad de los datos. Por la mayor distancia de las líneas de Fraunhofer a las posiciones de muestreo del O_2 , el efecto es mucho menor para esta banda, que para el OH.

