

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



EL SEEING EN EL OBSERVATORIO DE SAN PEDRO MÁRTIR

TESIS

Que para obtener el título de

FÍSICO

presenta:

JAVIER ANTONIO MAGALLÓN SERVÍN

Ensenada, Baja California a 26 de agosto de 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

EL SEEING EN EL OBSERVATORIO DE SAN PEDRO
MÁRTIR

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA

JAVIER ANTONIO MAGALLÓN SERVÍN

Aprobado por



DR. RAUL MICHEL MURILLO

Presidente del jurado



M.C. JESUS RAMON LERMA ARAGON

Secretario



DR. LUIS JAVIER VILLEGAS VICENCIO

Primer Vocal

A mis padres por
todo su apoyo y amor.

A mis hermanos por
todos esos momentos
indescriptibles.

A mis maestros por su
paciencia y su esfuerzo.

A mis amigos por su
apoyo y su fortaleza.

Y a ti Karla por tu amor,
paciencia y apoyo.

Índice general

1. Introducción	10
2. El Sitio de San Pedro Mártir	12
3. Poder de resolución de un telescopio	17
3.1. Disco de Airy	17
3.2. Poder de resolución de un telescopio	20
4. El seeing	23
4.1. Efectos Atmosféricos	23
4.2. Efecto en las imágenes	24
4.3. ¿Qué es el seeing?	25
5. Técnicas de medición del seeing	30
5.1. Observación de estrellas binarias	31
5.2. Ancho de línea en la imagen barrida de estrellas	31
5.3. La técnica SCIDAR generalizada (SG)	33
5.4. DIMM	34

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
6. EL DIMM	35
6.1. Resúmen de los fundamentos ópticos	35
6.2. Diseños ópticos y mecánicos	38
7. Las mediciones	41
7.1. Proceso de adquisición de las mediciones	41
7.1.1. Antes de comenzar la temporada.	42
7.1.2. Configuración del equipo	42
7.1.3. Toma de mediciones	43
7.2. Programas de reducción de datos	46
7.3. Casos típicos	48
7.4. Resultados por noche	56
7.5. Distribuciones por mes	56
7.6. Distribuciones por estación	61
7.7. Comparación con los resultados obtenidos en SPM usando otras técnicas	64
7.8. Comparación con otros sitios	65
8. El seeing y los parámetros meteorológicos	67
8.1. El seeing y la temperatura exterior	67
8.2. El seeing y la humedad relativa	70
8.3. El seeing y la presión barométrica	71
8.4. El seeing y la rapidez horizontal del viento	72
8.5. El seeing y la velocidad vertical del viento	72
9. Conclusiones y recomendaciones	74

ÍNDICE GENERAL

6

A. Programas de reducción de datos

77

Índice de figuras

2.1. Ubicación del observatorio de San Pedro Mártir.	14
2.2. Fotografía aérea del área de telescopios en San Pedro Mártir. En la fotografía se muestran los telescopios de 2.1, 1.5 y 0.84 metros de diametro del espejo principal, además del lugar en donde se instaló el DIMM. (Crédito Dr. Alberto López).	15
3.1. En esta figura se muestra esquematizado el patrón de difracción para una apertura circular.	18
3.2. Distribución de la intensidad para una rejilla sencilla.(Fuente: Fundamentals of Optics, Jenkins y White 1976)	19
3.3. El criterio de Rayleigh. En la imagen (a) se muestran las dos fuentes resueltas, en la imagen (b) se muestra el limite de Rayleigh y la imagen (c) muestra dos fuentes no resueltas. (Fuente: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp2.html).	21
3.4. Poder de resolución teórico para diferentes longitudes de onda y diámetros de telescopios. Las 3 líneas verticales corresponden a las aperturas de los telescopios en SPM.	22

5.1. Seguimiento o "Star Trail" de la estrella polaris. En esta técnica la imagen de la estrella queda impresa en una placa fotográfica y al pasar el tiempo, la imagen se ve como si fuera una línea debido a que la tierra se encuentra en movimiento. A la izquierda se presentan las variaciones del diámetro de la imagen de la estrella (con un telescopio reflector de 120 pulgadas). La línea más larga corresponde a una exposición de 8.6 minutos. Harlan y Walker (1965).	32
5.2. El concepto del SCIDAR	33
6.1. Diagrama a bloques del DIMM y recentrado automático.	39
6.2. El equipo DIMM que se utilizó para la toma de datos en SPM. (a) Telescopio con cámara intensificada (izquierda) y buscador (arriba). (b) Paletas de control del telescopio y de la cámara junto con la pantalla para visualizar el centrado manual. (c) Pedestal de concreto del telescopio y andamio para el operador. (d) Caseta donde se aloja el resto del equipo. (e) Computadora de adquisición y procesamiento de imágenes, monitor para verificación del centrado y segunda paleta de control de la cámara.	40
7.1. Una toma del programa usado para el control del DIMM	44
7.2. Ejemplo de información contenida en un archivo de datos del DIMM	46
7.3. Diagrama de flujo del programa de análisis de los datos del DIMM.	47
7.4. Ejemplo del comportamiento del seeing en una noche cualquiera. Aquí se ven las variaciones del seeing, índice de centelleo, masa de aire y pixel máximo en función del tiempo, en la última gráfica se presenta un histograma de la distribución de las mediciones del seeing.	51

7.5. Comparación de tres noches típicas, la noche del 12 de marzo del 2002 (020312), la del 21 de junio del 2002 (020621) y la del 15 de junio del 2002 (020615).	52
7.6. Distribución por mes del seeing. Los puntos representan los valores de la mediana mientras que las barras representan el primer y tercer cuartil de las mediciones. . . .	54
7.7. Distribución estadística de todos los datos.	55
7.8. Estadística del seeing en SPM por mes.	57
7.9. continuación	58
7.10. continuación	59
7.11. continuación	60
7.12. Distribución del seeing en invierno y primavera.	62
7.13. Distribución del seeing en verano y otoño.	63
8.1. Seeing contra la temperatura exterior.	68
8.2. Seeing contra la humedad relativa.	69
8.3. Relación del seeing con la presión barométrica en SPM	70
8.4. Relación del seeing contra la rapidez horizontal del viento.	71
8.5. En esta gráfica se muestra la relación del seeing contra la velocidad vertical del viento.	73

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de toda su historia, el ser humano ha estado tratado de entender el medio que lo rodea, y si algo lo ha fascinado han sido las estrellas, los planetas y el espacio en general. Al verse sin la tecnología para poder alcanzar y percibir por sí mismo los astros, ha buscado maneras de estudiarlos a distancia. Ver, analizar y comprender el comportamiento de un objeto sin poder manipularlo es uno de los trabajos que realizan a diario los astrónomos. El primer telescopio óptico, cuyo diseño era muy sencillo, apareció en 1570, después en 1609 Galileo Galilei construyó un telescopio refractor de mediana calidad, el cual se hizo famoso por el descubrimiento de valles y montañas en la Luna. En 1671, Isaac Newton inventó el primer telescopio reflector con el cual corrigió uno de los más graves problemas de los telescopios refractores, la aberración cromática. Con el pasar de los años se han desarrollado telescopios cada vez más grandes y perfectos por lo que el efecto de la atmósfera se ha convertido en un factor cada vez más obvio en las observaciones. Como se muestra en el capítulo 4, la atmósfera afecta directamente a las observaciones astronómicas debido a la turbulencia que se genera en esta, y una buena medida de esta turbulencia atmosférica es el parámetro que

los astrónomos llaman *seeing*. Al tener un *seeing* malo, las imágenes de las estrellas aparecen en continuo movimiento, este fenómeno es bien conocido desde hace más de 300 años; de hecho, Isaac Newton escribió en su libro *Optiks*, " Aunque la teoría de hacer telescopios se llevara cien por ciento a la práctica, habría ciertas fronteras que no se podrían alcanzar con los telescopios. Porque el aire que existe entre nosotros y las estrellas está en perpetua vibración tal y como se puede ver en el movimiento vibratorio de las sombras de torres muy altas y en el centelleo de las estrellas. Pero estas estrellas no centellean cuando son vistas por telescopios con muy grandes aperturas ". Como se verá en el capítulo 3, entre más grande sea el espejo primario de nuestro telescopio mayor será su poder de resolución.

En la actualidad, es de vital importancia conocer qué tanta turbulencia atmosférica existe en un sitio en donde se planea construir un observatorio o un nuevo telescopio, ya que escogiendo el mejor sitio se aprovecharía de mejor manera la inversión. Debido a esto se ha realizado una campaña mundial para evaluar los sitios con mayor potencial astronómico. En San Pedro Mártir (SPM) existe el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), y el objetivo principal de este trabajo es presentar los resultados de una campaña de medición del *seeing* en este sitio y, mostrar que en base a una comparación que se hace en la sección 7.9 SPM es uno de los mejores sitios astronómicos en el mundo.

Para este trabajo se ha usado una de las técnicas más aceptadas mundialmente, que es la del Differential Image Motion Monitor (DIMM), la cual consiste en un instrumento que mide las variaciones diferenciales en el movimiento de las imágenes observadas con un telescopio pequeño y a partir de esto calcula el *seeing*. En el capítulo 6 se explica a detalle su funcionamiento.

Capítulo 2

El Sitio de San Pedro Mártir

El Observatorio Astronómico Nacional (OAN) fue establecido en el Castillo de Chapultepec de la Ciudad de México el 5 de mayo de 1878 . En la década de 1900, fué trasladado a una hermosa construcción en la villa de Tacubaya, en aquel entonces a la orilla de dicha ciudad. En 1929, el OAN fue incorporado a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con lo cual arrancó su proceso de crecimiento y modernización. En 1967, fué creado el Instituto de Astronomía de la UNAM y se decidió que el OAN pasara a su resguardo. El rápido crecimiento de la ciudad de México en las primeras décadas del siglo pasado forzó a su reubicación (1951), ahora, al pequeño pueblo de Tonantzintla en el estado de Puebla. Los entonces cielos despejados del lugar dieron al observatorio una ventaja distintiva, hizo posible la observación del hemisferio norte del cielo y una buena parte del sur. Sin embargo, ahora el rápido crecimiento de la ciudad de Puebla (localizada a 30 km de Tonantzintla) y la creciente contaminación luminosa, provocó que el sitio se hiciera ineficiente para estudios de astronomía profunda. Ésto motivó a que miembros del OAN realizaran un estudio del territorio nacional, basado en datos meteorológicos e imágenes tomadas con satélite

(1966), donde se encontró que el mejor sitio para uso astronómico se ubicaba en la sierra de San Pedro Mártir de Baja California, entre el mar de Cortés y el océano Pacífico. Después de una serie de estudios de seeing, fotométricos y meteorológicos, (además motivada por el aislamiento del lugar y la lejanía a centros urbanos de rápido crecimiento) la UNAM decidió comenzar la primera construcción en SPM en el año de 1967.

Para llegar al OAN-SPM (latitud: $31^{\circ}2'39''$, longitud $115^{\circ}27'49''$, altura: ≈ 2800 msnm) es necesario viajar alrededor de 150 km al sur de Ensenada por la carretera transpeninsular hasta llegar a la desviación a San Telmo, a unos 25 km al sur del poblado de Colonet, después recorrer 25 km, recientemente pavimentados, para llegar al ejido ex-hacienda Sinaloa y a partir de allí, recorrer 75 km de terracería hasta llegar al Observatorio en la parte alta de la sierra. El trayecto completo desde Ensenada toma alrededor de 5h, pero puede durar más durante las temporadas de lluvia y nieve. En la Figura 2.1 se muestra un mapa con las carreteras de la parte norte del estado y un mapa topográfico de una zona aledaña al observatorio.

El OAN-SPM cuenta con 3 telescopios cuyos diámetros en su óptica principal son de 2.1, 1.5 y 0.84 m (Fig. 2.2) los cuales han servido a la comunidad astronómica del país y del extranjero por más de 25 años. Con el tiempo SPM ha demostrado ser uno de los mejores sitios astronómicos del mundo, superando las mejores expectativas iniciales, ya que cuenta con un alto porcentaje de noches despejadas, baja humedad relativa y, como se muestra en este trabajo, poca turbulencia atmosférica, lo cual, junto con una gran variedad de instrumentos asociados a los telescopios y asignaciones abundantes de tiempo de observación, ha permitido a los astrónomos mexicanos mantenerse competitivos. Sin embargo, es claro que estos telescopios pequeños y viejos hoy en día son

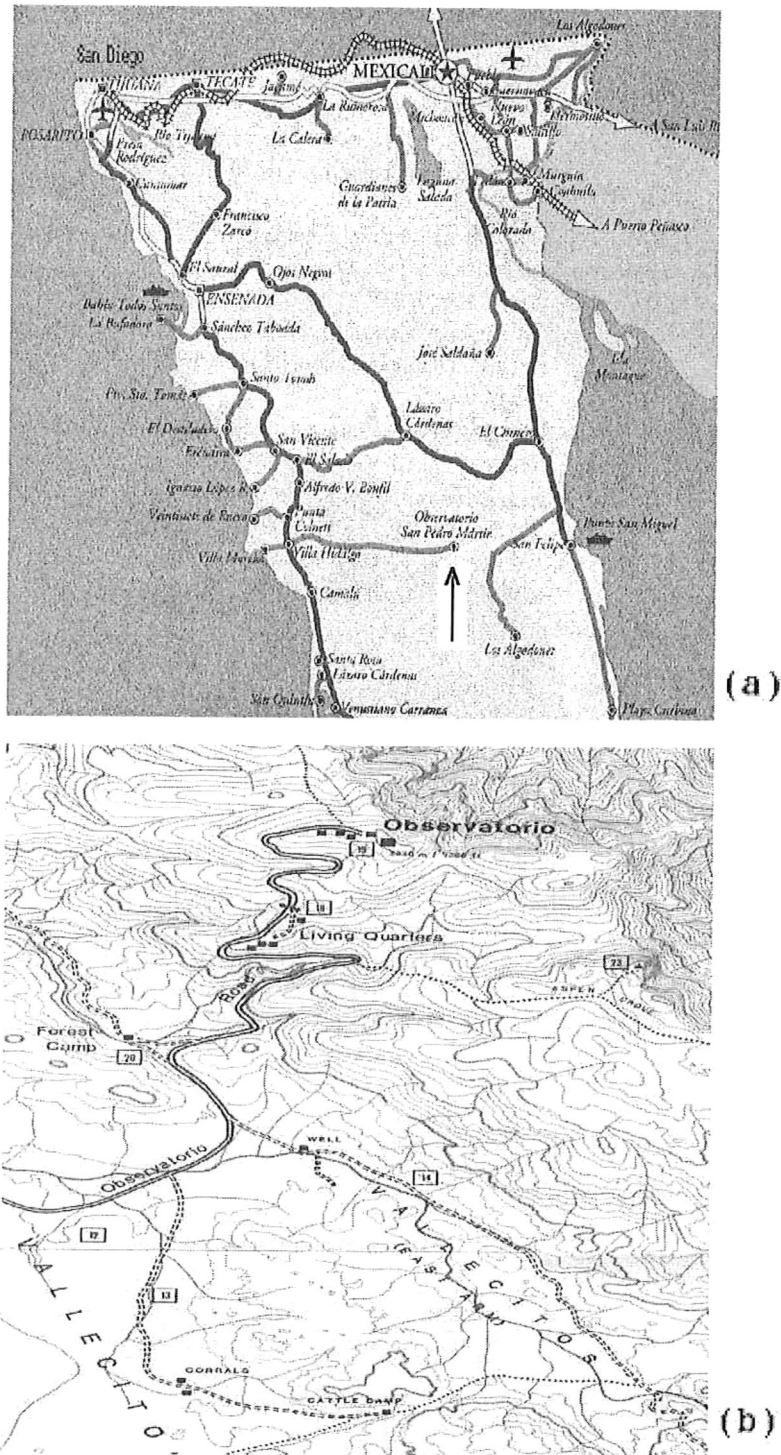


Figura 2.1: Ubicación del observatorio de San Pedro Mártir.
 a) Carreteras de la parte norte del estado de B.C. y b) mapa topográfico de la zona aledaña al observatorio.



Figura 2.2: Fotografía aérea del área de telescopios en San Pedro Mártir. En la fotografía se muestran los telescopios de 2.1, 1.5 y 0.84 metros de diámetro del espejo principal, además del lugar en donde se instaló el DIMM. (Crédito Dr. Alberto López).

insuficientes para las investigaciones astronómicas modernas por lo que el IA-UNAM ha estado persiguiendo, por más de una década, un proyecto de un gran telescopio que pueda tomar mejor ventaja de las características excepcionales del sitio y así satisfacer la demanda de la moderna astronomía mexicana tanto en el óptico como en el infrarrojo.

Capítulo 3

Poder de resolución de un telescopio

Debido a la gran lejanía de las estrellas, sus rayos de luz son paralelos entre sí y por lo tanto se esperaría que la imagen que un sistema óptico forme con ellos fuera puntual. Se observa que éste no es el caso debido básicamente a dos factores: los efectos de la atmósfera (que serán tratados en el siguiente capítulo) y la difracción en el telescopio. En este capítulo se hace un análisis del patrón de difracción para una apertura circular de un telescopio y se verá como se calcula el poder de resolución de este.

3.1. Disco de Airy

En 1835, Airy resolvió el problema del patrón de difracción que forman las ondas planas. Este patrón se forma debido a que la luz actúa como onda, y a que las ondas incidentes en diferentes partes del espejo interfieren unas con otras de tal manera que se forma un disco central brillante rodeado de anillos concéntricos.

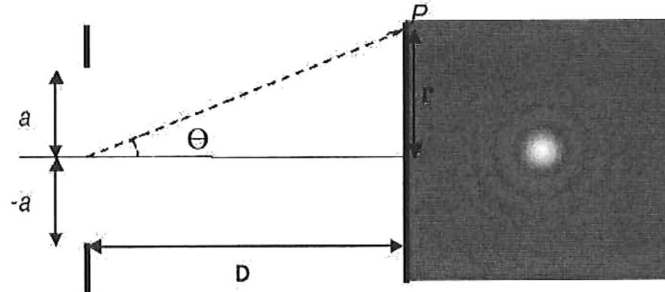


Figura 3.1: En esta figura se muestra esquematizado el patrón de difracción para una apertura circular.

Este fenómeno es muy importante, ya que sirve para entender cual es el límite del poder de resolución de los telescopio y otros instrumentos ópticos. Para resolver este problema, se plantea el esquema experimental mostrado en la Figura 3.1 donde un frente de onda plano incide en una apertura circular. El ángulo θ es medido con respecto al eje óptico el cual coincide con el centro del disco de Airy, D es la distancia a la pantalla y $d = 2a$ es el diámetro de la apertura. Como se muestra, la fuente puntual forma un patrón de difracción en la pantalla, el cual consiste en un disco brillante rodeado de anillos. Un corte por el centro del disco, se pueden apreciar en la Figura 3.2. Al analizar esta figura se observa que el patrón de difracción consiste en un máximo central (el disco central brillante conocido como disco de Airy) el cual está rodeado por unos máximos en forma de anillos de intensidad decreciente. Entre el disco más brillante y los anillos se encuentran unos mínimos o anillos de intensidad cero.

Ahora bien, para poder determinar donde se encuentran los mínimos y máximos de la intensidad mostrados en la gráfica de la Figura 3.2, se aproxima una función Bessel de orden 1 a la intensidad, encontrando que esta relación está dada por:

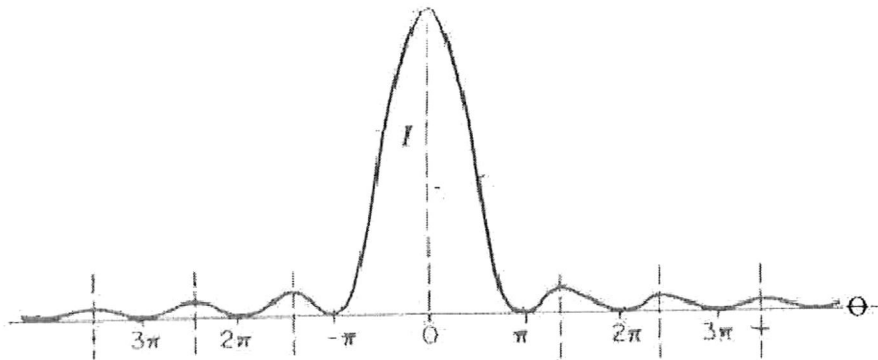


Figura 3.2: Distribución de la intensidad para una rejilla sencilla. (Fuente: Fundamentals of Optics, Jenkins y White 1976)

$$I(r) \propto \left[\frac{J_1(r)}{r} \right]^2, \quad (3.1)$$

donde $I(r)$ es la intensidad, $J_1(r)$ es la función de Bessel de primer orden, $r = k a \sin \theta$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ la constante de propagación y λ la longitud de onda. En este caso se encuentra que las posiciones de los ceros o mínimos para la intensidad estarán dados cuando

$$\frac{J_1(r)}{r} = 0. \quad (3.2)$$

Se sabe que el primer cero de la función Bessel de primer orden está en $r=3.83166$, (Este valor ya es conocido y se puede encontrar en las tablas de los ceros de las funciones Bessel) por lo tanto

$$r = k \operatorname{sen} \theta = \frac{2\pi d}{2\lambda} \operatorname{Sen} \theta = \frac{\pi d}{\lambda} \operatorname{sen} \theta = 3,83166 \quad (3.3)$$

Al despejar $\operatorname{sen} \theta$ de la ecuación 3.3 se obtiene

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{1,22\lambda}{d}. \quad (3.4)$$

ya que el segundo término es muy pequeño, θ también lo es, por lo que se puede usar la aproximación $\operatorname{sen} \theta = \theta$, por lo tanto

$$\theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (3.5)$$

3.2. Poder de resolución de un telescopio

Cuando se quiere saber cual es el poder de resolución de un telescopio, y se refiere a la capacidad que tiene este para resolver los objetos a distancia, lo que se hace es buscar dos estrellas que estén muy cercanas, tanto, que tal vez a simple vista no se distinga que son dos, entonces, si con nuestro telescopio se puede diferenciar una de otra, se dice que, las dos imágenes están resueltas. El criterio de Rayleigh dice que las imágenes de dos estrellas están resueltas cuando el máximo central de una de ellas cae en el primer anillo oscuro de la otra. Al estar los patrones resueltos se puede diferenciar una estrella de otra, tal y como se muestra en la Figura 3.3, entonces como ya se conoce en donde

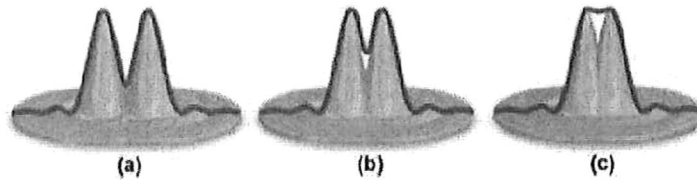


Figura 3.3: El criterio de Rayleigh. En la imagen (a) se muestran las dos fuentes resueltas, en la imagen (b) se muestra el límite de Rayleigh y la imagen (c) muestra dos fuentes no resueltas. (Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp2.html>).

se encuentra el primer anillo obscuro o cero dado en la ecuación 3.1, el poder de resolución para un telescopio estará dado por la ecuación 3.5.

El poder de resolución de los telescopios se puede calcular simplemente conociendo las aperturas de estos y la longitud de onda en la que se está observando. En la Figura 3.4 se muestran las curvas de poder de resolución para los tres telescopios en SPM usando cinco longitudes de onda diferentes, correspondientes a los filtros del sistema fotométrico de Johnson (infrarrojo (I), rojo (R), violeta (V), azul (B) y ultravioleta (U)). En esta gráfica las tres líneas verticales representan las aperturas de los tres telescopios de SPM. Como se ve en la gráfica, entre mayor sea el diámetro del telescopio mayor será su poder de resolución teórico.

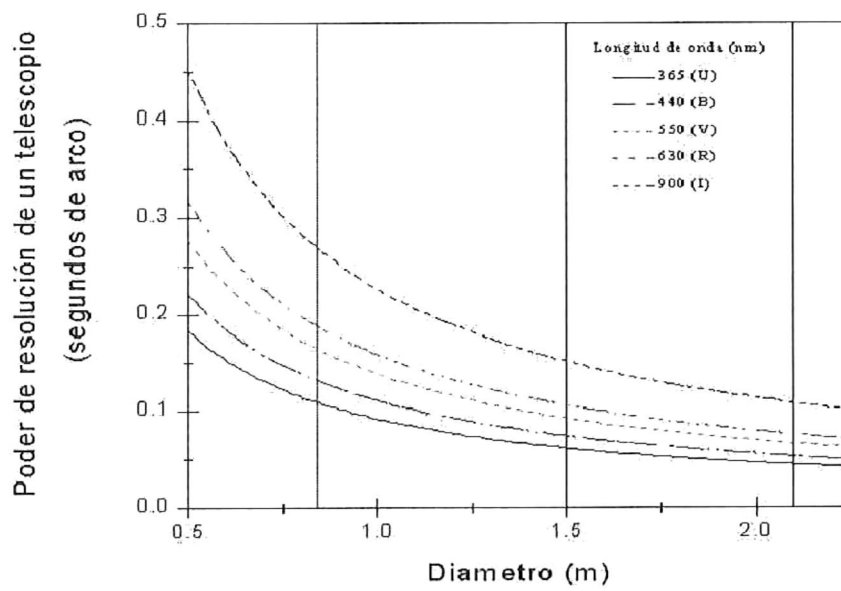


Figura 3.4: Poder de resolución teórico para diferentes longitudes de onda y diámetros de telescopios. Las 3 líneas verticales corresponden a las aperturas de los telescopios en SPM.

Capítulo 4

El seeing

4.1. Efectos Atmosféricos

El poder de resolución teórico de un telescopio (Ecuación 3.5) es directamente aplicable cuando el instrumento se encuentra en el espacio exterior y por lo tanto no sufre los efectos de la atmósfera. En las observaciones astronómicas que se llevan a cabo sobre la superficie terrestre la atmósfera afecta de gran manera dicho poder de resolución. Los movimientos constantes de las capas atmosféricas provoca que las imágenes de las estrellas, vistas a través de un telescopio, también se muevan constantemente. Un ejemplo muy ilustrativo de cómo afecta la atmósfera a las mediciones astronómicas es el siguiente: suponga que se encuentra en el interior de una alberca con la cabeza fuera del agua. Al enfocar su vista en un árbol ubicado en la orilla de la alberca notará que su imagen tendrá una buena definición, ahora si sumerge la cabeza dentro del agua a poca profundidad y de nuevo vé el árbol, éste se verá borroso. Conforme más se sumerja más borroso se verá. El agua en este ejemplo juega el papel de la atmósfera y el árbol, el de una estrella.

Según la ecuación 3.5 mientras más grande sea el telescopio mejor será su poder de resolución, por lo cual todo sería cuestión de simplemente construir telescopios cada vez más grandes. Desafortunadamente, la naturaleza turbulenta de la atmósfera es el verdadero factor limitante del poder de resolución de los telescopios ópticos. Los cambios locales en la atmósfera, tales como de temperatura y densidad, crean regiones con distinto índice de refracción por lo cual la luz es desviada en muchas direcciones, causando que la imagen de una fuente puntual (como la de una estrella), se vea borrosa, mostrando cambios tanto en posición como en brillo, aún en los telescopios muy grandes. Este fenómeno es conocido como centelleo de las estrellas o seeing (Emery 2002).

En las ciudades y al nivel del mar la atmósfera usualmente limita la resolución de un telescopio entre 2 y 10 segundos de arco mientras que en un buen sitio astronómico generalmente se puede tener un seeing por debajo de 1 segundo de arco. Como se verá más adelante, el seeing mediano en San Pedro Mártir es de 0.6 segundos de arco. Compárese ésto con el seeing medido en el telescopio espacial Hubble (el cual está dado sólo por difracción) que es de 0.005 segundos de arco.

4.2. Efecto en las imágenes

En la astronomía, como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que afectan la calidad de las imágenes generadas por los telescopios. Estos factores se podrían dividir en dos grandes grupos, los controlables y los no controlables. Los no controlables son todos aquellos factores en los que el ser humano aún no tiene recursos tecnológicos para eliminarlos o reducirlos. Los controlables son aquellos que sí pueden ser controlados de alguna manera. Ejemplos de estos dos grupos se muestran a continuación.

NO-CONTROLABLES

- La propiedad ondulatoria de la luz, la cual produce las distorsiones por difracción ya mencionadas.
- Fenómenos en las distintas capas de la atmósfera.

CONTROLABLES

- Aberraciones provocadas por el instrumento debidos a la calidad de su óptica
- El seeing de cúpula, el cual se debe básicamente a las fuentes de calor dentro del edificio del telescopio y la turbulencia producida por el viento que incide sobre el mismo.
- Errores de guiado debidos al mal control del seguimiento de las estrellas en el telescopio.
- Errores de enfoque generalmente debidos a distorsiones en la estructura del telescopio producidas por la fuerza de gravedad.

4.3. ¿Qué es el seeing?

Como se vió, en el capítulo 3 y como predice la teoría de difracción, cuando la luz se propaga en un medio homogéneo, la imagen de una fuente puntual producida por un telescopio de diámetro d , a una longitud de onda dada, λ , tiene un disco de Airy dado por la ecuación 3.5.

Pero la atmósfera degrada las imágenes astronómicas, antes de que éstas lleguen al telescopio, ya que la luz proveniente de las estrellas debe cruzar muchas capas turbulentas, las cuales perturban su propagación. Por esta razón, en el foco del telescopio, es imposible alcanzar la resolución angular teórica de un espejo perfecto y el tamaño de la imagen distorsionada de la estrella depende

mayormente de la turbulencia integrada a través de la atmósfera, siendo prácticamente insensible al diámetro del telescopio. La manera tradicional para caracterizar la degradación de las imágenes astronómicas es mediante la medición del ancho a media altura FWHM (Full Width Half-Maximum), de la curva de intensidad de las estrellas en el plano focal del telescopio. La imagen de una estrella en un detector astronómico tiene un perfil muy cercano al de una gaussiana por lo que está dado matemáticamente por

$$y = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \beta}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (4.1)$$

donde A es su amplitud, β la posición de su centro y la desviación estándar, σ , es una medida de su anchura. Se puede demostrar que la relación entre el FWHM y σ cuando $A=1$, $y = \frac{1}{2}$ y $\varepsilon_{FWHM} = 2x$, está dada por

$$\varepsilon_{FWHM} \approx 2,354\sigma. \quad (4.2)$$

Según la teoría de Fried (1966), la degradación de una imagen producida por la turbulencia atmosférica se puede caracterizar con un parámetro llamado r_0 . Fried desarrolló una función de la estructura de fase basada en las mediciones en dos puntos que pasan por un frente de onda asumiendo un espectro de la energía según el modelo de Kolmogorov, en donde toda la energía cinética es pasada sucesivamente a escalas similares cada vez más pequeñas dentro del flujo turbulento antes de que la escala interna se alcance y las fuerzas viscosas prevalezcan. Fried pudo entonces determinar que esta función de estructura se puede definir como:

$$D(r) = 6,88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (4.3)$$

donde r es la separación entre dos puntos de medición, el parámetro r_0 es determinado por la longitud de onda de la luz, la capa de atmósfera que se encuentra entre las mediciones, y el camino de propagación. Fried y Mevers en 1974 calcularon a r_0 como:

$$r_0 = \left[\frac{6,88}{2,19 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_s ds C_n^2} \right] \quad (4.4)$$

Donde C_n^2 es la estructura del índice refractivo. Note que esta función de estructura es una integral sobre el camino que la luz tiene que atravesar, las capas turbulentas de la atmósfera, y r_0 es el promedio estadístico relacionado a las variaciones del índice de refracción y está dado en unidades de longitud. Este parámetro se puede imaginar como el diámetro de un telescopio que produciría una imagen de difracción del mismo tamaño que el producido por la turbulencia atmosférica en una fuente puntual observada con un espejo de diámetro infinito. Como se puede ver la ecuación 4.4, está muy complicada y es mucha la información que se necesita para resolverla.

Sarazin y Roddier, en 1990, mostraron que las fluctuaciones observadas en el ángulo de arribo del frente de onda (ángulo incidente) está relacionado con r_0 y por lo tanto con el seeing astronómico. Al medir el movimiento relativo del centroide entre dos imágenes de una misma estrella formados por dos aperturas de diámetro d separadas por una distancia D , ellos calcularon que las varianzas en el movimiento del centroide en los ejes longitudinal y transversal estaban relacionadas con el parámetro de Fried de la siguiente manera:

$$\sigma_l^2 = \left[1 - 0,541 \left(\frac{d}{D}\right)^{-1/3}\right] 0,358 \left[\frac{\lambda}{r_0}\right]^{5/3} \left[\frac{\lambda}{d}\right]^{1/3} \quad (4.5)$$

y

$$\sigma_t^2 = \left[1 - 0,811 \left(\frac{d}{D}\right)^{-1/3}\right] 0,358 \left[\frac{\lambda}{r_0}\right]^{5/3} \left[\frac{\lambda}{d}\right]^{1/3}, \quad (4.6)$$

donde σ_l^2 es la varianza longitudinal y σ_t^2 la transversal. Con una analogía formal a la expresión que relaciona aquellos parámetros para imágenes de difracción pura, se encuentra que la relación entre ε_{FWHM} y r_0 se puede escribir como

$$\varepsilon_{FWHM} = 0,98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (4.7)$$

Siempre y cuando r_0 sea mucho menor que el diámetro del telescopio.

Lo que se llama seeing en astronomía es el tamaño angular, ε_{FWHM} (dado por la ecuación 4.7), de la imagen de la estrella (generalmente expresado en segundos de arco) en el foco de un telescopio de diámetro muy grande y tomado con un tiempo de exposición también grande. Es importante tener en cuenta que el seeing incluye tanto el ensanchamiento instantáneo de la imagen, así como el desplazamiento de la misma en el detector (Vernin y Muñoz-Tuñon 1995). Entonces lo que se hace para calcular el seeing es, primero obtener las varianzas longitudinales y transversales dados por las ecuaciones 4.5 y 4.6, ya que con esto se pueden obtener dos diferentes valores para r_0 :

uno longitudinal y otro transversal. Una vez calculados los r_0 con la ecuación 4.7, se obtienen dos diferentes valores del seeing: un seeing transversal y otro longitudinal, después se calcula el promedio de ambos y de esta manera, finalmente, conocer el valor del seeing.

Capítulo 5

Técnicas de medición del seeing

Desde el trabajo pionero que presentó Rösch (1963), se han desarrollado muchas técnicas para medir el seeing. Todos los dispositivos que se han fabricado para las mediciones del seeing han sido instrumentos ópticos, que utilizan diversos métodos para su medición tales como: observación de estrellas binarias, seguimiento de la estrella Polar, “Shearing Interferometer” (Rodier 1976), la técnica SCIDAR (Azouit y Vernin 1980), el “Grating Scale Monitor” o GSM (Martin et al. 1994) y el del monitor del movimiento diferencial de imagen o DIMM (Stock y Keller 1960, Sarazin y Rodier 1990), este último fue el método que se utilizó en la realización del presente trabajo. En estos instrumentos se han usado diferentes detectores para captar la información tales como ojo, placas fotográficas, fotomultiplicadores, intensificadores y CCDs. A continuación, se explican algunos de los métodos más comunes para la medición del seeing.

5.1. Observación de estrellas binarias

Es quizá el método más viejo para medir el seeing y consiste en observar, con ayuda de un telescopio, estrellas binarias (cuyas componentes tienen brillos, colores similares y separación bien conocida) y determinar visualmente si estas se pueden resolver o no. Por lo general, se tiene un catálogo de este tipo de objetos con distintas separaciones. Si al observarlas no se pueden resolver, entonces, se determina que el seeing es peor que su separación angular. Este método observacional no es muy práctico ni preciso.

5.2. Ancho de línea en la imagen barrida de estrellas

La obtención de la imagen barrida de una estrella consiste en apuntar el telescopio y suprimir los movimientos de guiado del mismo, de forma que la estrella se barre en un detector (película fotográfica ó CCD), formándose una línea cuyo grosor es proporcional al seeing (Figura 5.1). Una vez que se ha tomado la imagen se mide el grosor en distintas partes de la línea, con lo que se deducen las variaciones del seeing. Si no existieran los efectos atmosféricos (como en los telescopios espaciales), el camino que pintaría la estrella en el detector sería una línea muy delgada, pero lo que realmente se ve es una línea de grosor variable, dispersa y borrosa llegando a casos en que cuando se atraviesa una nube, la luz es tan débil que no se imprime en la placa fotográfica mostrando saltos en la línea como en el último caso de la Figura 5.1. Este tipo de técnica ha sido usado en el pasado, por muchos investigadores para estudiar microsismos, vibraciones en las monturas de los telescopios y errores en los sistemas de guiado en los telescopios a los cuales es también muy sensible.

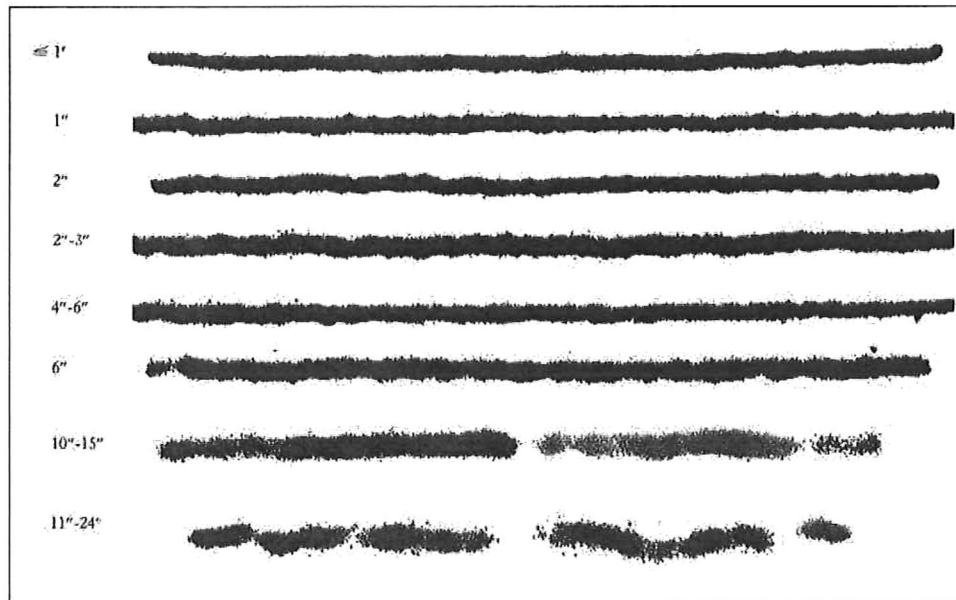


Figura 5.1: Seguimiento o “Star Trail” de la estrella polaris. En esta técnica la imagen de la estrella queda impresa en una placa fotográfica y al pasar el tiempo, la imagen se ve como si fuera una línea debido a que la tierra se encuentra en movimiento. A la izquierda se presentan las variaciones del diámetro de la imagen de la estrella (con un telescopio reflector de 120 pulgadas). La línea más larga corresponde a una exposición de 8.6 minutos. Harlan y Walker (1965).

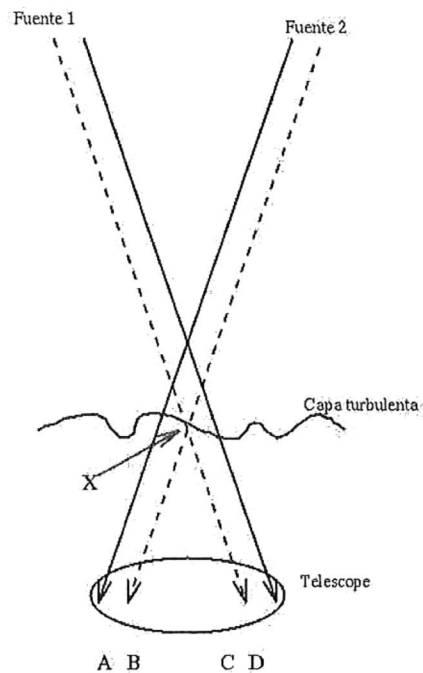


Figura 5.2: El concepto del SCIDAR

5.3. La técnica SCIDAR generalizada (SG)

La técnica del SCIDAR (Scintillation Detection y Ranging) propuesta por Vernin y Roddier en 1973, fue desarrollada para medir la turbulencia óptica y la velocidad de desplazamiento de las capas de turbulencia atmosférica como función de la altura. Una de las ventajas de esta técnica es su insensibilidad a las aberraciones ópticas del telescopio y su funcionamiento se basa en la detección de centelleo en la pupila del mismo.

Considere un objeto estelar binario (Figura 5.2). Por simplicidad suponga que la atmósfera sólo tiene una capa turbulenta. Esta capa turbulenta afecta la intensidad en la pupila del telescopio,

instalado al nivel del suelo. Los componetes de la imagen son formados por rayos, cada una de las dos fuentes mostradas en la figura, pasan a través de la misma región turbulenta (X) y muestran un grado de correlación. B y C en la figura están correlacionados, y esta correlación provee la información básica para el SCIDAR. Ésta auto correlación está constituida por un pico central y dos picos pequeños laterales, la posición de ellos nos dá, por geometría simple, la altura de la capa turbulenta. El perfil de estos picos contiene información acerca de la fuerza de la turbulencia óptica.

El SG es un instrumento muy completo pero tiene la desventaja de que requiere de un telescopio de diámetro mayor que 1.5m, lo cual hace imposible fabricar un instrumento portátil que sirva para evaluar sitios remotos.

5.4. DIMM

Motivados por la gran diversidad de métodos e instrumentos empleados para medir el seeing, en 1989, Vernin del Departamento de Astrofísica de la Universidad de Niza (DA) y Muñoz-Tuñón del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en colaboración con el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en La Palma, decidieron construir un instrumento estándar (DA/IAC DIMM), basado en el monitor del movimiento diferencial de la imagen del Observatorio del Sur de Europa (ESO DIMM), descrito por Sarazin y Roddier en 1990.

El DA/IAC DIMM fue diseñado para ser portátil, confiable, fácil de manejar, de bajo costo, bien documentado, calibrado y que además fuera fácil de reproducir o duplicar. Un DIMM muy similar fue utilizado para obtener las mediciones usadas en este trabajo y será descrito con mayor detalle en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

EL DIMM

En este capítulo se explica con detalle cuales son las características del DIMM que se utilizó para la obtención de los datos presentados en este trabajo, aunque se parezca al DA/IAC DIMM es un poco diferente, por eso la importancia de dedicarle un capítulo a la explicación de su funcionamiento.

6.1. Resumen de los fundamentos ópticos

Para poder estimar el parámetro de Fried, r_0 , lo que se hace es medir la varianza de la posición, σ , de una imagen bidimensional a través de una apertura sencilla de diámetro, d , lo cual se calcula usando la ecuación 6.1.

$$\sigma^2 = 0,373 \varepsilon_{FWHM}^2 \left[\frac{r_0}{d} \right]^{1/3} \quad (6.1)$$

Midiendo el movimiento de la imagen en el foco del telescopio con una longitud de onda λ , se

puede deducir el parámetro de Fried y encontrar el seeing usando la ecuación (4.7). Esta técnica ha sido muy usada pero requiere un telescopio muy rígido debido a la imposibilidad de diferenciar entre los movimientos de la turbulencia atmosférica y aquellos otros factores como las vibraciones del telescopio. La variación medida, σ_{total}^2 es la suma cuadrática del término relacionado con la turbulencia, σ_{turb}^2 , y otros como las vibraciones relacionadas del telescopio, errores de guiado, vibraciones producidas por el viento sobre el telescopio, efecto de cúpula entre otros. Por lo tanto, la variación total estará dada por

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{atm}^2 + \sigma_{telescopio}^2 + \sigma_{guiado}^2 + \sigma_{vibraciones}^2 + \sigma_{cupula}^2 + \dots \quad (6.2)$$

El principio del DIMM consiste en producir dos imágenes de una estrella con el mismo telescopio por medio de dos aperturas de diámetro d separadas por una distancia D , de manera que se cancelan los efectos erráticos del telescopio. Si se sustituye la ecuación 6.1 en las ecuaciones 4.5 y 4.6 se obtiene que

$$\sigma_{i/t}^2 = \sigma^2 \left[1 - k_{i/t} (d/D)^{-1/3} \right] \quad (6.3)$$

donde $k_l = 0,54$ y $k_t = 0,810$ lo cual es válido sólo cuando $d/D \leq 0,5$ (Sarazin y Roddier 1990).

Lo que se obtienen con el DIMM, experimentalmente, es un cierto número de mediciones de la separación de los centros de las imágenes (en este trabajo se tomaron 400), esta separación es longitudinal y transversal, después se calcula la separación promedio longitudinal (S_{pml}) y la transversal (S_{pmt}) de los centros usando la siguiente ecuación:

$$S_{pm(l/t)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=400} S_i}{N} \quad (6.4)$$

en donde S_i es el valor de cada una de las mediciones tomadas que va desde 1 hasta 400 y N es el número total de mediciones, una vez obtenida la separación promedio se calcula la varianza con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{l/t}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=400} (S_i - S_{pm(l/t)})^2}{N - 1} \quad (6.5)$$

Nota: Se pusieron los índices inferiores l/t para no escribir dos veces la misma ecuación, pero son en realidad dos ecuaciones diferentes una para l y otra para t .

Una vez que se obtienen las dos sigmas se usa la ecuación 6.3 y se obtienen dos mediciones del parámetro r_0 , con esto usando la ecuación 4.7 se obtienen dos diferentes valores para el seeing, uno del seeing transversal y otro del seeing longitudinal. Los valores para r_0 en principio deberían ser iguales pero bajo ciertas condiciones desfavorables, como fuertes ráfagas de viento y largos tiempos de exposición, los resultados generados por esta técnica pueden ser erróneos dando como resultado que los valores en las direcciones transversales y longitudinales sean muy diferentes. El tener información en las dos direcciones es una forma de estar seguros de que se está trabajando bajo las condiciones mínimas necesarias para que esta técnica funcione. Las ecuaciones 6.1 y 6.3 suponen el comportamiento de la turbulencia según la descripción de Kolmogorov. Si este no es el caso, estas expresiones tienen una forma completamente diferente.

6.2. Diseños ópticos y mecánicos

El DIMM que se utilizó (Fig. 6.2) fue fabricado por la compañía LHESA Electronique y es muy similar al DA/IAC DIMM que describe Vernin y Muñoz-Tuñón (1995). Consiste en un telescopio Schmidt-Cassegrain de 20 cm de diámetro (marca CELESTRON) que está sobre una montura semi-automática del tipo ecuatorial. Cada una de las aperturas tienen 60 mm de diámetro cuyos centros están separadas por 140 mm. En una de las aperturas hay un prisma cuya función es la de desplazar ligeramente la imagen creando artificialmente una estrella binaria. Las dos imágenes de la estrella son detectadas por una cámara CCD intensificada (LHESA's LH750EIA) y enviadas a una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de cuadros (Frame grabber).

El telescopio está montado sobre un pedestal de tal manera que, las aperturas se encuentran a 8.3 m sobre el nivel del suelo. Parte del equipo, como los controladores de la cámara y los motores, se encuentran sobre un andamio alrededor del pedestal mientras que, la computadora está alojada en una caseta alejada del telescopio. La mayor parte de la electrónica se colocó en dicha caseta, con el propósito de reducir fuentes de luz, calor y turbulencia, de hecho el equipo ya instalado en la torre afecta en pequeña medida las mediciones, aunque el telescopio está colocado sobre una base de concreto independiente al resto del equipo, la torre en sí y el equipo genera cierta turbulencia y vibraciones cuando el viento choca con esta estructura. Una instalación óptima se daría si se tuviera únicamente al telescopio en una torre muy alta y delgada, pero esto es imposible ya que se tiene que apuntar a las estrellas de manera manual, por lo que se necesita una base donde se pueda parar un operador. El DIMM, la cabaña y la torre además de la electrónica instalada en ambas se muestra en la Figura 6.2.

Incluyendo los tiempos de procesamiento se obtiene una medición del seeing aproximadamente cada 14 segundos. Cuando los valores obtenidos difieren en más del 12 %, el valor del error relativo

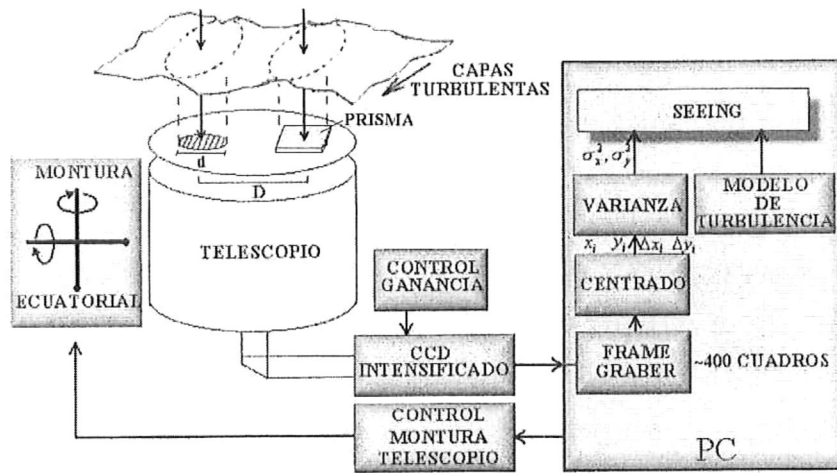


Figura 6.1: Diagrama a bloques del DIMM y recentrado automático.

esperado para el DIMM, el dato es descartado. También las mediciones que están 45° abajo del cenit son descartadas. (Michel et al. 2003).

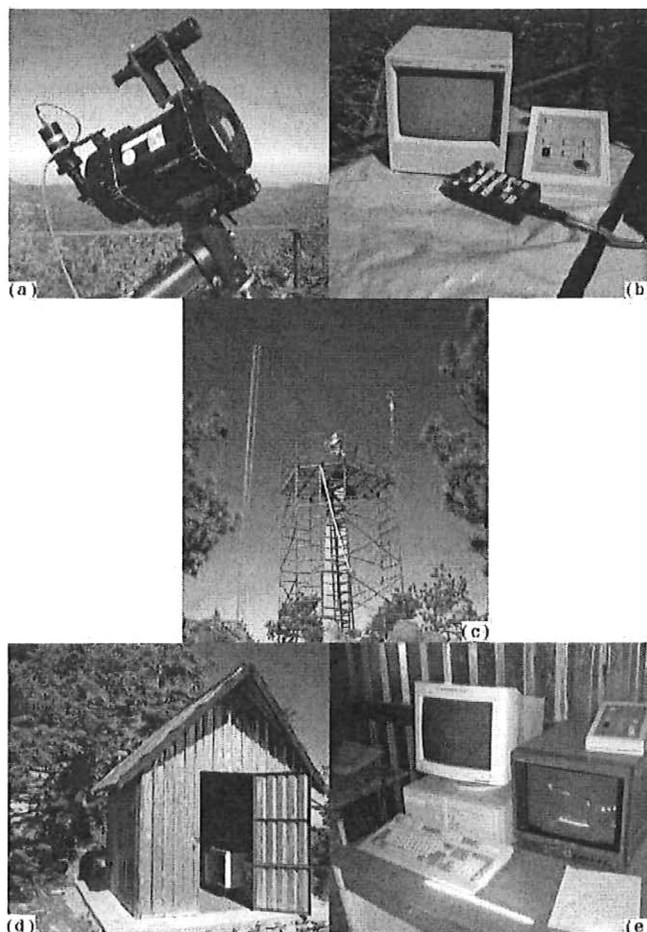


Figure 6.2: El equipo DIMM que se utilizó para la toma de datos en SPM. (a) Telescopio con cámara intensificada (izquierda) y buscador (arriba). (b) Paletas de control del telescopio y de la cámara junto con la pantalla para visualizar el centrado manual. (c) Pedestal de concreto del telescopio y andamio para el operador. (d) Caseta donde se aloja el resto del equipo. (e) Computadora de adquisición y procesamiento de imágenes, monitor para verificación del centrado y segunda paleta de control de la cámara.

Capítulo 7

Las mediciones

Las mediciones se obtuvieron en un total de 106 noches de observación, distribuidas en un intervalo del 18 de agosto de 2000 a el 23 de junio de 2003. Para lograr un mayor cubrimiento en otoño e invierno, se incluyen 14 noches medidas por Conan et al. (2002) en Diciembre de 2000 y Octubre de 2001. Estas últimas mediciones se obtuvieron con el mismo DIMM, sólo que con un tiempo de exposición de 10 ms y no 6 ms como en nuestras 106 noches. Para hacer compatibles sus mediciones con las nuestras, las primeras fueron multiplicadas por 1.06 (constante obtenida experimentalmente) para extrapolar su seeing a 6 ms.

7.1. Proceso de adquisición de las mediciones

Antes de comenzar las mediciones en cada temporada de observación hay que realizar un proceso de instalación del equipo tanto en la torre como en la caseta, por lo que se definieron 3 etapas que van desde la instalación hasta la toma de mediciones.

7.1.1. Antes de comenzar la temporada.

Lo primero que se hace en San Pedro Mártir (SPM) para comenzar una temporada de mediciones del seeing es desempacar la cámara intensificada y montarla en el telescopio. Ya que ésta es guardada en la caseta, al final de cada temporada, para protegerla sobre todo de las tormentas eléctricas. Después se conectan (por ambos extremos) los cables largos que van de la torre a la caseta las cuales llevan la señal de video de la cámara al capturador de cuadros en la PC, las señales de control de la PC al telescopio y la línea de 120 VCA. Por último, se conectan todos los cables del equipo residente en la caseta.

7.1.2. Configuración del equipo

En la caseta se enciende el regulador que alimenta a todos los equipos, tanto en la torre como en la misma caseta. Después se configura la computadora con la fecha y la hora universal exacta y se corre el programa DIMM4 escogiendo en su catálogo la estrella que se va a observar. Enseguida, se sube a la torre, se destapa el telescopio y encienden los controladores de la cámara y de movimiento del telescopio y se procede a apuntar manualmente a la estrella escogida. El proceso de apuntado de las estrellas es el siguiente:

1. Se quita la tapa del telescopio.
2. Se quitan los frenos en la montura del telescopio.
3. Se apunta a la estrella.
4. Se enciende la retícula del buscador y se centra la estrella con la ayuda de la paleta de movimientos del telescopio.

5. Cuando aparecen las dos imágenes de la estrella en el monitor, se ajusta el foco del telescopio hasta que ésta se vea como dos puntos luminosos bien definidos.
6. Después se centran estos dos puntos en el monitor utilizando movimientos lentos en la paleta de control del telescopio.
7. Se ajusta el potenciómetro para regular la intensidad de la estrella.
8. Se va a la caseta y se arranca la toma de mediciones.

7.1.3. Toma de mediciones

En el monitor de la PC, ubicado en la caseta, muestra la información que el programa del DIMM requiere para la toma de mediciones (Figura 7.1). El programa permite acceder a ciertas opciones de éste por medio de las teclas de función, las cuales se listan a continuación;

- F1 esta opción le informa al programa sobre de que lado está el telescopio ya sea este u oeste.
- F2 Sirve para introducir el tiempo universal.
- F3 Es para introducir el nombre y las coordenadas de la estrella a observar, pudiéndose tomar de un catálogo dentro del programa que contiene los nombres y coordenadas de las estrellas más brillantes del hemisferio norte.
- F4 Arranca el proceso de mediciones de seeing.
- F5 Sirve para dar las coordenadas exactas del sitio astronómico.
- F6 Configura los parámetros del programa.
- F7 Para definir el número de cuadros a procesar antes de obtener un par de mediciones del seeing (longitudinal y transversal), normalmente 400.

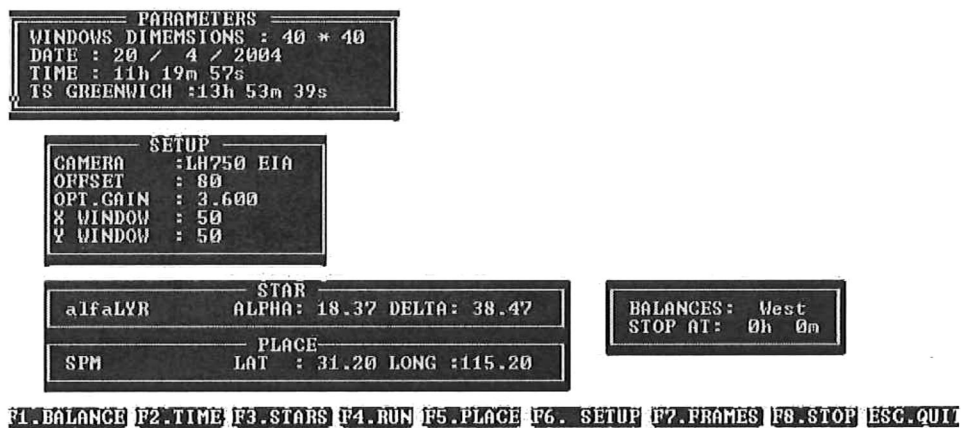


Figura 7.1: Una toma del programa usado para el control del DIMM

- F8 Define la hora en que se detendrá el programa automáticamente.
- ESC aborta el programa.

Antes de que el programa comience a grabar las mediciones, éste hace una prueba para que el usuario ajuste la ganancia del intensificador de manera que el pixel máximo esté entre 150 y 200 ADUs (las ADUs son unidades analógico digitales), y después de que se acepta la configuración, el programa empieza a tomar mediciones. Mientras el programa está corriendo, si la estrella está por salirse del detector, éste aborta la medición que esté en proceso, acciona los motores y la recentra automáticamente. En condiciones normales de operación es posible medir automáticamente una estrella por alrededor de cuatro horas, al final de las cuales, hay que cambiar de estrella o simplemente terminar de observar. Las mediciones se realizan mientras es de noche y se tiene especial cuidado de no apuntar a la Luna, ya que el más mínimo rayo de luz puede dañar el intensificador de la cámara.

Como ya se mencionó el programa del DIMM graba las mediciones en un archivo de texto por corrida, un ejemplo se muestra en la Figura 7.2. La información que se guarda en este archivo es la siguiente;

- Place; lugar donde se realizó la medición
- Star; estrella observada
- YY,MM,DD; año, mes y día de la observación
- Time; hora en que se realizó la medición en tiempo universal
- Images; número de cuadros usados para el cálculo de los resultados mostrados en cada línea, la cual contiene:
 1. Time; hora exacta de esa medición.
 2. Sing.L; seeing longitudinal
 3. Sing.T; seeing transversal
 4. L/T; cociente entre el seeing longitudinal y transversal
 5. AIR M; masa de aire que atraviesa la estrella al momento de la medición.
 6. SCINT; índice de centelleo de la estrella
 7. PIXMAX; valor del pixel más brillante en el ciclo.
 8. MVT; bandera de error que indica cuando se abortó la medición.

```

PLACE ;;SPM ;LAT ;; 31.0200;LONG ;;115.3000;
STAR ;;VEGA ;ALPHA ;; 18.3700;DELTA ;; 38.4700;
YY,MM,DD ;; 99; 8; 19
TIME ;; 5; 37;
IMAGES ;; 400;
TIME ; SING.L; SING.T; L/T ; AIR M; SCINT; PIXMAX; MVT;
5.6433; 2.2615; .6077; 3.7214; 1.0402; .0438; 185.; 0;
5.6508; .5788; .5285; 1.0953; 1.0406; .0382; 190.; 0;
5.6678; .6449; .6870; .9387; 1.0416; .0459; 217.; 0;
5.6753; .6646; .6105; 1.0887; 1.0420; .0378; 228.; 0;
5.6828; .6010; .5586; 1.0759; 1.0424; .0320; 238.; 0;
5.6903; .5442; .5660; .9614; 1.0429; .0310; 240.; 0;
5.6978; .5728; .5971; .9594; 1.0433; .0300; 235.; 0;
5.6978; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 4;
5.7139; .5203; .5161; 1.0081; 1.0443; .0333; 234.; 0;
5.7214; .6139; .6003; 1.0227; 1.0447; .0320; 235.; 0;
5.7289; .5724; .6104; .9378; 1.0452; .0348; 238.; 0;
5.7364; .5417; .5973; .9070; 1.0456; .0347; 234.; 0;
5.7364; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 0.0; 4;
5.7500; .6278; .6116; 1.0266; 1.0464; .0314; 228.; 0;
5.7575; .5770; .5850; .9863; 1.0469; .0352; 214.; 0;
9. 5.7650; .7147; .6463; 1.1058; 1.0474; .0351; 214.; 0;

```

Figura 7.2: Ejemplo de información contenida en un archivo de datos del DIMM

7.2. Programas de reducción de datos

Para realizar el análisis de los datos obtenidos con el DIMM se hizo un programa en fortran, el cual muestra por medio de gráficas el comportamiento del seeing, el índice de centelleo (consiste en que tanta variación existe en el brillo de la información o que tanta cantidad de luz se tiene), el pixel máximo que nos dice cual fue el pixel más intenso y la masa de aire, todos estos en función del tiempo. Un diagrama de flujo de dicho programa se muestra en la Figura 7.3 y un listado del código fuente en el apéndice A.

En base a los parámetros de ubicación del sitio, y de la fecha contenida en el nombre del archivo, el programa calcula los tiempos de puesta y salida del sol, los cuales definirán el tamaño del eje x en las primeras cuatro gráficas de la Figura 7.4, después se abre el archivo con datos y se lee la información, línea por línea, almacenando los datos en arreglos donde se han descartado aquellos en que el programa encontraba alguna línea con las siguientes características;

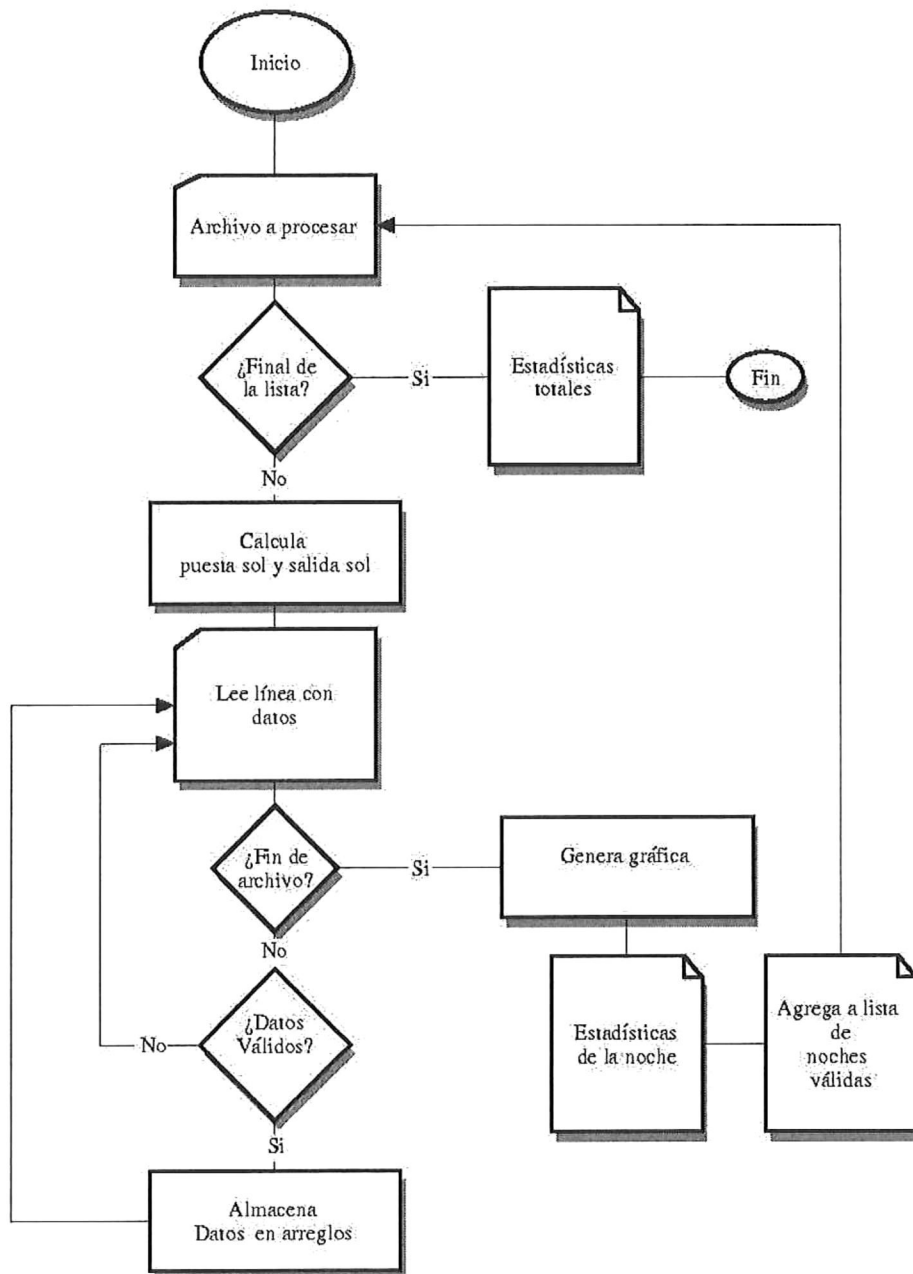


Figura 7.3: Diagrama de flujo del programa de análisis de los datos del DIMM.

- Línea de ceros
- Ángulos cenitales mayores que 45°
- Las mediciones simultáneas del seeing difieren por más del 12 %

Un ejemplo de los resultados obtenidos en una noche se muestran en la Figura 7.4. Todos los archivos que se generaron por las mediciones del DIMM se muestran en la tabla 7.1 y 7.2.

En el histograma de la Figura 7.4 (gráfica de la parte inferior de ésta), se grafico el número de cuentas, las cuales son igual al número de mediciones, contra el seeing. En la parte superior de este histograma se muestra el número total de mediciones, la información de la curva de los datos: primer cuartil, mediana y tercer cuartil, el promedio del seeing y la sigma respectivamente. El primer cuartil, que es el 25 % del número total de mediciones, nos dice que tiene un seeing menor o igual a 0.62 segundos de arco; la mediana, que es el 50 % del número total de mediciones, nos dice que tienen un seeing menor o igual a 0.75 segundos de arco; y el tercer cuartil, que es el 75 % del número total de mediciones, nos dice que tienen un seeing menor o igual a 0.89 segundos de arco. Los astrónomos utilizan estos 3 datos (primer cuartil, mediana y tercer cuartil) para reportar el seeing de un sitio astronómico, ya que al tener esta información, se puede tener una mejor idea de como es el comportamiento del seeing a lo largo del tiempo en el que se midió. Conocer, unicamente, el promedio de las mediciones no es suficiente para saber como es el seeing en un sitio astronómico.

7.3. Casos típicos

En la Figura 7.5 se presentan tres casos de mediciones del seeing en SPM. En las dos gráficas de arriba se muestra el caso de una de las mejores noches medidas, donde se tiene un seeing de 0.34 segundos de arco.

Cuadro 7.1: Resultados estadísticos de todas las noches medidas con el DIMM

No	Año	Mes	Día	N_{horas}	N_{med}	1 ^{er} Cuartil	Mediana	3 ^{er} Cuartil	Promedio	σ
1	00	08	19	1.33	102	0.64	0.72	0.94	0.79	0.18
2	00	08	20	1.92	163	0.56	0.69	0.80	0.69	0.16
3	00	08	21	5.04	394	0.69	0.92	1.17	0.99	0.38
4	00	12	01	2.58	156	0.51	0.55	0.61	0.56	0.09
5	00	12	03	7.19	684	0.53	0.62	0.72	0.63	0.13
6	00	12	04	8.25	886	0.80	0.91	1.07	0.95	0.23
7	00	12	07	2.45	153	0.66	0.76	0.83	0.75	0.12
8	00	12	08	8.68	729	0.70	0.91	1.12	0.94	0.33
9	00	12	09	8.12	728	0.51	0.64	0.86	0.71	0.25
10	00	12	11	7.64	528	0.66	0.82	1.00	0.86	0.24
11	00	12	12	3.88	324	1.28	1.42	1.60	1.46	0.25
12	00	12	13	7.46	674	2.07	2.60	3.14	2.67	0.81
13	01	03	22	2.62	171	0.66	0.76	0.89	0.79	0.16
14	01	08	04	3.37	279	0.37	0.40	0.46	0.42	0.08
15	01	08	06	6.48	399	0.62	0.69	0.77	0.70	0.11
16	01	08	07	6.50	415	0.58	0.68	0.83	0.73	0.20
17	01	08	08	3.57	268	0.44	0.48	0.54	0.52	0.14
18	01	08	09	1.24	124	0.67	0.72	0.80	0.76	0.13
19	01	08	28	7.60	715	0.69	0.79	0.93	0.82	0.19
20	01	08	29	8.21	628	0.61	0.70	0.80	0.71	0.16
21	01	10	06	6.16	505	0.44	0.52	0.67	0.56	0.14
22	01	10	07	5.81	320	0.48	0.66	0.74	0.62	0.15
23	01	10	09	5.71	517	0.55	0.59	0.64	0.60	0.09
24	01	10	10	3.91	287	0.52	0.60	0.66	0.59	0.10
25	01	10	11	5.04	387	0.81	0.96	1.15	1.02	0.30
26	01	10	29	3.20	119	0.36	0.42	0.48	0.44	0.10
27	01	11	17	2.98	187	0.55	0.90	1.16	0.93	0.40
28	01	11	18	2.83	204	0.59	0.65	0.75	0.68	0.15
29	01	11	19	3.52	223	0.48	0.81	1.22	1.00	0.68
30	02	01	14	5.34	418	0.46	0.52	0.58	0.53	0.10
31	02	01	17	1.69	153	0.94	1.09	1.25	1.10	0.23
32	02	01	19	3.48	176	0.54	0.64	0.72	0.64	0.12
33	02	01	22	8.35	781	0.59	0.70	0.89	0.77	0.24
34	02	01	23	8.26	774	0.80	0.91	1.05	0.94	0.21
35	02	02	05	8.53	778	0.79	0.95	1.22	1.04	0.36
36	02	02	06	10.07	1336	0.63	0.78	0.91	0.79	0.20
37	02	02	07	10.77	1494	0.62	0.75	0.89	0.77	0.23
38	02	02	08	10.53	1153	0.48	0.57	0.67	0.59	0.14
39	02	02	14	6.96	1277	0.60	0.69	0.77	0.70	0.14
40	02	02	15	4.24	604	0.38	0.45	0.51	0.45	0.09
41	02	02	16	6.02	1146	0.79	0.89	1.01	0.90	0.17
42	02	02	17	5.59	916	1.19	1.50	1.94	1.63	0.61
43	02	02	18	4.67	702	1.32	1.48	1.68	1.52	0.29
44	02	03	01	1.29	172	1.06	1.21	1.39	1.24	0.23
45	02	03	09	4.68	756	0.55	0.65	0.77	0.67	0.16
46	02	03	10	1.90	314	0.45	0.50	0.58	0.52	0.10
47	02	03	11	6.63	671	0.65	0.73	0.82	0.75	0.14
48	02	03	12	7.06	843	0.30	0.34	0.41	0.37	0.09
49	02	03	13	7.95	704	0.57	0.66	0.74	0.66	0.12
50	02	03	14	4.19	485	1.01	1.32	1.68	1.39	0.46
51	02	03	15	8.53	932	0.78	1.00	1.40	1.12	0.45
52	02	04	08	6.95	1005	0.43	0.56	0.81	0.68	0.37
53	02	04	09	8.38	1223	0.36	0.43	0.55	0.46	0.13
54	02	04	10	8.40	1203	0.43	0.52	0.63	0.54	0.16
55	02	04	11	9.51	995	0.32	0.40	0.48	0.41	0.10
56	02	04	12	8.31	1230	0.40	0.50	0.61	0.51	0.15
57	02	06	03	6.24	160	0.58	0.66	0.80	0.70	0.18
58	02	06	04	8.10	1344	0.59	0.71	1.15	0.96	0.56
59	02	06	05	6.91	980	0.45	0.50	0.57	0.52	0.09
60	02	06	15	4.85	821	0.93	1.25	1.51	1.25	0.40

Cuadro 7.2: continuación

No	Año	Mes	Día	N_{horas}	N_{med}	1 ^{er} Cuartil	Mediana	3 ^{er} Cuartil	Promedio	σ
61	02	06	16	6.82	1008	0.41	0.48	0.56	0.48	0.10
62	02	06	17	7.35	456	0.40	0.47	0.54	0.48	0.10
63	02	06	18	4.43	285	0.79	0.90	1.04	0.93	0.22
64	02	06	19	7.48	324	0.51	0.58	0.77	0.68	0.25
65	02	06	20	8.27	1299	0.46	0.53	0.62	0.55	0.13
66	02	06	21	7.20	945	0.52	0.59	0.67	0.60	0.11
67	02	07	04	4.23	642	0.55	0.64	0.77	0.70	0.23
68	02	07	05	7.29	1230	0.45	0.54	0.69	0.62	0.26
69	02	07	06	6.64	1046	0.37	0.44	0.50	0.44	0.09
70	02	07	07	7.30	1199	0.46	0.58	0.70	0.60	0.21
71	02	07	08	7.29	1059	0.38	0.43	0.52	0.46	0.13
72	02	07	09	3.64	510	0.50	0.64	0.88	0.72	0.29
73	02	07	27	2.50	371	0.58	0.64	0.74	0.66	0.12
74	02	07	28	3.45	477	0.55	0.65	0.81	0.71	0.22
75	02	07	29	8.42	1402	0.42	0.53	0.60	0.51	0.12
76	02	07	30	8.13	1264	0.46	0.50	0.56	0.51	0.09
77	02	08	01	7.80	1329	0.45	0.53	0.60	0.53	0.11
78	02	08	02	7.40	1713	0.44	0.50	0.57	0.51	0.11
79	02	08	03	9.38	1668	0.41	0.50	0.60	0.52	0.13
80	02	08	04	9.53	1594	0.42	0.51	0.69	0.62	0.30
81	02	08	05	9.53	1586	0.52	0.62	0.81	0.76	0.43
82	02	08	06	9.48	1439	0.54	0.68	1.00	0.81	0.37
83	02	08	07	9.41	1481	0.38	0.47	0.54	0.47	0.12
84	02	08	08	9.86	1806	0.60	0.72	0.86	0.77	0.26
85	02	08	09	8.51	693	0.53	0.65	0.81	0.69	0.19
86	02	08	10	9.34	1064	0.40	0.47	0.56	0.50	0.16
87	02	08	11	1.11	115	0.37	0.40	0.44	0.41	0.06
88	02	08	12	9.50	1507	0.40	0.45	0.51	0.46	0.09
89	02	08	13	9.18	1323	0.45	0.50	0.56	0.51	0.09
90	02	08	14	9.67	1724	0.39	0.43	0.48	0.44	0.07
91	02	08	15	9.35	1370	0.53	0.62	0.75	0.66	0.18
92	02	08	16	8.86	388	0.53	0.58	0.70	0.62	0.13
93	02	08	17	9.05	1463	0.42	0.51	0.62	0.53	0.16
94	02	08	18	9.99	1556	0.48	0.52	0.57	0.53	0.08
95	02	08	19	6.99	1007	0.50	0.70	0.91	0.72	0.24
96	02	09	18	7.26	497	0.42	0.50	0.59	0.52	0.12
97	02	09	19	7.87	645	0.61	1.07	1.69	1.21	0.71
98	02	10	08	5.29	765	0.51	0.57	0.64	0.59	0.11
99	02	10	09	9.60	1265	0.38	0.52	0.63	0.53	0.20
100	02	10	10	10.32	1702	0.41	0.55	0.97	0.74	0.45
101	02	10	11	3.50	459	0.46	0.49	0.54	0.51	0.07
102	02	10	14	8.80	857	0.31	0.37	0.44	0.41	0.17
103	03	03	19	7.46	963	1.16	1.51	2.01	1.63	0.59
104	03	05	16	5.86	633	0.48	0.53	0.60	0.55	0.09
105	03	05	19	1.85	296	0.61	0.69	0.86	0.75	0.20
106	03	05	20	2.07	300	0.61	0.68	0.85	0.75	0.20
107	03	05	21	5.19	884	0.77	0.93	1.18	1.01	0.31
108	03	05	22	4.39	544	0.67	0.76	0.95	0.84	0.25
109	03	05	23	3.46	468	0.66	0.75	0.86	0.78	0.17
110	03	05	24	7.53	1136	0.60	0.67	0.76	0.69	0.12
111	03	05	25	6.21	966	0.69	0.95	1.26	1.00	0.37
112	03	05	26	5.58	720	0.37	0.43	0.53	0.46	0.11
113	03	05	27	5.67	678	0.60	0.76	0.94	0.79	0.23
114	03	05	28	6.14	1091	0.54	0.61	0.67	0.62	0.12
115	03	05	29	4.08	492	0.72	0.85	0.96	0.86	0.18
116	03	05	30	8.75	1712	0.57	0.64	0.73	0.66	0.13
117	03	05	31	3.19	625	0.55	0.64	0.74	0.66	0.15
118	03	06	06	3.53	692	0.77	0.93	1.10	0.95	0.22
119	03	06	22	4.49	537	0.74	0.85	0.98	0.87	0.18
120	03	06	23	3.40	559	0.47	0.54	0.72	0.63	0.25

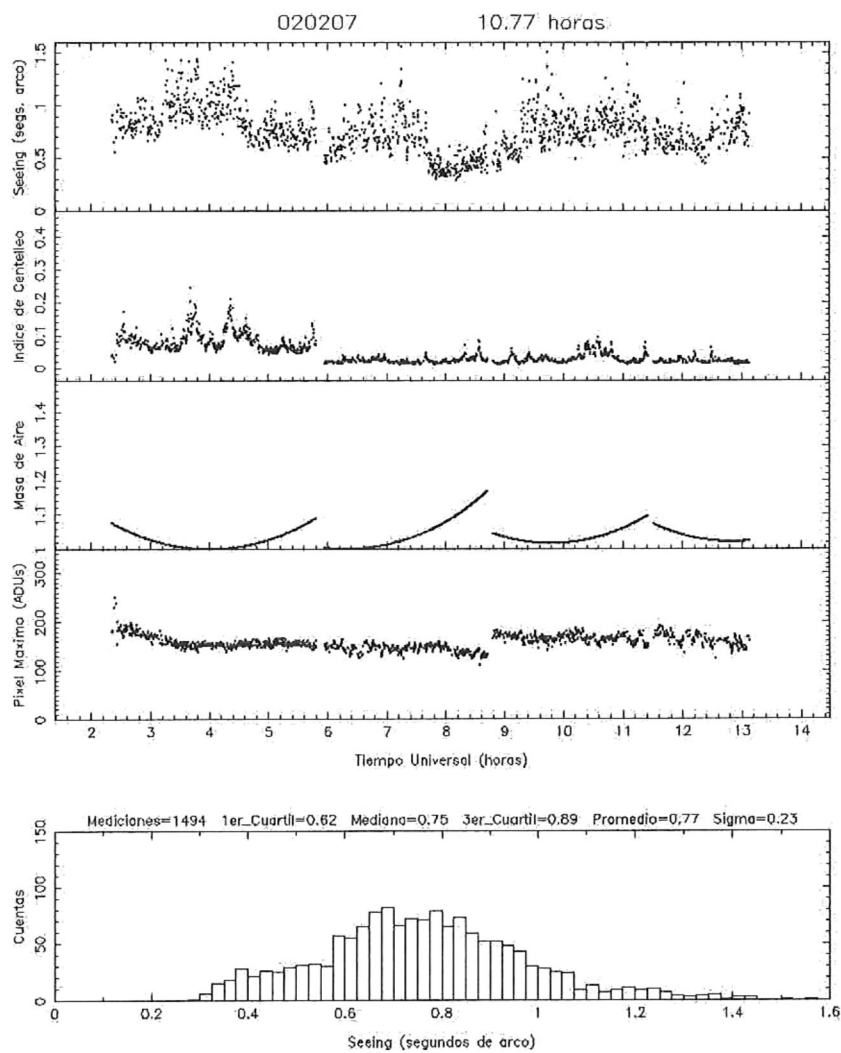


Figura 7.4: Ejemplo del comportamiento del seeing en una noche cualquiera. Aquí se ven las variaciones del seeing, índice de centelleo, masa de aire y pixel máximo en función del tiempo, en la última gráfica se presenta un histograma de la distribución de las mediciones del seeing.

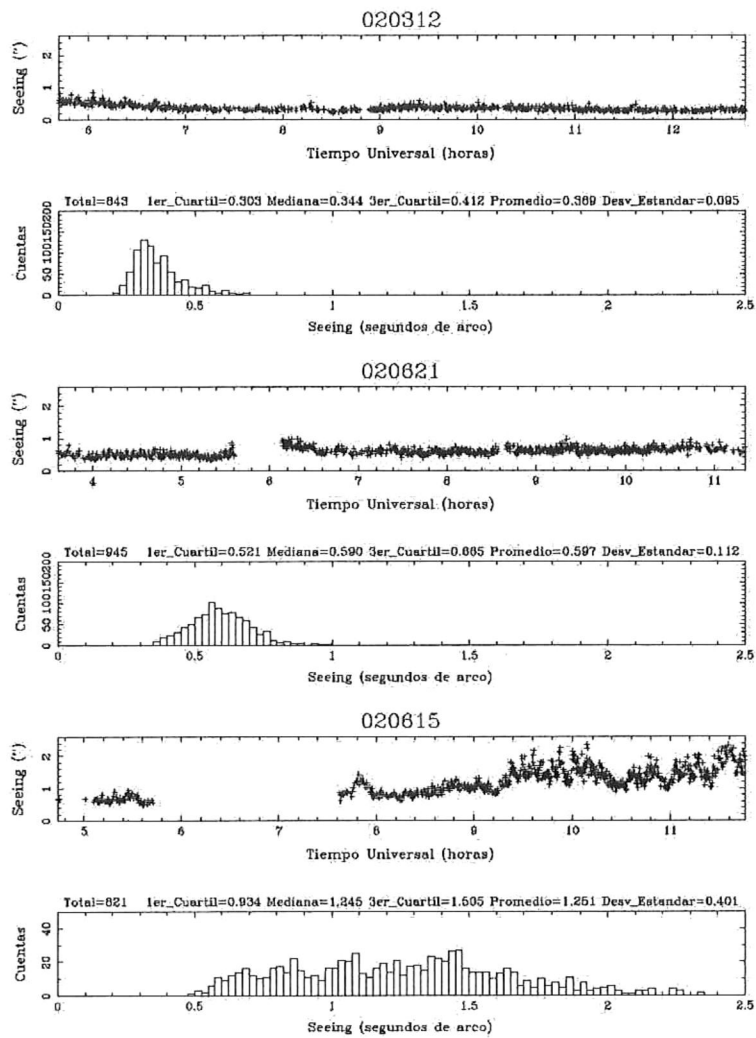


Figura 7.5: Comparación de tres noches típicas, la noche del 12 de marzo del 2002 (020312), la del 21 de junio del 2002 (020621) y la del 15 de junio del 2002 (020615).

Una muy buena noche, es donde se tiene un seeing por debajo del promedio de alrededor de unos 0.3 segundos de arco, una noche así se midió el 12 de marzo del 2002, en donde se aprecia un seeing promedio de 0.37 segundos de arco como se ve en las dos graficas de la parte alta de la Figura 7.5, además, se logró tener un total de 843 mediciones en aproximadamente 7 horas con un seeing bastante constante toda la noche.

Una noche promedio, es como la noche del 21 de junio del 2002 como se muestra en las dos gráficas de en medio de la Figura 7.5. En esta noche se tomaron 945 mediciones en 7 horas aproximadamente y se tuvo un seeing mediano de 0.60 segundos de arco

Por último, un ejemplo de una noche muy mala se muestra en las últimas dos gráficas de la Figura 7.5, fue en la noche del 15 de junio del 2002, en la que el seeing al inicio de la noche era bastante bueno pero después se fué deteriorando rapidamente, luego en la siguiente medición el seeing comenzó a variar mucho, de tal manera que, como se ve en la distribución, las mediciones arrojaron muchos valores diferentes y todos muy distribuidos, teniendo como resultado un seeing promedio de 1.251 segundos de arco, apesar de la gran cantidad de mediciones (847) que se hicieron a lo largo de 7 horas.

Los valores del seeing obtenidos para las 120 noches, representado en meses, se muestran en la Figura 7.6. Veintiocho noches (23 %) tuvieron una mediana del seeing de 0.50 segundos de arco o menos, mientras que sólo once noches (9%) tuvieron una mediana de 1.0 segundos de arco (la mayoría en los meses de diciembre a marzo). De todos los meses muestreados en el que más información se obtuvo fue en agosto. La distribución del seeing para todas las observaciones, comprenden 94,644 mediciones acumuladas durante un total de 754 horas como se ve en las tablas 7.1 y 7.2, además estos datos se muestran en la Figura 7.7. En la Figura 7.7 se muestra además del número de cuentas, la función acumulativa contra el seeing, la cual es simplemente otra manera

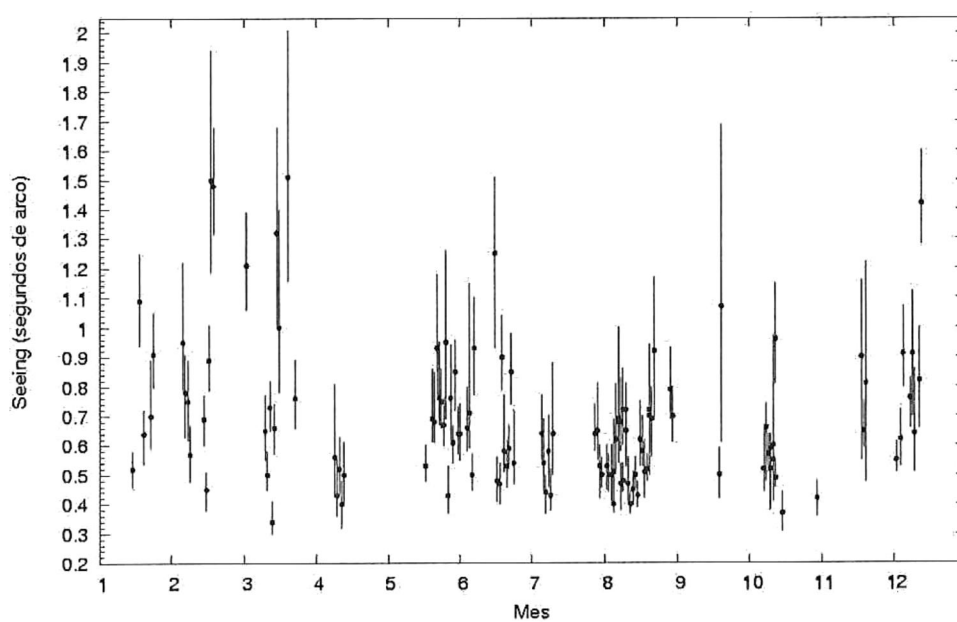


Figura 7.6: Distribución por mes del seeing. Los puntos representan los valores de la mediana mientras que las barras representan el primer y tercer cuartil de las mediciones.

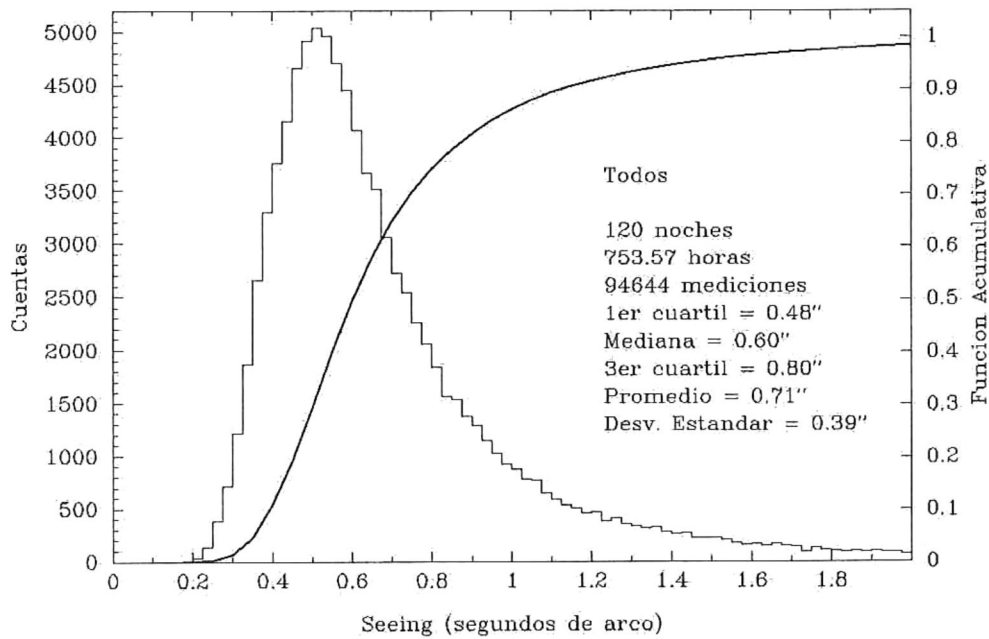


Figura 7.7: Distribución estadística de todos los datos.

de ver como fue el comportamiento del seeing. Esta función va desde cero hasta 1, donde 1 es el 100 % de las mediciones, esta función nos dice que porcentaje de mediciones están por debajo del seeing medido. Por ejemplo, se puede ver que cuando el seeing es de 0.6 segundos de arco la función acumulativa es de 0.5, lo que nos dice que el 50 % de las mediciones están por debajo de un seeing de 0.60 segundos de arco. La mediana del seeing es de 0.60 segundos de arco y el valor del primer cuartil es de 0.48 segundos de arco. El seeing promedio de todos los datos obtenidos es de 0.71 segundos de arco.

7.4. Resultados por noche

En las tablas 7.1 y 7.2 se muestran todos los resultados obtenidos de la reducción de datos de todas las noches, viendo estas tablas se puede determinar que, por ejemplo, para la noche del 7 de Febrero del 2002 mostrado en la Figura 7.4 después de 10.8 horas se obtubieron 1494 mediciones, las cuales arrojan que el seeing tuvo un valor mediano de 0.75 segundos de arco con un primer y tercer cuartil de 0.62 y 0.89 segundos de arco respectivamente. El valor promedio fue de 0.77 segundos de arco con una desviación estándar de 0.23 segundos de arco.

7.5. Distribuciones por mes

Para un análisis detallado de la información obtenida a lo largo de los 3 años, se hizo un desglose de cómo fue el comportamiento en cada mes del año. De la Tabla 7.3, se puede observar que el mejor mes medido fue agosto seguido de mayo, junio y julio, el peor mes medido fue noviembre con tan sólo 614 mediciones, seguido de enero con 2302. El mejor seeing se midió en abril (0.52 segundos de arco) seguido de julio (0.57 segundos de arco), agosto (0.60 segundos de arco) y octubre (0.61 segundos de arco). El peor seeing se midió en diciembre (1.11 segundos de arco) y enero (0.96 segundos de arco).

En las gráficas mostradas en las Figuras 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11 se ve cómo fue la distribución del seeing a lo largo del año. El histograma está mejor definido y no tan variante en los meses con mayor número de mediciones, por ejemplo, en octubre se realizaron sólo 7183 mediciones a lo largo de 11 noches, por lo que, la información no es muy confiable; sin embargo, en el caso de agosto se tomaron 28313 mediciones durante 29 noches, los valores mostrados son mucho más confiables. En abril, sólo se midió durante 5 noches, por lo que la información de éste mes es muy poco confiable

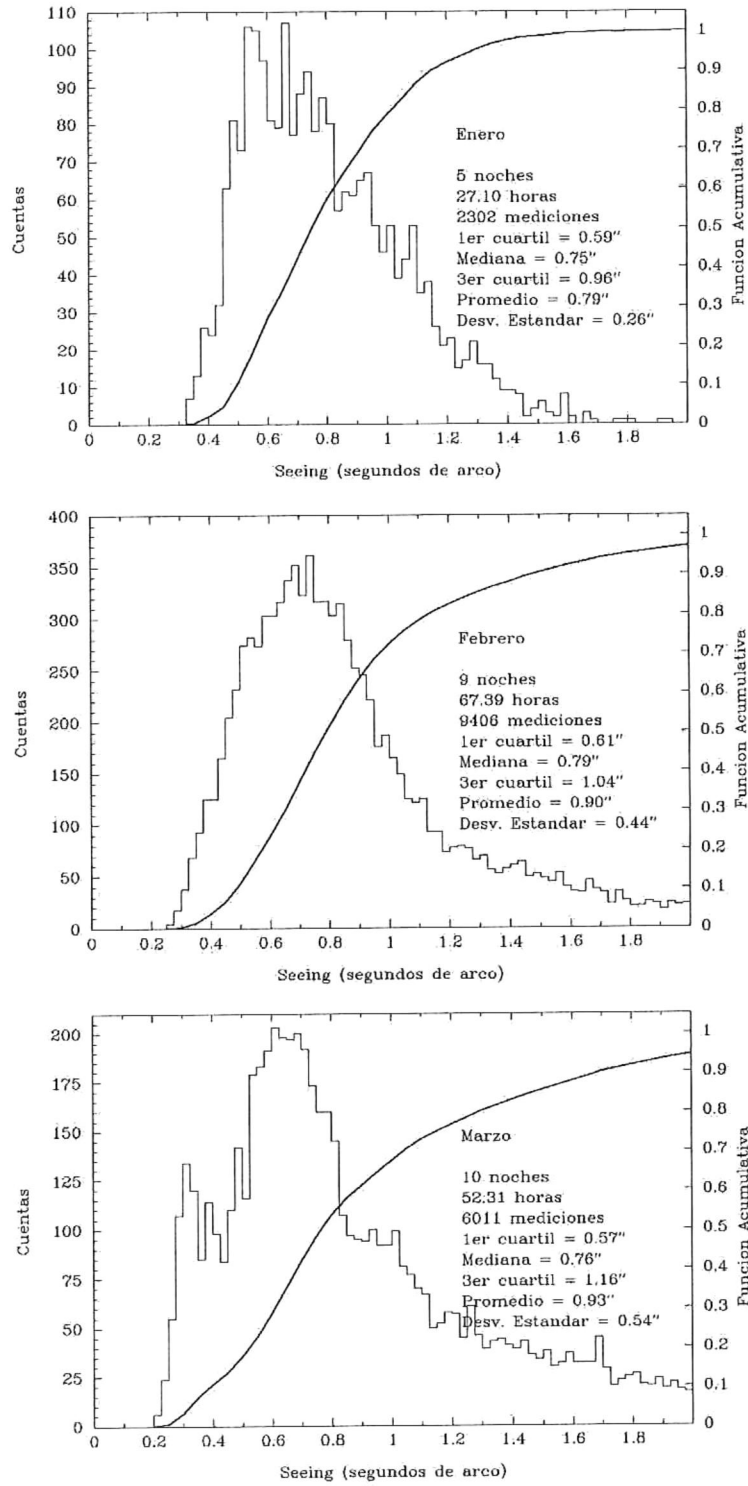


Figura 7.8: Estadística del seeing en SPM por mes.

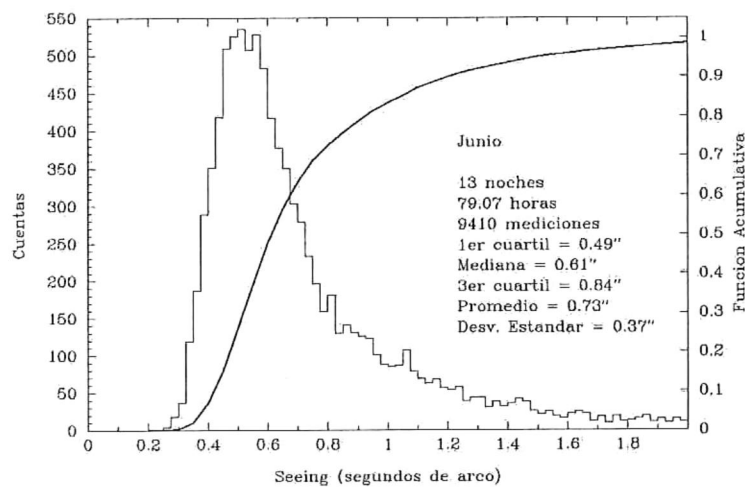
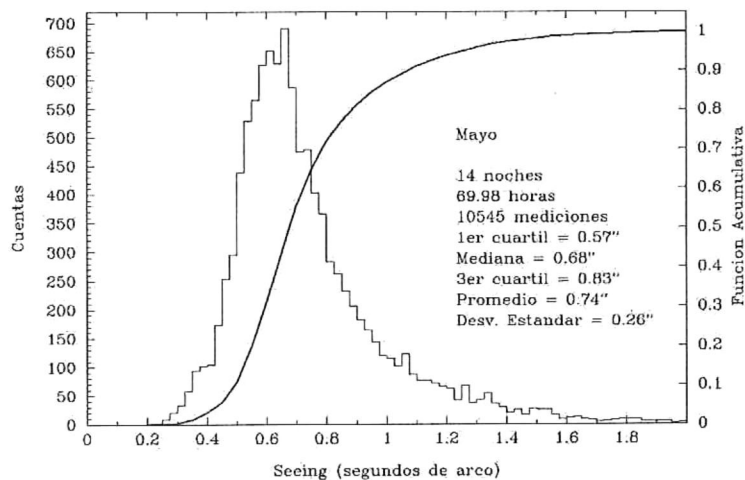
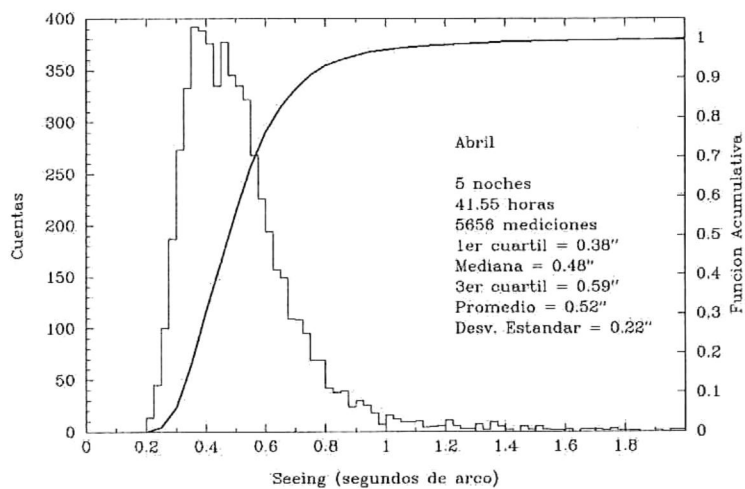


Figura 7.9: continuación

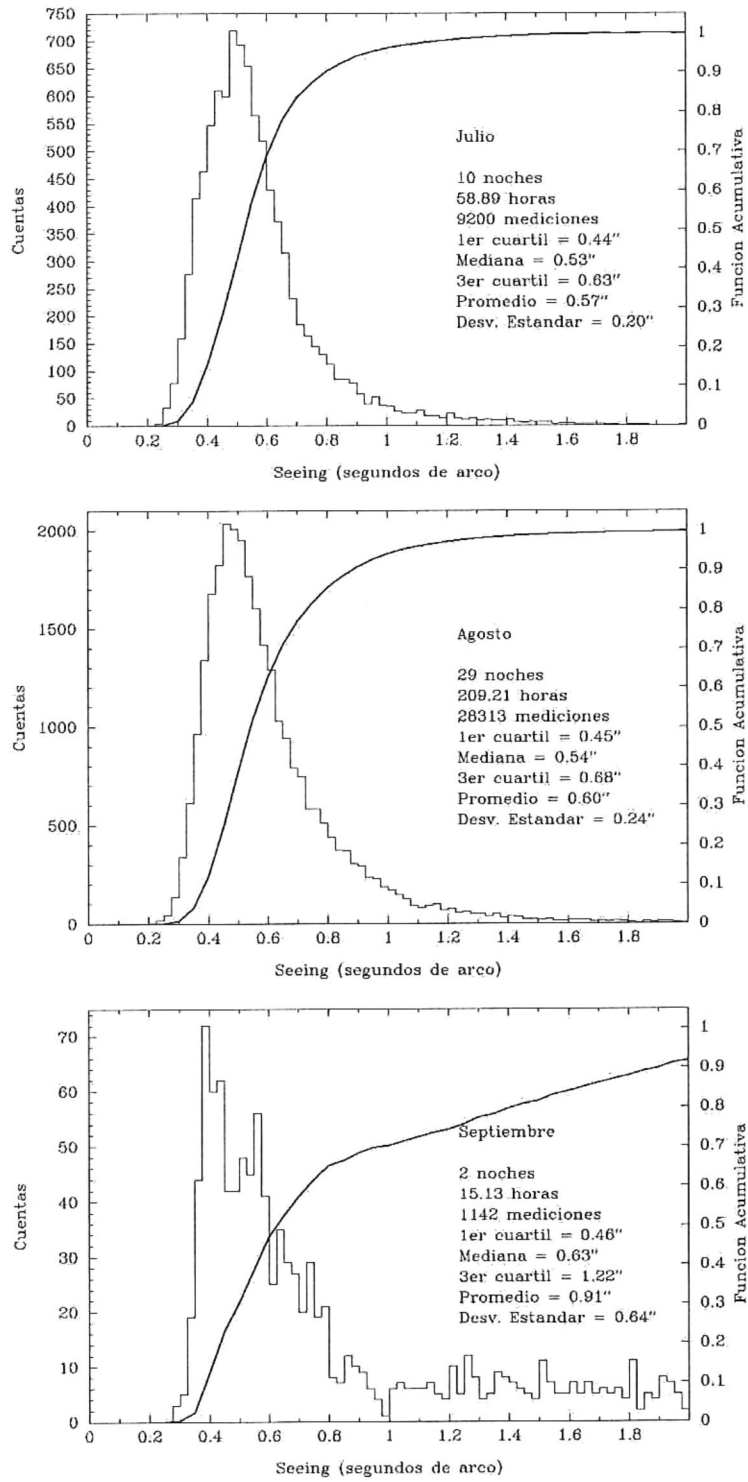


Figura 7.10: continuación

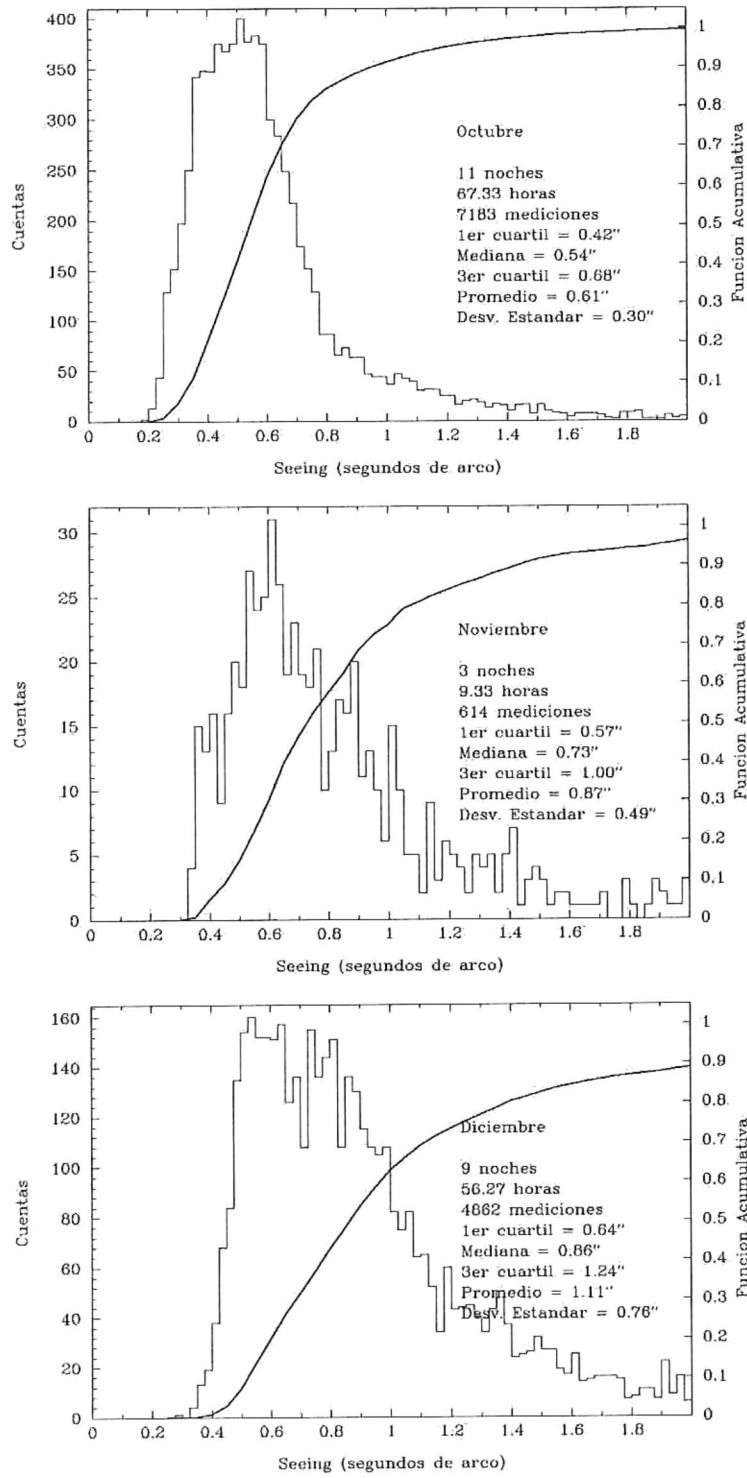


Figura 7.11: continuación

Mes	N_{horas}	N_{med}	1 ^{er} Cuartil	Mediana	3 ^{er} Cuartil	Promedio	σ
Enero	27.10	2302	0.59	0.75	0.96	0.79	0.26
Febrero	67.39	9406	0.61	0.79	1.04	0.90	0.44
Marzo	52.31	6011	0.57	0.76	1.16	0.93	0.54
Abril	41.55	5656	0.38	0.48	0.59	0.52	0.22
Mayo	69.98	10545	0.57	0.68	0.83	0.74	0.26
Junio	79.07	9410	0.49	0.61	0.84	0.73	0.37
Julio	58.89	9200	0.44	0.53	0.63	0.57	0.20
Agosto	209.21	28313	0.45	0.54	0.68	0.60	0.24
Septiembre	15.13	1182	0.46	0.63	1.22	0.91	0.64
Octubre	67.33	7183	0.42	0.54	0.68	0.61	0.30
Noviembre	9.33	614	0.57	0.73	1.00	0.87	0.49
Diciembre	56.27	4862	0.64	0.86	1.24	1.11	0.76

Cuadro 7.3: Comparación del seeing en los 12 meses del año.

aún cuando arroje el mejor seeing del año.

7.6. Distribuciones por estación

Al ser el sitio de San Pedro Mártir un lugar donde las variaciones climatológicas durante el año son muy marcadas, es importante incluir gráficas de los resultados obtenidos en las estaciones del año. En invierno, la temperatura llega a alcanzar los 15° bajo cero, mientras que, en verano alcanza casi los 30°. En la Figura 7.12 y 7.13 se muestran estadísticas del seeing en las cuatro estaciones del año.

A partir de esta información se puede decir que la estación con peor seeing es invierno, además de ser la peor muestreada con tan sólo 17548 mediciones durante 23 noches. Primavera es un poco mejor que el invierno, se lograron obtener 23741 mediciones durante 3 noches y se midió un seeing promedio de 0.69 segundos de arco. Se ha mostrado que en verano es la mejor estación del año para observar, ya que se lograron 40696 mediciones, durante 44 noches con un seeing promedio de 0.61 segundos de arco, finalmente en otoño, el seeing vuelve a aumentar, ya que su promedio fue

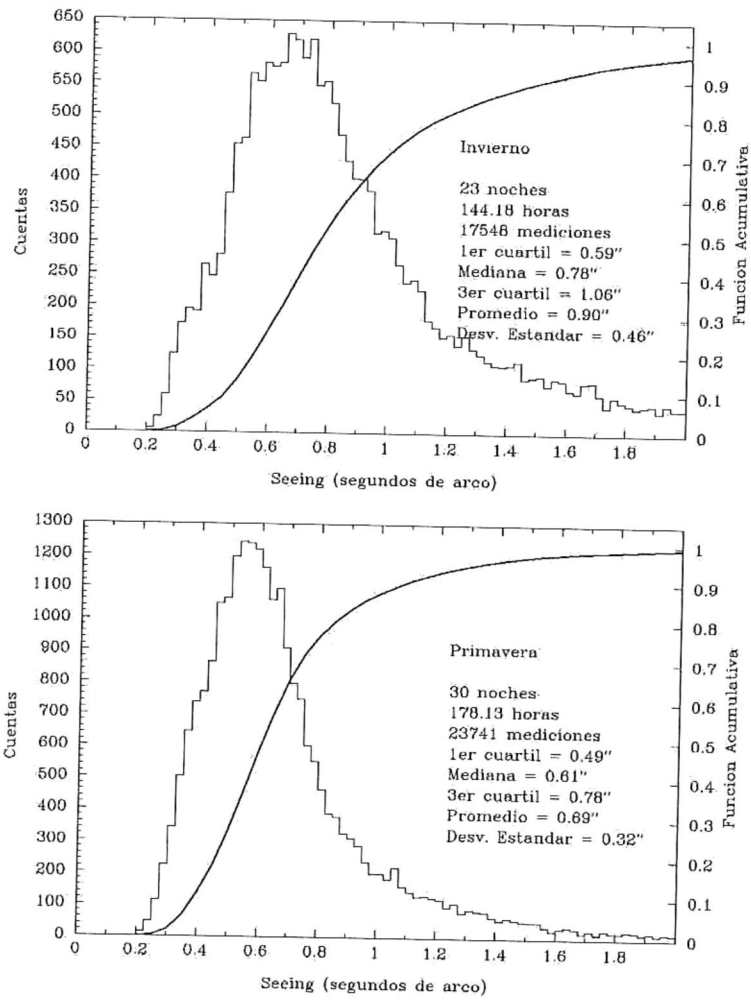


Figura 7.12: Distribución del seeing en invierno y primavera.

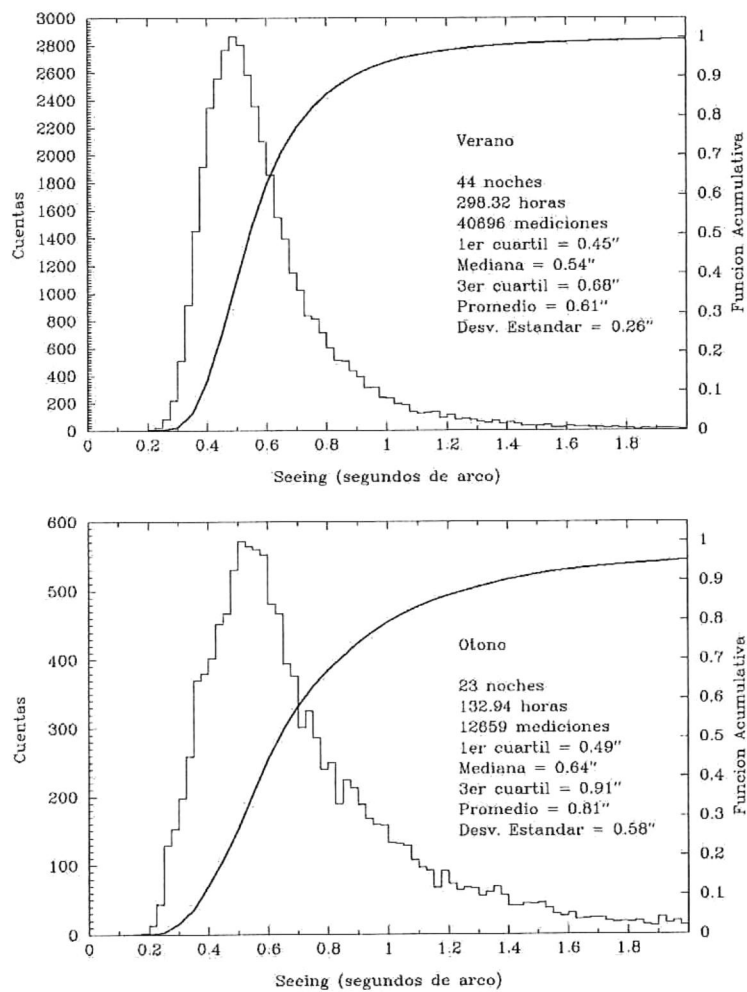


Figura 7.13: Distribución del seeing en verano y otoño.

de 0.81 segundos de arco. Con este análisis se vió que la mejor estación para realizar observaciones astronómicas en SPM es verano.

7.7. Comparación con los resultados obtenidos en SPM usando otras técnicas

Echevarría et al.(1998) midieron el seeing en SPM durante 383 noches el seeing utilizando un STT (Site Testing Telescope) y encontraron un seeing medio de 0.61 segundos de arco con un primer cuartil de 0.50, que, comparado con lo que se encontró en este trabajo, es muy parecido (un seeing medio de 0.60 y un primer cuartil de 0.48), aunque las técnicas y la metodología utilizada sea muy distinta entre el DIMM y el STT, por lo que para poder hacer comparaciones con diferentes técnicas es importante tener muchas mediciones y un número grande de noches. En el 2003, Avila et al. utilizaron un Scidar generalizado que se montó en los telescopios de 1.5 y 2.1 m, en el telescopio de 1.5 se encuentra localizado a 1 m sobre el nivel del suelo y el de 2 m se encuentra a 20 m, Avila et al. encontraron un seeing medio de 0.71 segundos de arco, en el telescopio de 1.5 se midió durante 8 noches mientras que en el 2 m se midió sólo 3 noches. En su resumen, Conan et al. (2002) mencionan una mediana del seeing de 0.92 segundos de arco para las cuatro campañas en las que midió durante 31 noches. Este valor es 0.17 segundos de arco mayor al reportado en este trabajo. Probablemente la diferencia entre su resultado y el de Avila et al. (2003) y lo que se reporta en esta tesis, fue debido a que sus mediciones las tomó a una distancia muy cercana al suelo en donde las corrientes de aire, son muy variantes, debido a los objetos ubicados en el suelo, además de la colisión de las corrientes de aire con el suelo, este fenómeno es conocido como la turbulencia del suelo o *ground-turbulence*. En particular, se vió que durante dos de sus campañas Conan et al. (2002) montaron el DIMM

en el mismo lugar en donde se ubicó el GSM en la campaña de diciembre. Eso coloca la apertura del prácticamente arriba del suelo (véase su Figura 2). Los autores atribuyeron esto al tiempo de integración (10 ms) del DIMM, que de acuerdo con ellos, se debe corregir por un factor calculado de las mediciones simultáneas de los perfiles de la turbulencia y el viento. De esta información ellos estimaron que para corregir las mediciones se debían de multiplicar por un factor entre 1.01 y 1.85 para las mediciones con una exposición de 10ms usada en las campañas de diciembre del DIMM de 2000.

7.8. Comparación con otros sitios

Uno de los aspectos más importantes en las mediciones del seeing, es poder compararlo con las mediciones realizadas en otros lugares del mundo, ya que con esto se puede evaluar el sitio a nivel mundial. En la Tabla 7.4 (Michel et al. 2003) se muestran los resultados obtenidos en otros sitios astronómicos del mundo en los que se utilizó la misma técnica del DIMM. En la tabla se ve que el mejor sitio medido es Paranal, en Chile, donde reportan cerca de 1700 noches de observación, seguido por La Silla también en Chile, observando así la importancia que Chile le ha dado a la medición del seeing. La altura de todos los sitios varía muchísimo, por lo que las mediciones también varían mucho, San Pedro Mártir es uno de los lugares muestreados más altos; otro de los factores que hacen diferente esta comparación es que el tiempo de exposición es muy diferente.

Como se ve en la tabla San Pedro Mártir es uno de los mejores sitios astronómicos del mundo.

Sitio	Altura Sitio (msnm)	Altura DIMM (m)	Tiempo Exposición (ms)	Primer Cuartil (segarco)	Mediana (segarco)	Tercer Cuartil (segarco)	Promedio (segarco)	N _{noches}	Inicio	Fin
Paranal, Chile	2636	6	5	0.64	0.82	1.08	0.91	~ 1700	03/98	11/02
La Silla, Chile	2335	6	5	0.70	0.89	1.15	0.97	~ 1400	03/99	11/02
Maidanak, Uzbekistan	2580	6	0	0.55	0.69	0.90	0.76	725	08/96	11/00
Apache Point, USAa	2788		20	0.83	1.03	1.30	1.17	261	02/99	06/03
Kunming, China	1940	4	20		1.09		0.95	256	05/95	12/96
Gaomeigu, China	3193	4	20		0.78			234	05/95	12/96
La Palma, España	2400	5	10	~ 0.52	0.69	~ 0.90		233	10/94	08/98
Mount Fowlkes, USA	2027	1.8	10	~ 0.88	1.03	~ 1.28		186	07/01	07/02
San Pedro Mártir, México	2800	8.3	6	0.48	0.60	0.81	0.71	123	08/00	06/03
Sierra Negra, México	4580	5	10,20	0.62	0.78	1.05	0.90	85	02/00	04/03
Siding Springs, Australia	1130	2	10				1.20	64	06/93	12/93
Cerro Tololo, Chile	2200	6	0	0.79	0.96	1.17		48	05/02	07/02
Cerro Chico, Chile	5150	2.5	0	0.55	0.71	0.87		38	07/98	10/00
Devasthal, India	2540	2	10		1.07		1.20	37	10/98	12/98
Polo Sur	3200	12	33	~ 1.20	1.70	~ 2.20		28	05/95	09/95
Mauna Kea, USA	4123		0		0.88		0.92	13	05/02	06/02
Cananea, México	2480	2	20	0.78	0.91	1.08			02/99	10/99
Karoo Plateau, Sudafrica	1760			0.74	0.92	1.16			04/94	02/98

Cuadro 7.4: Comparación de otros sitios con SPM en los que utilizaron estudios similares hechos con el DIMM. (Michel et al. 2003)

Capítulo 8

El seeing y los parámetros meteorológicos

En SPM se encuentran instalados diversos dispositivos para medir parámetros meteorológicos, tales como: velocidad del viento, presión barométrica, humedad relativa y temperatura exterior. Estos han sido medidos por varios años logrando mediciones simultáneas con nuestro estudio del seeing en casi todas las noches, por lo que, se decidió comparar dichas mediciones con el seeing para ver si existía alguna correlación entre ellos y ver si estos influyen o no en el seeing.

8.1. El seeing y la temperatura exterior

Al graficar el nuestras mediciones del seeing con la temperatura exterior (Figura 8.1), se encontró que para temperaturas menores a 0° y mayores a 18° las mediciones del seeing comienzan a dispersarse, por lo que, al parecer a temperaturas muy bajas el seeing empeora, aunque no se

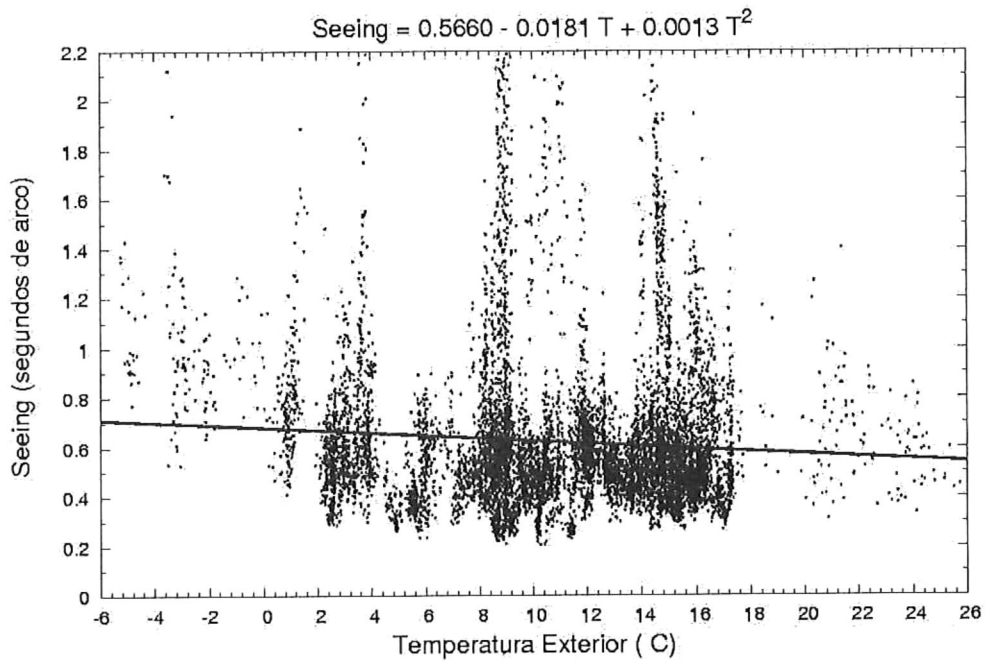


Figura 8.1: Seeing contra la temperatura exterior.

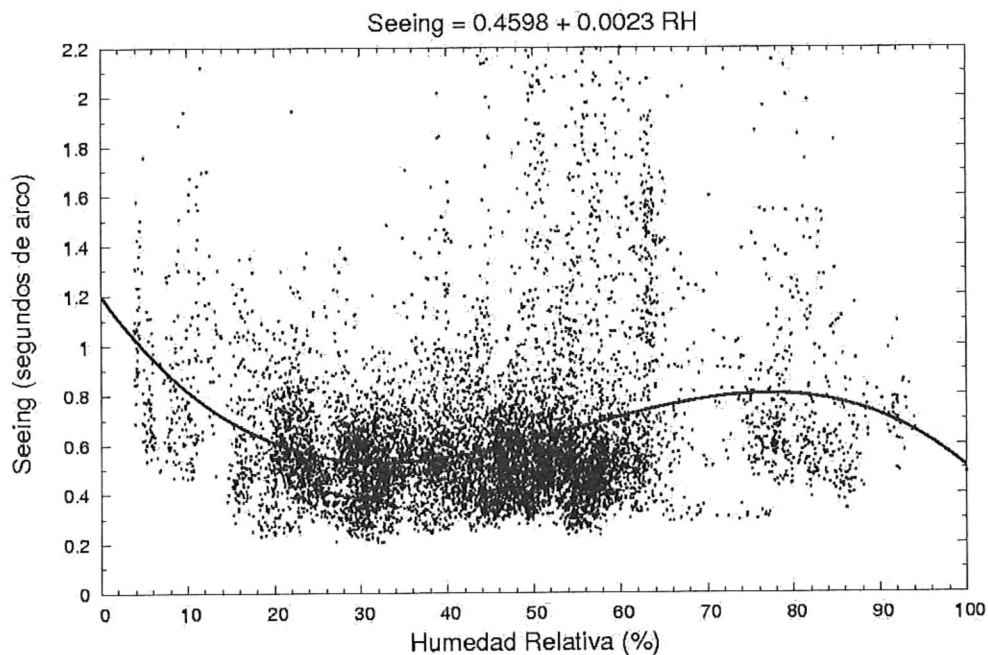


Figura 8.2: Seeing contra la humedad relativa.

puede afirmar con certeza esto debido al bajo número de mediciones tomadas. Tal vez esto se deba a que en realidad las mediciones tomadas en SPM siempre oscilaron entre 2 y 17°C, por lo que las mediciones obtenidas a temperaturas menores o mayores a este intervalo fueron muy pocas. Pero lo que si se puede ver es que las mejores mediciones del seeing estuvieron entre los 8 y 16°C. Pero en realidad no se encontró una correlación entre el seeing y este parámetro, la curva es el mejor ajuste que se pudo hacer.

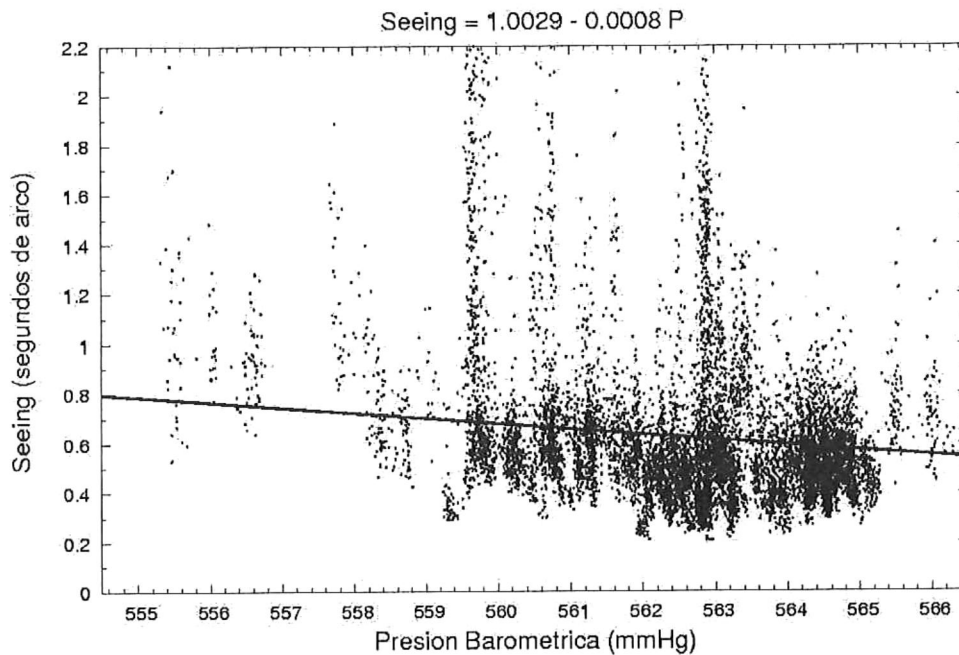


Figura 8.3: Relación del seeing con la presión barométrica en SPM

8.2. El seeing y la humedad relativa

En la Figura 8.2, se muestra el comportamiento de las mediciones del seeing con respecto al porcentaje de humedad relativa al momento de tomar las mediciones. Lo más importante que se ve en la figura es que la mayor parte de las mediciones se tomaron cuando existía una humedad relativa entre 20 y 60 %.

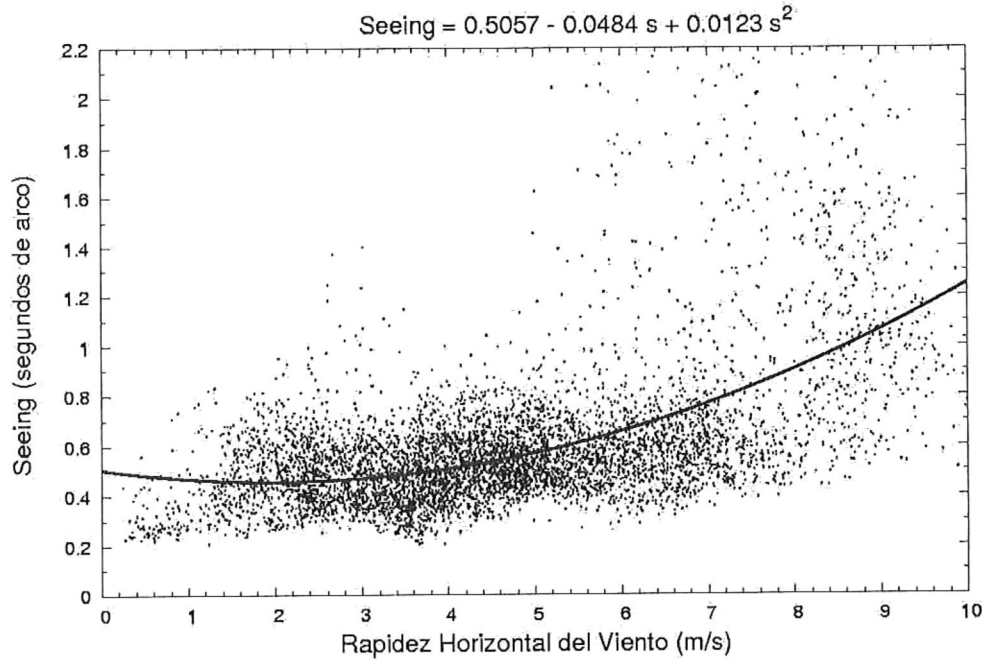


Figura 8.4: Relación del seeing contra la rapidez horizontal del viento.

8.3. El seeing y la presión barométrica

En la Figura 8.3, se ve cómo está relacionado el seeing, contra la presión barométrica en las mediciones que se tomaron simultáneamente con las mediciones de la presión, de aquí lo único que se ve es que la presión barométrica en SPM fluctúa entre 560 y 565 mmHg, pero no se ve que exista una relación entre ambos, tal vez a lo único que afecte la presión sea a la instrumentación del DIMM, pero como ésta no varía mucho, no lo afecta en realidad.

8.4. El seeing y la rapidez horizontal del viento

De todos los parámetros que se analizaron, la rapidez horizontal del viento es la que tiene mayor correlación con el seeing, ya que como muestra la Figura 8.4, las mediciones del seeing comienzan a tomar valores muy altos después de los 5 m/s, además se vió como entre los 2 y los 5 m/s las mediciones del seeing son más o menos constantes, mientras que después de los 5 m/s comienzan a dispersarse. Tal vez esto sea debido a que entre mayor era la rapidez del viento, la torre en donde estaba montado el DIMM vibraba más, por lo que, además de el centelleo que se detectaba, el viento le agregaba un factor más que no estaba relacionado con la turbulencia atmosférica.

8.5. El seeing y la velocidad vertical del viento

En la Figura 8.5 se ve que entre mayor es la velocidad del viento, mayor es la dispersión de las mediciones, por lo que, las peores mediciones del seeing se observaron cuando había velocidades superiores a los 0.4 m/s, además, se ve cómo la curva que se le ajustó tiene una pendiente ascendente. Es importante mencionar, que la mayoría de las mediciones se realizaron cuando el viento tenía una velocidad vertical entre 0 y 0.6 m/s.

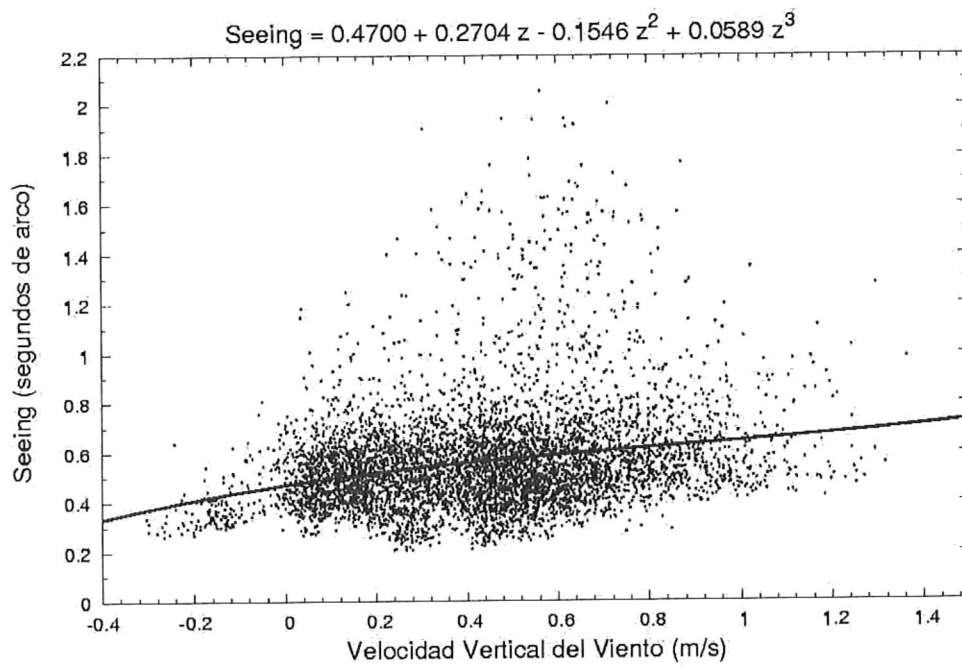


Figura 8.5: En esta gráfica se muestra la relación del seeing contra la velocidad vertical del viento.

Capítulo 9

Conclusiones y recomendaciones

A partir del análisis de 120 noches de mediciones del seeing, distribuidas en un lapso de tres años, en SPM se puede concluir lo siguiente:

(a) A una altura de 8.3 metros sobre el nivel del suelo y con un tiempo de integración de 6 ms, el seeing mediano en SPM, es de 0.60 con un primer y tercer cuartil de 0.48 y 0.80 segundos de arco respectivamente.

(b) Es común que el seeing se mantenga muy estable durante noches enteras, los mejores resultados por noche dan una mediana de 0.37 segundos de arco por más de 8 horas de observación continua.

(c) Se encontró una variación substancial del seeing con las estaciones del año, resultando: en verano, una mediana de 0.55 segundos de arco, es excelente; En primavera y otoño, se obtuvieron valores de alrededor de 0.62 segundos de arco, que son muy buenos; En invierno se tuvo una mediana del seeing de 0.78 segundos de arco que no es bueno. Estos resultados pueden ser influenciados por el bajo número de mediciones, especialmente para otoño e invierno, que deberían ser más medidos.

(d) Extrapolando el resultado obtenido en este trabajo, se estimo que la mediana del seeing por año es de 0.61 segundos de arco a tiempo de exposición cero a 15 m sobre el nivel del suelo.

(e) En comparación con los parámetros meteorológicos, se encontró una correlación con la velocidad vertical y la rapidez del viento.

(f) San Pedro Mártir es un excelente sitio astronómico comparado con los demás sitios alrededor del mundo.

Al ver que, con las mediciones obtenidas con el DIMM que nosotros utilizamos, los resultados del seeing fueron muy buenos y al comparar éstos con otros sitios se comprobó que SPM es uno de los mejores sitios astronómicos del mundo. Pero cabe mencionar que el número de noches medidas a lo largo de casi 3 años fue muy pobre, pues tan solo se muestrearon 120 noches. Además mucha de la información se perdió debido a errores humanos. Como se vio en el capítulo 7, el proceso de adquisición de datos es un proceso repetitivo, por lo que uno se haría naturalmente la pregunta: ¿Podríamos automatizar el DIMM de tal manera que, la toma de datos y el proceso sea continuo? La respuesta es sí. En la actualidad hay grupos que están realizando este trabajo y existen dos DIMM completamente automáticos y autónomos llamados RoboDIMMs uno instalado en Cerro Tololo en el CTIO (Cerro Tololo Interamerican Observatory) y el otro en el Observatorio del Roque de los muchachos desarrollado por el ING (Isaac Newton Group of Telescopes). El que se encuentra en Cerro Tololo cuenta con una página en internet donde proporciona automáticamente el seeing en el observatorio.

Con este trabajo pretendo mostrar la importancia de la medición del seeing en SPM, construcción de un DIMM automático, un RoboDIMM el cuál puede ser desarrollado por el IA-UNAM.

Además recomiendo que se estudie con mayor énfasis cual es la relación entre los parámetros meteorológicos y el seeing, para obtener mayor información acerca de estos y así podremos saber

cuales son aquellos que en realidad afectan las observaciones astronómicas en SPM, con lo que se reducirá el error en las mediciones astronómicas.

La importancia de medir y catalogar a SPM como uno de los mejores sitios en el mundo abrirá las puertas a inversión nacional y extranjera, y permitirá el desarrollo y construcción de más grandes y mejores telescopios en este sitio, colocandolo así en un excelente nivel competitivo con otros países.

Apéndice A

Programas de reducción de datos

```
PROGRAM GraficaDimm
! Programa para graficar y calcular estadísticas de los datos
! de cada noche del dimm.
!
! ENTRADAS: GraficaDimm.files.- lista de archivos a procesar
!
! SALIDAS: Una gráficas postscript por cada noche.
! EstadísticasDimm.dat.- Estadísticas de cada noche.
! Buenos.files.- lista de los archivos aceptables.
!
! Raúl Michel, Javier Magallón
! Nov. 2003
! MaxDat es el número máximo de mediciones por noche

PARAMETER (MaxDat=4000)
REAL TU(MaxDat), SeeingL(MaxDat), SeeingT(MaxDat),
& Seeing(MaxDat), LDivT(MaxDat), MasaDeAire(MaxDat),
& Centelleo(MaxDat), PixMax(MaxDat), Cociente(MaxDat)
REAL yMax, yMin, TUMax, TUMin, Mediana, PrimerCuartil,
& TercerCuartil, Promedio, Sigma, HoraMin, HoraMax,
& TotalHoras, Horas, SalidaSol, PuestaSol, Suma(10)

REAL*8 Latitud, Longitud, SalidaSol8, PuestaSol8

INTEGER i, j, Total, Noches, MVT, Agno, Mes, Dia

CHARACTER*20 ArchEntrada, ArchPostscript
CHARACTER*100 Etiqueta
CHARACTER*6 a(15)
CHARACTER*2 kk
! Latitud y longitud del sitio en grados. 31g02'39", -115g27'49"
Latitud = 31.0442d0
Longitud = -115.4640d0

! Total de horas y noches medidos
Horas = 0.0
Noches = 0
```

```

DO   i = 1,10
Suma(i) = 0.0
ENDDO
! Lista de los archivos de datos a procesar
OPEN(8, FILE='GraficaDimm.files', STATUS = 'OLD')
! Archivo con los resultados de las estadísticas

OPEN(7, FILE='EstadisticasDimm.dat', STATUS = 'UNKNOWN')
WRITE(7,'(a)')
&  "# n AA MM DD Horas Obs 1erC Med 3erC Prom Sigma"
WRITE(*,*)
WRITE(*,'(a)')
&  "# n AA MM DD Horas Obs 1erC Med 3erC Prom Sigma"

! Archivo con la lista de noches aceptables
OPEN(10, FILE='Buenos.files', STATUS = 'UNKNOWN')

! Inicio del ciclo
5   TotalHoras = 0.0
    i = 1
    READ(8,*,END=999) ArchEntrada
    OPEN(9, FILE=ArchEntrada, STATUS='OLD')

! Extraer fecha a partir del nombre del archivo
    Agno = 2000+
    &  10*(ICHAR(ArchEntrada(1:1))-48)+ICHAR(ArchEntrada(2:2))-48
    Mes = 10*(ICHAR(ArchEntrada(3:3))-48)+ICHAR(ArchEntrada(4:4))-48
    Dia = 10*(ICHAR(ArchEntrada(5:5))-48)+ICHAR(ArchEntrada(6:6))-48

! Calcular puesta del sol.
    CALL SUNRS(Latitud,Longitud,Agno,Mes,Dia,SalidaSol8,PuestaSol8)
    PuestaSol = PuestaSol8
    IF(PuestaSol .gt. 24.0) PuestaSol = PuestaSol - 24.0

! Calcular salida del sol, el siguiente día
    CALL SUNRS(Latitud,Longitud,Agno,Mes,Dia+1,SalidaSol8,PuestaSol8)
    SalidaSol = SalidaSol8

! Leer datos
22  READ(9,'(6(f8.4,a1),f6.0,a1,i5,a1)',err=22,end=50)
    &  TU(i), kk, SeeingL(i), kk, SeeingT(i), kk, LDivT(i), kk,
    &  MasaDeAire(i), kk, Centelleo(i), kk, PixMax(i), kk, MVT, kk

! Descartar datos malos:

! Error por recentrado de la estrella.
IF(MVT .NE. 0 .OR. SeeingL(i) .LE. 0.0 .OR.
&  SeeingT(i) .LE. 0.0) GOTO 22

! Descartar mediciones con angulos zenitales mayores que 45 grados
! (masa de aire = sec(45) = 1.41421)
IF(MasaDeAire(i) .GT. 1.41421) GOTO 22

! Descartar datos en los que las mediciones simultáneas del seeing
! difieren por más del 12 %
IF(LDivT(i) .GT. 1.12 .OR. LDivT(i) .LT. 0.88) GOTO 22

! Todo bien
! Hora inicial
IF(i .EQ. 1) THEN
    HoraMin = TU(i)
    HoraMax = TU(i)
ENDIF

! Calcular promedio
Seeing(i) = 0.5*(SeeingL(i)+SeeingT(i))

! Corregir mediciones con 10ms de tiempo de integración. Mediciones de
! Avila et al.

```

```

IF(ArchEntrada(1:4) .EQ. '0012' .OR. ArchEntrada(1:4) .EQ. '0110')
& Seeing(i) = 1.06*Seeing(i)

! Actualizar intervalo de medición
HoraMin = MIN(HoraMin, TU(i))
HoraMax = MAX(HoraMax, TU(i))

! Si pasan más de 15 minutos sin mediciones, tomar en cuenta ese tiempo muerto.
IF(i .GT. 1 .AND. (TU(i)-TU(i-1)) .GT. 0.25) THEN
  TotalHoras = TotalHoras + (TU(i-1)-HoraMin)
  HoraMin = TU(i)
  HoraMax = TU(i)
ENDIF

! Irse a la siguiente medición
i = i + 1
GOTO 22

! Después de la lectura de todos los datos del archivo:
50 CLOSE(9)
  Total = i - 1
  TotalHoras = TotalHoras + (HoraMax-HoraMin)

! Procesar noche solo si tienen más de 100 mediciones
IF(Total .LT. 100) GOTO 5

! Incluir archivo en Buenas.dat
WRITE(10,'(a)') ArchEntrada
Noches = Noches + 1
Horas = Horas + TotalHoras

! Generar la gráfica
ArchPostscript = ArchEntrada(1:6)//'.ps/vcps'
CALL PGBEGIN(0,ArchPostscript,1,1)
CALL PGSCH(0.65)
CALL PGSCI(1)
CALL PGSLW(2)

! Primera parte. Seeing vs Tiempo.
CALL PGVSIZ(0.5, 7.4, 8.5, 10.0)
CALL PGSWIN(PuestaSol,SalidaSol,0.0,1.0)
CALL PGBOX('BCTS',1.0,5,'BCNTS',0.5,5)
CALL PGSLW(4)
CALL PGPT(Total,TU,Seeing,-1)
CALL PGSLW(2)
CALL PGLABEL("','Seeing (segs. arco)',")
CALL PGSCH(1.0)
CALL NUMB2TXT(TotalHoras,a(7))
Etiqueta = ArchEntrada(1:6)//' ' // a(7) // 'horas'
CALL PGMTXT('T',0.6,0.5,0.5,Etiqueta)
CALL PGSCH(0.65)

! Segunda parte. Centelleo vs Tiempo
CALL PGVSIZ(0.5, 7.4, 7.0, 8.5)
CALL PGSWIN(PuestaSol,SalidaSol,-0.04,0.48)
CALL PGBOX('BTS',1.0,5,'BCNTS',0.1,5)
CALL PGSLW(4)
CALL PGPT(Total,TU,Centelleo,-1)
CALL PGSLW(2)
CALL PGLABEL("','Indice de Centelleo',")

! Tercera parte. Masa de aire vs Tiempo
CALL PGVSIZ(0.5, 7.4, 5.5, 7.0)
CALL PGSWIN(PuestaSol,SalidaSol,1.0,1.49)
CALL PGBOX('BTS',1.0,5,'BCNTS',0.1,5)
CALL PGSLW(4)
CALL PGPT(Total,TU,MasaDeAire,-1)
CALL PGSLW(2)
CALL PGLABEL("','Masa de Aire',")

```

```

! Cuarta parte. Pixel Máximo vs Tiempo
CALL PGVSIZ(0.5, 7.4, 4.0, 5.5)
CALL PGSWIN(PuestaSol,SalidaSol,0.0,350.0)
CALL PGBOX('BTSN',1.0,5,'BCNST',100.0,10)
CALL PGSLW(4)
CALL PGPT(Total,TU,PixMax,-1)
CALL PGSLW(2)
CALL PGLABEL('Tiempo Universal (horas)', 'Pixel Maximo (ADUs)',)

! Quinta parte. Histograma del seeing
CALL PGVSIZ(0.5, 7.4, 1.5, 3.0)
CALL PGSWIN(0.0,1.6,0.0,150.0)
CALL PGBOX('BCNTS',0.2,2,'BCNTS',50.0,5)
CALL PGHIST(Total,Seeing,0.0,4.0,160,1)
CALL MEDIAN(Seeing, Total, Mediana, PrimerCuartil, TercerCuartil)
CALL PROMED(Seeing, Total, Promedio, Sigma)
CALL NUMB2TXT(PrimerCuartil, a(1))
CALL NUMB2TXT(Mediana, a(2))
CALL NUMB2TXT(TercerCuartil, a(3))
CALL NUMB2TXT(Promedio, a(4))
CALL NUMB2TXT(Sigma, a(5))
CALL INUMB2TXT(Total, a(6))
Etiqueta = 'Mediciones=' // a(6) //
& '1er_Cuartil=' // a(1) // 'Mediana=' // a(2) //
& '3er_Cuartil=' // a(3) // 'Promedio=' // a(4) //
& 'Sigma=' // a(5)
CALL PGLABEL('Seeing (segundos de arco)', 'Cuentas',)
CALL PGMTXT('T',0.5,0.5,0.5,Etiqueta)
CALL PGEND

! Acumular en estadísticas generales
Suma(1) = Suma(1) + PrimerCuartil
Suma(2) = Suma(2) + Mediana
Suma(3) = Suma(3) + TercerCuartil
Suma(4) = Suma(4) + Promedio
Suma(5) = Suma(5) + Sigma
Suma(6) = Suma(6) + Total

! Poner promedios en el archivo EstadisticasDimm.dat y en pantalla
WRITE(7, '(i3,1x,a2,1x,a2,1x,a2,1x,f8.2,1x,i8,1x,5f6.2)')
& Noches, ArchEntrada(1:2), ArchEntrada(3:4), ArchEntrada(5:6),
& TotalHoras, Total, PrimerCuartil, Mediana, TercerCuartil,
& Promedio, Sigma
WRITE(*, '(i3,1x,a2,1x,a2,1x,a2,1x,f8.2,1x,i8,1x,5f6.2)')
& Noches, ArchEntrada(1:2), ArchEntrada(3:4), ArchEntrada(5:6),
& TotalHoras, Total, PrimerCuartil, Mediana, TercerCuartil,
& Promedio, Sigma

! Procesar el siguiente archivo
GOTO 5

! Cerrar archivos.
999 CLOSE(8)
CLOSE(7)
CLOSE(10)

! Calcular promedios generales y ponerlos en pantalla
DO i=1,5
  Suma(i) = Suma(i)/Noches
ENDDO
WRITE(*,*)
& " _ _ _ _ | _ _ _ _ _ _ _ _"
WRITE(*, '(13x,f8.2,1x,i8,1x,5f6.2)')
& Horas, INT(Suma(6)), (Suma(i), i=1,5)

END

! Fin

```

Bibliografía

- [1] Echevarría J., Tapia M., Costero R., et al. 1998. *TITULO*, revista mexicana de astronomia y astrofisica, 34, 47
- [1] Emery B. astrophysics, http://webs.mn.catholic.edu.au/physics/emery/hsc_astrophysics.htm
- [2] Harlan E. y Walker M. 1965. *A star-trail telescope for astronomical site-testing*, Astronomical Society of the Pacific.1, 246.
- [3] Jenkins F. y White H. 1976 *Fundamentals of Optics* cuarta edicion, International Student Edition.
- [4] López J. y Gutiérrez L. 2003. *A primer for the San Pedro Mártir observatory*, revista mexicana de astronomia y astrofisica.
- [5] Ming K. 2003. The physical universe. PHYS 2021 <http://www.physics.hku.hk/~phys2021/>
- [6] Moreno M. Costero R. y Schuster W. 1994, *The national astronomical observatory of México*, Instituto de Astronomia, UNAM.

- [7] Nave. Circular Aperture Diffraction <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp2.html>
- [8] Pasachoff J. 2002. *Astronomy: From the earth to the universe*, Sexta edición, 1, 55.
- [9] Sarazin M. y Roddier F. 1990. *The ESO DIMM differential image motion monitor*, A&A, 227, 294.
- [10] Tonkin S. 1999. *The three functions of a telescope*, <http://www.astunit.com/tutorials/telescope.htm>
- [11] Vernin J. y Muñoz-Tuñón C. 1995. *Measuring astronomical seeing: The DA/IAC DIMM*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific.