

01170
2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LA CAPA SUPERFICIAL DE LA
TURBULENCIA OPTICA EN EL
OBSERVATORIO ASTRONOMICO NACIONAL
EN SAN PEDRO MARTIR, B.C.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

DONAJI XOCHITL CRUZ LOPEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. LEONARDO JAVIER SANCHEZ PENICHE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

2002

Para la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Donaji Xochitl Cruz Lopez

FECHA: 27-08-2002

SIGNA: [Firma]



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

A mis Padres:
Ma. Teresa López y Sergio Cruz

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. Agradecimientos

Al Dr. Leonardo Javier Sánchez Peniche porque siempre conté con su apoyo y dirección a lo largo del presente trabajo.

A los Drs. Martha Rosete, Remy Ávila, Augusto García y Roberto Ortega, sinodales del presente trabajo, por sus comentarios y sugerencias.

Al Dr. Max Azouit, Dr. Jean Vernin, Dr. Karim Agabi, Dr. Salvador Cuevas, Oswaldo Harris, Dr. Leonardo Sánchez, Dr. Remy Ávila y Fis. Sergio González, quienes constituyeron el equipo de adquisición de información a través del DIMM y de los sensores de temperatura microdiferenciales durante la campaña intensiva de estudio del sitio del OAN-SPM 2000.

Especialmente a los Doctores Jean Vernin y Max Azouit por facilitar el equipo de adquisición de los sensores de temperatura microdiferenciales y por darme la información técnica completa por ellos desarrollada, permitiendo que fuese en este trabajo su primera publicación.

Al equipo de operación del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir por el apoyo brindado durante la campaña intensiva.

Al CONACyI y DGAPA-UNAM y al proyecto TIM-UNAM quienes brindaron el apoyo financiero para la campaña intensiva de estudio del sitio del OAN-SPM 2000.

Al Instituto de Astronomía de la UNAM, por permitir desarrollarme profesionalmente en sus instalaciones. Especialmente a la M. en I. Beatriz Sánchez y Sánchez y a todo el personal del Departamento de Instrumentación de quienes siempre he recibido apoyo.

A todos los que han formado parte de mi vida, de quienes he aprendido personal y profesionalmente y sobre todo por estar siempre que los he necesitado:

Mis padres: Ma. Teresa López y Sergio Cruz gracias por demostrarme que siempre cuento con ustedes, sobre todo por el apoyo económico que me ha permitido continuar.

Mis hermanos: Selene, Tonatiuh, Leonardo y Evelia por todos los momentos en familia.

A mis amigos: Abel V., Daniel M., Jorge V., Raúl R., Asúr G., Sergio G., Carmelo G. y Alejandra F., por las horas de plática y diversión que hemos pasado juntos.

A Norma Palma y Fernando Ángeles por ser mis mejores amigos, gracias por permitirme compartir parte de su vida.

II. Índice

I. Agradecimientos	III
II. Índice	V
Capítulo 1 --- Introducción	7
Capítulo 2 Conceptos básicos sobre turbulencia atmosférica y alta resolución angular	11
2.1 La Atmósfera Terrestre	11
2.2 La Turbulencia Atmosférica	12
2.3 Parámetros relevantes para observaciones con Alta Resolución Angular	15
2.3.1 La longitud de coherencia de Fried ($r_0(\lambda)$)	15
2.3.2 La escala externa (\mathcal{L}_0)	16
2.3.3 El tiempo característico (τ_0)	16
2.3.4 El ángulo isoplanático	16
2.3.5 La resolución angular	17
Capítulo 3 Algunas técnicas de medición de la turbulencia óptica	19
3.1 Técnicas generales de medición	20
3.1.1 Sensores de temperatura microdiferenciales	20
3.1.2 Monitores de seeing	21
3.2 Técnicas de interés para el presente trabajo	24
3.2.1 Monitor de movimiento diferencial de imagen (DIMM)	24
3.2.2 Mástil instrumentado con sensores de temperatura microdiferenciales	28
Capítulo 4 Campaña intensiva de estudio del sitio: Observatorio Astronómico Nacional – San Pedro Mártir	33
4.1 Localización del sitio de estudio	33
4.2 Antecedentes astroclimatológicos	34
4.2.1 Campaña Intensiva	35
Capítulo 5 Sensores de temperatura microdiferenciales: Resultados y análisis	37
5.1 Altura de los sensores de temperatura microdiferenciales	37
5.2 Formato de los datos	37
5.3 Análisis	38
5.3.1 Comportamiento del $C_N^2(h,t)$	38
5.3.2 Seeing	43
Capítulo 6 DIMM: Resultados y análisis	45
6.1 Características de las adquisiciones	45
6.1.1 Cadencia de adquisición	47
6.1.2 Nivel del DIMM	47
6.2 Tendencia promedio del seeing a lo largo de la noche	51
6.3 Distribución log-normal	52
6.4 Tiempo característico (τ)	56
6.4.1 Autocorrelación	56
6.4.2 Fluctuaciones temporales del seeing atmosférico determinado a través de una función fraccionaria	66
6.4.3 Función de estructura	69

6.4.4	Conclusiones del Tiempo característico:	71
6.5	Razón de energía turbulenta	72
6.6	Degradación del seeing	75
Capítulo 7	Conclusiones y perspectivas	79
	Referencias	83
	Apéndice A Mástil- Sistema AZX-SOL	87
A.1	Principio Teórico	87
A.2	Instrumento - Sistema AZX-SOL	87
A.3	Análisis	94
A.4	Errores	96
A.5	Programas disponibles	99
	Apéndice B Programas para análisis de datos de los sensores de temperatura microdiferenciales y el DIMM	103
B.1	Sensores de temperatura microdiferenciales	103
B.2	DIMM	103
	Apéndice C Ecuación de onda que viaja a través de una capa turbulenta	105
	Apéndice D Autocorrelación de una función	109

Capítulo 1 Introducción

La astronomía observacional ha tenido grandes avances tecnológicos, sin embargo y a pesar de ellos, la cantidad de información que se recibe en la superficie terrestre proveniente de los objetos celestes se encuentra limitada por dos causas:

- La tecnología aplicada en la construcción del telescopio y de su instrumentación y
- La atmósfera terrestre,

para la primera siempre existirán los límites de sensibilidad y de difracción que imponen ciertas restricciones observacionales, para la segunda lo importante es poder contestar la siguiente pregunta: ¿Qué efectos tiene la atmósfera terrestre sobre las observaciones astronómicas?

En general, las observaciones astronómicas consisten en detectar las ondas electromagnéticas que provienen de los objetos celestes y atraviesan la atmósfera terrestre. A su paso por la atmósfera, las ondas electromagnéticas sufren alteraciones, siendo las posibles causas:

La dispersión: Una onda electromagnética proveniente de una dirección choca con las moléculas de aire que componen la atmósfera provocando que se disperse en todas direcciones, por lo tanto si originalmente su intensidad debiera estar concentrada en un punto se distribuye en una región del espacio.

La opacidad: A determinadas longitudes de onda, parte de la energía de la onda electromagnética es absorbida. Se ha determinado que a ciertos intervalos de longitudes de onda la atmósfera terrestre es transparente (e.g. visible e infrarrojo cercano), siendo aprovechadas estas llamadas “ventanas” para efectuar observaciones evitando los efectos de opacidad.

La turbulencia óptica: Consiste en variaciones aleatorias del índice de refracción del aire en la atmósfera terrestre, produciendo modificaciones en el frente de onda. Afecta a todas las observaciones astronómicas hechas a longitudes de onda por debajo de $10 \mu\text{m}$. En el milimétrico, las fluctuaciones de vapor de agua producen fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción. La turbulencia óptica más intensa ocurre en general en la capa superficial, produciendo plumas térmicas (masas de aire caliente) que se extienden hasta decenas o centenas de metros. A partir de esta altitud, la turbulencia óptica tiende a producirse en capas finas (de algunos metros de espesor)

Para minimizar los efectos de estas causas es importante estudiar la atmósfera en el sitio en donde se desea operar un telescopio, para lo cual se realizan campañas intensivas de estudio de sitios astronómicos, incluyendo la medición de turbulencia óptica atmosférica.

Actualmente los telescopios e interferómetros de nueva generación requieren trabajar con alta resolución angular, para alcanzarla se están desarrollando y perfeccionando diversos métodos de observación como la óptica adaptativa, la interferometría óptica y la

interferometría milimétrica. Estas nuevas técnicas requieren de sitios con condiciones astroclimatológicas óptimas.

En México la astronomía ha sido un área científica muy productiva que cuenta con instituciones dedicadas a su desarrollo, entre ellas destaca la UNAM. La UNAM a través del Instituto de Astronomía (IA-UNAM) tiene bajo su custodia el Observatorio Astronómico Nacional que cuenta con dos observatorios, el Observatorio Astronómico Nacional de Tonantzintla, Puebla (1951) y el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM), Baja California (1970).

Actualmente el Observatorio de Tonantzintla tiene en funcionamiento un Telescopio de 1-m de diámetro, el cual es constantemente renovado, modernizando los instrumentos utilizados en investigaciones astrofísicas: se pueden efectuar observaciones remotas desde la sede de Ciudad Universitaria del Instituto de Astronomía. Sin embargo el telescopio ya no se encuentra a la vanguardia ni en el mejor sitio, debido al crecimiento de las ciudades cercanas el cielo del sitio es poco oscuro. Además, la nubosidad es alta y la turbulencia óptica intensa. Estas fueron las principales razones para buscar y construir un mejor observatorio, dando lugar al OAN- San Pedro Mártir.

El OAN-San Pedro Mártir se encuentra localizado en uno de los mejores sitios de observación a nivel mundial para longitudes de onda que van desde infrarrojas hasta milimétricas, comparable a Mauna Kea - Hawaii, Islas Canarias – España, o Chile. Cuenta con tres telescopios de 2.1 m, 1.5 m y 84 cm de diámetro, en constante renovación y modernización.

Para satisfacer las necesidades observacionales actuales se requiere la construcción de un telescopio con mayor capacidad colectora y con tecnología más moderna. Por ello se encuentra en proyecto la construcción de un Telescopio Óptico - Infrarrojo Mexicano (TIM).

Para el mejor desarrollo de este proyecto ha sido necesario efectuar numerosos estudios sobre la turbulencia óptica en ese sitio, estos estudios forman parte del proyecto global: *Estudios de turbulencia atmosférica para observaciones astronómicas*. Cuyos objetivos específicos son:

Campaña intensiva en el OAN-SPM:

- Caracterización intensiva de la turbulencia óptica en el OAN-SPM, para los proyectos de Alta Resolución Angular (ARA) que actualmente se encuentran en desarrollo en el IA-UNAM (Lola-Guieloa) y el ambicioso proyecto del TIM.
- Validación del Modelo Meso-NH de simulación de turbulencia óptica en tres dimensiones, y el pronóstico del comportamiento de la turbulencia atmosférica (seeing)
- Monitoreo simultáneo de los perfiles de variaciones del índice de refracción ($C_N^2(h)$) y velocidad del viento (\bar{v}), analizando su interdependencia en las variaciones tanto temporales como en función de la altura.
- Estudio de las condiciones de turbulencia óptica en 3 dimensiones, en una región de 60x60 km² de base alrededor del OAN-SPM, lo cual permitirá definir el sitio idóneo para la colocación del TIM.

Campañas en otros sitios:

- Estudio con el Scidar Generalizado Mexicano (instrumento especializado que permite medir perfiles de variaciones de índice de refracción y velocidad del viento) en Cananea, México.
- Estudio de diversos métodos para determinar si las fluctuaciones turbulentas de vapor de agua se dan en capas aisladas de la troposfera y medir la altura de las eventuales capas.
- Utilizar datos existentes en el llano Chajnantor-Chile, para determinar las alturas en donde se espera que hayan fluctuaciones turbulentas de vapor de agua.

Los instrumentos que fueron y serán empleados a lo largo de este proyecto son:

- Sensores de temperatura microdiferenciales: Determinan variaciones de temperatura con órdenes de micras, desarrollados en el Departamento de Astrofísica de la Universidad de Niza-Sophia Antípolis (DAUNSA).
- Globos sonda: Globos meteorológicos instrumentados con sensores de temperatura microdiferenciales. Obtiene perfiles de temperatura (México-DAUNSA).
- Mástil con sensores de temperatura microdiferenciales: Determinan variaciones de temperatura a diferentes alturas fijas, de aquí se obtienen perfiles de variaciones de índice de refracción.
- Monitor de movimiento diferencial de imagen (DIMM): Determina variaciones de posición de la intensidad máxima, a través de las cuales se determinan los perfiles de fluctuaciones del índice de refracción.
- Scidar Generalizado (Francés): Determina perfiles de fluctuaciones del índice de refracción y velocidad del viento. Instrumento desarrollado en Francia por la DAUNSA.
- Scidar Generalizado Mexicano: Determina perfiles de fluctuaciones del índice de refracción y velocidad del viento. Instrumento desarrollado en México.

Este proyecto cuenta con la colaboración estrecha del Departamento de Astrofísica de la Universidad de Niza-Sophia Antípolis (DAUNSA) (Dr. M. Azouit, Dr. J. Vernin)

Los objetivos principales del proyecto son: formación de recursos humanos especialistas en el área, determinación de los valores de los parámetros que caracterizan la turbulencia atmosférica en los diferentes sitios para lo cual se requiere de la adquisición de información a través de diferentes instrumentos especializados y la generación de modelos predictivos tridimensionales del comportamiento de la turbulencia. Todos los estudios son sustentados por un análisis detallado y desarrollo teórico en plena expansión debido a que las investigaciones en esta área son relativamente recientes (~20 años).

El objetivo del presente trabajo es el estudio de la turbulencia óptica en la capa superficial en el OAN-San Pedro Mártir.

Existen dos partes fundamentales que conllevan a la realización del objetivo del trabajo: Los fundamentos teóricos y el análisis estadístico. En cuanto a los fundamentos teóricos, éstos dan bases sólidas para presentar propuestas alternativas para la obtención de los parámetros de interés, que serán implementadas posteriormente.

Para el estudio estadístico se emplean los datos obtenidos mediante dos instrumentos especializados: El monitor de seeing llamado Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen (DIMM) y un monitor basado en sensores de temperatura microdiferenciales colocados en un mástil. Estos datos fueron adquiridos durante los meses de Mayo y Diciembre del 2000, por el equipo Mexicano-Francés asignado.

En el segundo capítulo del presente trabajo se dan los conceptos básicos sobre turbulencia atmosférica y la alta resolución angular. Los fundamentos teóricos en los que se basan algunos de los distintos medidores de turbulencia óptica están descritos en el capítulo 3, incluyendo una descripción detallada de los instrumentos empleados en la campaña intensiva de estudio del sitio en el OAN-SPM. Las fechas y el lugar preciso en el que se realizó la campaña intensiva así como las características específicas se encuentran descritas en el capítulo 4. Los capítulos 5 y 6 detallan los análisis realizados con los datos adquiridos determinando los valores del seeing integrado, su tiempo característico, el estudio de la tendencia de comportamiento temporal. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones sobre algunas de las características que presenta la turbulencia óptica haciendo énfasis en la contribución de la capa superficial en el OAN-San Pedro Mártir.

Capítulo 2 Conceptos básicos sobre turbulencia atmosférica y alta resolución angular

Para la astronomía, el conocer la información proveniente de las ondas electromagnéticas emitidas por los cuerpos celestes es prioritario, sin embargo esta información sufre modificaciones en su trayecto hasta los diversos sistemas de adquisición, ya sean espaciales o terrestres (e.g. Telescopios espaciales o terrestres, detectores, radiotelescopios, etc). Existen diversos factores que modifican esta información, siendo uno de ellos la turbulencia óptica. La turbulencia se presenta a todo nivel espacial es decir a nivel intergaláctico, interestelar, atmosférico, etc., sin embargo para los propósitos específicos del presente trabajo, nos interesa la turbulencia atmosférica que afecta el dominio óptico.

2.1 La Atmósfera Terrestre

La atmósfera terrestre se encuentra estratificada en cinco regiones que constituyen su *estructura vertical*. Los estratos atmosféricos se definen y describen considerando las variaciones de la temperatura (T), densidad (ρ) y presión (P). Estos parámetros son funciones de la altura (h) con respecto a la superficie terrestre [Fig. 2-1].

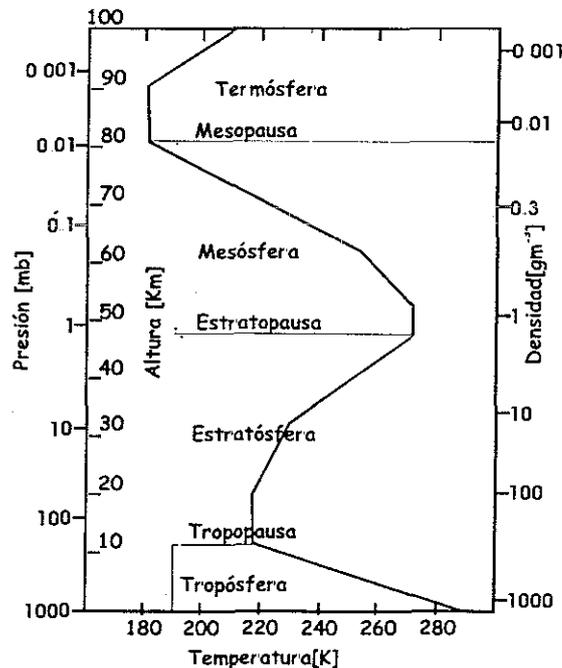


Fig 2-1 Estructura vertical de la atmósfera terrestre [18].

La turbulencia óptica se produce en la troposfera y parte de la estratosfera. La variación de los parámetros físicos que describen el comportamiento de un fluido, como son su

temperatura o su velocidad dan lugar a la generación de turbulencia dentro del mismo. En nuestro caso, el fluido en cuestión es el aire.

2.2 La Turbulencia Atmosférica

El presente trabajo comprende el estudio de la turbulencia atmosférica desarrollada en intervalos espaciales que van de los milímetros hasta decenas de kilómetros, con intervalos temporales menores a 1 s y con longitudes de onda de observación comprendidas entre 300 nm y 750 nm [18]. Este estudio de la turbulencia óptica está basado en la siguiente descripción física y matemática.

Kolmogorov sugiere que en un desarrollo de turbulencia total, la tasa de transferencia de la energía cinética es constante e independiente al tamaño de la escala de movimiento. Al considerar un estado estacionario, la velocidad de disipación de la viscosidad ε_0 debe ser igual a la velocidad de producción de la energía turbulenta. Por lo tanto, se puede suponer que la velocidad V del fluido en movimiento a una escala L depende únicamente de L y de ε_0 , es decir [30]:

$$V \propto \varepsilon_0^{1/3} L^{1/3} \quad (2.1)$$

Efectuando un análisis espectral de la energía cinética como función del módulo del vector de onda \bar{k} , $|\bar{k}|$, en un intervalo $[k, k + dk]$ y considerando que $E(k)dk \propto V^2(k)$ se puede demostrar que:

$$E(k)dk \propto k^{-\frac{2}{3}} \text{ o } E(k) \propto k^{-\frac{5}{3}} \quad (2.2)$$

La relación anterior expresa la ley de Kolmogorov, y es válida únicamente en el intervalo $L_0^{-1} \ll k \ll l_0^{-1}$ conocido como intervalo inercial, en donde L_0 es la escala externa y l_0 la escala interna, definiéndose como escala externa aquella en la cual los movimientos dan origen a la turbulencia y la escala interna aquella en la cual se origina la disipación de la viscosidad [30].

La descripción de las fluctuaciones turbulentas del índice de refracción se da a través de los campos de temperatura (T) y humedad (c), cuyos *espectros de potencia* están descritos por las funciones

$$\Phi_T(\bar{k}) \propto k^{-\frac{11}{3}} \quad \text{y} \quad \Phi_c(\bar{k}) \propto k^{-\frac{11}{3}} \quad (2.3)$$

La **covarianza** de las fluctuaciones de temperatura $\Theta = T - \langle T \rangle$ está dada $B_T(\bar{\rho}) = \langle \Theta(\bar{r}) \Theta(\bar{r} + \bar{\rho}) \rangle$ [30].

Aplicando el **teorema de Wiener – Khinchine** [18], el cual dice que la potencia de densidad espectral de cualquier proceso azaroso, estacionario o no estacionario se puede determinar a partir de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación promedio y al aplicar las propiedades básicas de Fourier la relación inversa es válida. Por lo tanto la transformada de Fourier tridimensional del espectro de potencia de la temperatura, $\Phi_T(\bar{k})$ se relaciona a la covarianza de las fluctuaciones de temperatura a través de la ecuación:

$$B_T(\bar{\rho}) = \int \Phi_T(\bar{k}) \exp(i\bar{k} \cdot \bar{\rho}) d\bar{k} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) no puede ser deducida a partir de la ecuación (2.3), debido a que la última no es válida en el origen. Por lo tanto es conveniente considerar **la función de estructura de la temperatura** descrita por la ecuación [30]:

$$D_T(\bar{\rho}) = \langle |\Theta(\bar{r} + \bar{\rho}) - \Theta(\bar{r})|^2 \rangle, \quad (2.5)$$

relacionada a la covarianza por la relación

$$D_T(\bar{\rho}) = 2[B_T(0) - B_T(\bar{\rho})], \quad (2.6)$$

la cual es finita siempre y cuando $|\bar{\rho}|$ sea finito. Se puede derivar una expresión que sea válida en el rango inercial siempre que $|\bar{\rho}| = \rho$. Con una tasa de producción de energía turbulenta ε_0 y una tasa de producción de fluctuaciones de temperatura η_0 , $D_T(\bar{\rho})$ es proporcional a

$$D_T(\bar{\rho}) \propto \eta_0 \varepsilon_0^{-1/3} \rho^{2/3}, \quad (2.7)$$

usualmente escrita como:

$$D_T(\bar{\rho}) = C_T^2 \rho^{2/3}. \quad (2.8)$$

Definiendo C_T^2 como **la constante de estructura de las fluctuaciones de temperatura** entonces el espectro de potencia de las mismas está dado por [35] :

$$\Phi_T(\bar{k}) = \frac{\Gamma\left(\frac{8}{3}\right) \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}{4\pi^2} C_T^2 k^{-\frac{11}{3}} \quad (2.9)$$

La derivación de *la constante de estructura de la humedad* es similar [30].

Debido a los cambios internos de presión, temperatura y concentración de vapor de agua (c) que existen en los estratos que constituyen la estructura vertical de la atmósfera, se producen fluctuaciones turbulentas en *el índice de refracción del aire* (turbulencia óptica), y por lo tanto perturbaciones en la onda electromagnética emitida por el cuerpo celeste. Si se considera que los flujos de aire son incompresibles y por lo tanto las variaciones de presión son despreciables, entonces, las fluctuaciones del índice de refracción, N , están descritas por la ecuación [4]:

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial N}{\partial c} \Delta c, \quad (2.10)$$

en donde ΔT son las fluctuaciones de temperatura y Δc las fluctuaciones de concentración del vapor de agua.

Dependiendo del dominio en el que se esté observando, la concentración del vapor de agua puede tener mayor o menor influencia en las fluctuaciones del índice de refracción. En el dominio óptico, c tiene poca influencia sobre N , el cual está gobernado por las fluctuaciones de temperatura. Aplicando la Ley de Gladstone, $N - 1 = \frac{\alpha p}{T}$, la relación entre ΔT y ΔN es

$$\Delta N = -\alpha \frac{p}{T^2} \Delta T, \quad (2.11)$$

donde α es una constante positiva que depende de la longitud de onda, p la presión y T la temperatura. Por lo tanto la relación entre las constantes de estructura del índice de refracción y de la temperatura, se escribe:

$$C_N^2 = \left(\alpha \frac{p}{T^2}\right)^2 C_T^2 \quad (2.12)$$

y permite calcular la intensidad de la turbulencia óptica (C_N^2) a partir de la intensidad de las fluctuaciones turbulentas de la temperatura (C_T^2) [4].

Dado que la finalidad de conocer la turbulencia óptica es el poder obtener la mayor información posible proveniente de los cuerpos celestes, se requieren determinar las relaciones entre los parámetros físicos que intervienen en la generación de la turbulencia y los parámetros que determinan la mayor calidad del sistema. Estas relaciones son usadas en el área denominada Alta Resolución Angular (ARA). Los parámetros relevantes para observaciones de ARA se presentan a continuación.

2.3 Parámetros relevantes para observaciones con Alta Resolución Angular

La Alta Resolución Angular (ARA) tiene como finalidad alcanzar la mejor resolución espacial de la información adquirida, para así obtener más detalle de las propiedades morfológicas, cinemáticas, etc. de los cuerpos celestes. El desempeño de las diversas técnicas de ARA depende fuertemente de las propiedades de coherencia temporal, espacial y espacio-angular de los frentes de onda perturbados por la turbulencia atmosférica. Estas propiedades se pueden describir a través de los siguientes parámetros:

2.3.1 La longitud de coherencia de Fried ($r_0(\lambda)$)

Se define como el diámetro del área de un frente de onda sobre el cual, las variaciones de fase debidas a la atmósfera son iguales a 1 radián. La fase es medida en términos de su raíz cuadrática media.

El coeficiente de estructura del índice de refracción y la longitud de onda definen el valor de $r_0(\lambda)$ a través de la relación

$$r_0(\lambda)^{-5/3} = 0.432 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^{\infty} C_N^2(h) dh, \quad (2.13)$$

en donde h es la altura con respecto a la superficie terrestre [23].

También se puede determinar el valor de $r_0(\lambda)$, si se conocen las variaciones en el ángulo de llegada, para un telescopio de radio D y a una longitud de onda de observación λ , utilizando la relación

$$\sigma_D^2 \cong 0.179 \lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3}, \quad (2.14)$$

donde σ_D^2 es la dispersión angular en una dirección, expresada en radianes [23].

La función de estructura de la fase se escribe:

$$D_\Phi(\bar{r}) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (2.15)$$

en donde $r = |\bar{r}|$ con $|\bar{r}|$ el módulo del desplazamiento espacial.

2.3.2 La escala externa (\mathcal{L}_0)

Cada capa de turbulencia óptica en la atmósfera tiene un espesor típico de decenas de metros. En el caso de turbulencia isotrópica, el espesor de la capa es igual a la escala o al tamaño de las fluctuaciones de índice de refracción más grandes, a esta escala se le llama escala externa local y es la escala de inyección de energía a la escala de Kolmogorov, L_0 .

El efecto final producido en el frente de onda al pasar a través de varias capas turbulentas con diferentes intensidades y diversas escalas L_0 , es medido por la *escala externa del frente de onda* \mathcal{L}_0 . La escala externa del frente de onda está dada por la siguiente relación [23]:

$$\mathcal{L}_0^{-1/3} = \frac{\int_0^\infty L_0^{-1/3}(h) C_N^2(h) dh}{\int_0^\infty C_N^2(h) dh}, \quad (2.16)$$

con h la altura con respecto a la superficie terrestre.

2.3.3 El tiempo característico (τ_0)

Para adquirir la información proveniente del cuerpo celeste, se debe considerar el intervalo de tiempo en el cual el frente de onda prácticamente no cambia. A este intervalo de tiempo se le conoce como tiempo característico τ_0 o tiempo de coherencia. Para no perder valiosa información, el tiempo de exposición de un sensor de frente de onda debe ser menor o igual al tiempo característico, $\tau_a \leq \tau_0$. Esta condición limita la sensibilidad del instrumento.

El tiempo característico se determina con el perfil de la velocidad de las capas turbulentas $\bar{v}(h)$, y el perfil de la constante de estructura del índice de refracción $C_N^2(h)$. La expresión para el tiempo característico del frente de onda es [29]:

$$\tau_0 = 0.519 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{-5/6} \left[\int |\bar{v}(h)|^{5/3} C_N^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (2.17)$$

2.3.4 El ángulo isoplanático.

La luz que emana de diferentes regiones de un objeto extendido, seguirá diversas trayectorias a través de la atmósfera hasta llegar al telescopio. Si el objeto observado presenta un ángulo extendido, estos rayos atravesarán diferentes zonas de la turbulencia atmosférica. Por lo tanto, se presenta una decorrelación angular del frente de fase, limitando el campo de visión sobre el cual un objeto a una determinada longitud de onda puede ser observado. A este fenómeno se le conoce como anisoplanatismo.

A la máxima extensión angular de un objeto para la cual, la imagen puede ser observada sin pérdida significativa de resolución debida al anisoplanatismo, se le conoce como ángulo isoplanático o trayectoria isoplanática.

El ángulo isoplanático depende fuertemente del perfil de la constante de estructura del índice de refracción $C_N^2(h)$. Su expresión está dada por [19]:

$$\theta_0 = 0.528 \left[\left[\frac{2\pi}{\lambda} \right]^2 \int_0^\infty C_N^2(h) h^{5/3} dh \right]^{-3/5} \quad (2.18)$$

2.3.5 La resolución angular

La imagen de una fuente puntual producida por un telescopio perfecto de diámetro D , a una longitud de onda de observación λ , es un patrón de difracción conocido como disco de Airy. El ancho a media altura del disco de Airy, conocido como la resolución angular de la imagen adquirida para una onda electromagnética que viaja a través de un medio homogéneo [38], se encuentra descrito por : $\varepsilon_D \approx \frac{\lambda}{D}$.

Sin embargo la turbulencia atmosférica hace que el medio no sea homogéneo y entonces la onda electromagnética es perturbada. Para determinar la resolución angular se aplica la teoría de Fried. La teoría de Fried caracteriza la degradación de la imagen a media altura adquirida a través del parámetro de Fried o radio de coherencia, $r_0(\lambda)$ (2.13), determinando que la resolución angular está dada por:

$$\varepsilon_{FWHM} = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (2.19)$$

En donde ε_{FWHM} es conocido como el ángulo de “seeing” o simplemente “seeing” [38].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 3 Algunas técnicas de medición de la turbulencia óptica

La calidad de una imagen astronómica depende de dos factores: la resolución del telescopio y de su instrumentación, y la calidad del “seeing” en el sitio de observación.

La resolución angular máxima del telescopio y de su instrumentación está determinada por el patrón de difracción de la pupila de entrada cuya expresión se conoce como disco de Airy [2.3.5] en el caso de una óptica perfecta.

Para determinar la calidad del “seeing” en el sitio de observación se han ido desarrollando diversos métodos:

La primera medición “cuantitativa” se le atribuye al astrónomo francés André-Louis Danjon (1890–1967). Danjon propone una escala de brillo para eclipses de luna, con ella es posible caracterizar la apariencia visual y la intensidad del brillo de la luna durante un eclipse lunar [8]. Sin embargo los modelos formales de turbulencia óptica se dan a partir de 1961 con la publicación del libro “Propagación de una onda en un medio turbulento” por Tatarski [35], en el cual se desarrolla la teoría de la propagación de las ondas electromagnéticas en un medio turbulento basándose en los trabajos de Kolmogorov [16],[17]. Kolmogorov en 1941 sienta las bases para la descripción estadística de la turbulencia atmosférica a través de un modelo matemático.

Simultáneamente a la formulación de la turbulencia óptica se fueron creando métodos de medición del “seeing” en el sitio de observación. Actualmente se puede determinar el “seeing” de un sitio a través de la medición del perfil vertical del índice de refracción $C_N^2(h)$.

Existen diversas técnicas para medir el “seeing”, clasificándose en dos grandes grupos: Técnicas *in situ* y Técnicas remotas. Me limitaré a presentar brevemente: los sensores de temperatura microdiferenciales, que es una técnica *in situ*. Los monitores de seeing y el de medición y detección del centelleo (SCIDAR), que son técnicas remotas. La finalidad de cada uno de los distintos métodos es determinar las principales características de la turbulencia atmosférica y su evolución temporal, sin embargo cada método es válido para determinados intervalos de altitud.

Debido a que mi objetivo particular es el estudio de la turbulencia óptica dentro de la capa superficial que se genera en el Observatorio Astronómico Nacional, localizado en San Pedro Mártir, Ensenada - Baja California, se comprenden altitudes de 0 a 15 m. Para ello los métodos empleados son el Mástil instrumentado con sensores de temperatura microdiferenciales y el Monitor de movimiento diferencial de imagen (Differential Image Motion Monitor - DIMM).

3.1 Técnicas generales de medición

3.1.1 Sensores de temperatura microdiferenciales

El principio fundamental de este método es medir diferencias de temperatura mediante un par de sensores separados una distancia r . Con estas diferencias de temperatura se determina la función de estructura de la temperatura:

$$D_T(r) = \langle |T(x) - T(x+r)|^2 \rangle \quad (3.1)$$

con r el desplazamiento espacial en esa dirección.

Se considera que la temperatura (T) sigue la ley espectral de Obukhov [26] y Yaglom [42], por lo tanto la función de estructura de la temperatura a distintas alturas presenta una relación con la constante de estructura de la temperatura, $C_T^2(h)$, dada por:

$$D_T(r, h) = C_T^2(h) r^{2/3} \quad (3.2)$$

La constante de estructura de la temperatura esta directamente relacionada con la constante de estructura del índice de refracción:

$$C_N^2(h) = \left(80 \times 10^{-6} \frac{P(h)}{T(h)^2} \right)^2 C_T^2(h), \quad (3.3)$$

en donde $P(h)$ es la presión, $T(h)$ la temperatura.

Los sensores de temperatura microdiferenciales son empleados principalmente en dos tipos de instrumentos: Globos sonda instrumentados y mástil instrumentado.

Globos sonda instrumentados

La medición consiste en lanzar globos meteorológicos o globos sonda equipados con sensores térmicos, que miden la microestructura del campo térmico durante su libre ascenso. Muestran la atmósfera desde el nivel del suelo hasta 25 o 30 km. Cada globo sonda contiene un par de sensores de temperatura microdiferenciales que permiten determinar la intensidad de la turbulencia óptica a lo largo de los primeros 25 o 30 km, con muy alta resolución en altura (6 m), sin embargo y debido a que presentan un libre ascenso no se determina la evolución de la turbulencia atmosférica a lo largo del tiempo para alturas fijas

Otro instrumento que emplea sensores de temperatura microdiferenciales es el mástil instrumentado, debido a que es uno de los instrumentos utilizados para la adquisición de información para este trabajo es descrito detalladamente en la sección [3.2.2].

3.1.2 Monitores de seeing

Monitor de seeing generalizado (GSM)

Determina los principales parámetros que describen la turbulencia óptica mediante mediciones de las variaciones del ángulo de llegada de la onda electromagnética proveniente de un objeto celeste puntual.

La primera versión de este instrumento, el monitor de escala de rejilla (grating scale monitor) fue construido para obtener la escala externa de la coherencia espacial \mathcal{L}_0 del frente de onda perturbado. Actualmente y como resultado de un mejoramiento instrumental basado en análisis teóricos, es posible medir el ángulo de seeing (ε_0), el tiempo de coherencia del frente de onda (τ_0), el ángulo isoplanático (θ_0) y \mathcal{L}_0 . Cambiando su nombre a monitor de seeing generalizado (GSM, Generalized Seeing Monitor) [23].

Las fluctuaciones del ángulo de llegada medidas en el foco del telescopio de diámetro D son relacionadas directamente a r_0 por $\sigma_D^2 \cong 0.179\lambda^2 r_0^{-5/3} D^{-1/3}$, en donde σ_D^2 es la dispersión angular en una dirección, expresada en radianes [23].

El instrumento completo consiste de cuatro módulos idénticos, cada módulo mide las fluctuaciones del ángulo de llegada atmosférico (AA) para posiciones seleccionadas sobre el frente de onda y cada uno consiste de un telescopio Maksutov ($D = 100$ mm, $F = 1$ m) con una caja de detección [23].

Detección del centelleo y determinación de distancias (SCIDAR)

La técnica Detección del centelleo y determinación de distancias (SCIDAR - Scintillation Detection and Ranging) consiste en el análisis estadístico del centelleo de una estrella doble sobre la pupila de un telescopio. Permite determinar los principales parámetros que describen la turbulencia atmosférica, a cualquier altura, con evolución temporal, y la altura a la que se encuentran las capas en donde se desarrolla la turbulencia.

Cuando una onda plana llega desde una estrella cruzando una capa turbulenta localizada a una altura h , el patrón de difracción observado en la tierra es llamado centelleo o patrón atmosférico de *speckle*. Una segunda estrella a pocos segundos de arco (θ) de distancia, provee de un patrón de *speckle* semejante pero desplazado horizontalmente de una distancia θh .

La función de autocorrelación del centelleo producido por una capa turbulenta consiste de tres componentes: uno producido en el origen, y los otros dos separados por θh y $-\theta h$. Como las diferentes capas son estadísticamente independientes, la contribución de cada una es sumada, obteniendo una función de autocorrelación total $C^{**}(r)$, la cual es radial a lo largo de la separación de la estrella doble. Sin embargo se debe eliminar el pico central en el cual la contribución de cada capa es indistinguible. Para eliminarlo se debe calcular la diferencia de las secciones de la función de autocorrelación medida paralela C_{\parallel}^{**} y

perpendicular C_{\perp}^{**} a la separación de las estrellas, ($B_{**} = C_{\parallel}^{**} - C_{\perp}^{**}$). Por lo tanto la función de autocorrelación de los patrones de *speckle* presenta un máximo a una distancia θh , la amplitud de este máximo es proporcional a $C_N^2(h)$ [5]:

$$B_{**}(x) \equiv C_{\parallel}^{**} - C_{\perp}^{**} = \int_0^{\infty} dh K(x, h) C_N^2(h) \pm N(x). \quad (3.4)$$

Esta es una relación integral entre $C_N^2(h)$ y la autocorrelación $B_{**}(x)$, en donde el kernel $K(x, h)$ es la función de autocorrelación obtenida teóricamente para una sola capa localizada a una altura h con un $C_N^2(h)$ unitario. $N(x)$ es el ruido estimado.

La operación del SCIDAR se basa en la adquisición de imágenes de la pupila de entrada del telescopio, en donde se forman los patrones *speckle*. Debido a que los patrones *speckle* se mueven rápidamente, (se propagan a la velocidad del viento), el tiempo de adquisición de las imágenes debe ser corto (1 ms). Se calcula la autocorrelación de cada imagen. Después de procesar alrededor del 2000 imágenes, la adquisición estadística es adecuada para determinar la función de correlación espacial de los patrones de centelleo bidimensionales para la estrella doble. Finalmente un algoritmo de inversión calcula los perfiles de $C_N^2(h)$ a través de la función de autocorrelación [5].

Debido a que el centelleo es producido por difracción de Fresnel [5], esta técnica es poco sensible a la turbulencia que se encuentra en el primer kilómetro, sin embargo puede determinar el perfil $C_N^2(h)$ a partir de 1 km hasta 25 km. La altura máxima depende del tamaño de la pupila de entrada y del ángulo de separación θ .

Esta técnica entrega una resolución vertical de alrededor de 1 km con una resolución temporal de 1 minuto. Su sensibilidad es tal que incluso bajo muy buenas condiciones de seeing (es decir, turbulencia débil) se pueden detectar las capas turbulentas [5].

Otro instrumento empleado como monitor de seeing es el Monitor de Movimiento de Imagen diferencial (Differential Image Motion Monitor: DIMM) explicado con detalle en la sección 3.2.1, por ser uno de los instrumentos empleados para adquirir información para este trabajo. La Tabla 3-1 esquematiza las capas de estudio definir las y los parámetros de ARA que entregan las diversas técnicas de medición de seeing.

Tabla 3-1			
Capa	Capa superficial	Capa limite	Atmósfera libre
Instrumento			
SCIDAR	Perfil $C_N^2(h,t)$, $\int C_N^2(h,t) dh$;		$r_0(t)$
Globo sonda	Perfiles $C_N^2(h,t)$ desde 50 m hasta 25 km		
Mástil	$C_T^2(h,t)$	No	
GSM	$\int C_N^2(h,t) dh$;		$r_0(t)$, L_0
DIMM	$\int C_N^2(h,t) dh$;		$r_0(t)$

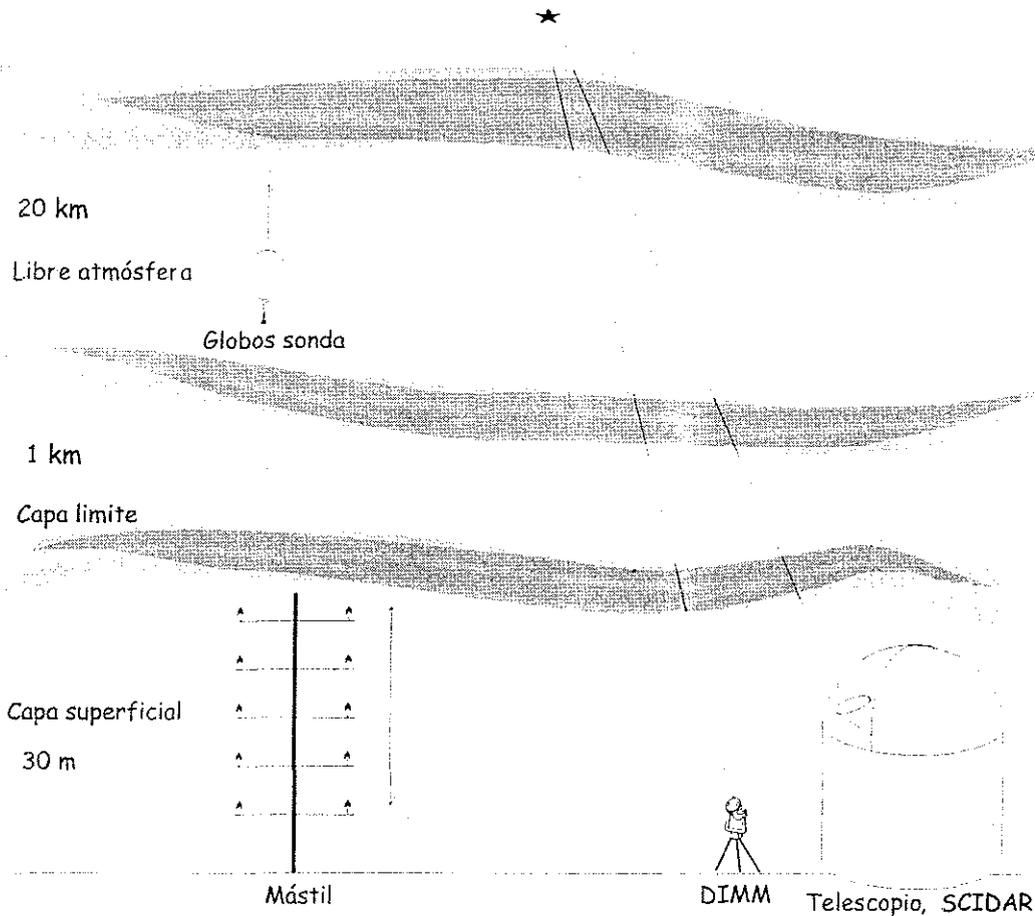


Fig 3-1 Intervalos de validez para los diversos instrumentos medidores de seeing

3.2 Técnicas de interés para el presente trabajo

3.2.1 Monitor de movimiento diferencial de imagen (DIMM)

Fundamentos teóricos

El método consiste en medir la diferencia en la pendiente del frente de onda sobre dos pequeñas pupilas separadas por una determinada distancia. Debido a que es un método diferencial, la técnica es inherentemente insensible a errores de guiado.

El principio del DIMM es producir un par de imágenes de una estrella con el mismo telescopio. Para ello se selecciona una fuente puntual, su onda electromagnética pasa a través de dos aperturas que a su vez funcionan como pupilas de entrada, una de las cuales tiene un prisma, de manera que en el plano focal se obtienen dos imágenes que presentan un movimiento relativo. Dicho movimiento es debido a la inclinación local (tip-tilt) de los frentes de onda.

Suponiendo que la turbulencia sigue la ley de Kolmogorov, la varianza longitudinal σ_l^2 y transversal σ_t^2 (paralela y perpendicular al alineamiento de la apertura) del movimiento diferencial de la imagen, está dada por:

$$\sigma_{l,t}^2 = \sigma^2 \left[1 - C_{l,t} (D/d)^{1/3} \right] \quad (3.5)$$

donde σ^2 es la varianza de las fluctuaciones de fase, $C_{l,t}$ es la constante longitudinal $C(l)$ ó la constante transversal $C(t)$, d es la separación de las subaperturas y D el diámetro de cada subapertura. Con $C(l) = 0.541$ y $C(t) = 0.810$, estos valores se cumplen cuando $(D/d) \leq 0.5$.

La covarianza de las fluctuaciones del ángulo de llegada, está dada por :

$$B(\xi, \eta) = \langle \alpha(x, y), \beta(x + \xi, y + \eta) \rangle, \quad (3.6)$$

la cual está relacionada a la covarianza de las fluctuaciones de la fase $B_\phi(\xi, \eta)$ a través de

$$B(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2 B_\phi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2}, \quad (3.7)$$

e introduciendo la función de estructura de fase (2.6)

$$D_\phi(\xi, \eta) = 2 \left[B_\phi(0, 0) - B_\phi(\xi, \eta) \right] \quad (3.8)$$

La covarianza longitudinal está dada por:

$$B_l(d, 0) = 0.097 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \quad (3.9)$$

con d la separación entre aperturas y la covarianza transversal dada por:

$$B_l(0, d) = 0.145 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

Para la turbulencia que cumple con la teoría de Kolmogorov, la función de estructura de fase está dada por (2.15):

$$D_\phi(x, y) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \quad (3.11)$$

en donde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, con x la variable longitudinal y y la variable transversal.

La covarianza en el origen es limitada por el promedio de la apertura y esta dada por la expresión para la varianza del movimiento de la imagen derivada por Fried (2.14):

$$B(0, 0) = 0.179 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{D} \right)^{1/3} \quad (3.12)$$

sustituyendo (3.9) y (3.12) en (3.8) se obtiene la expresión aproximada para la varianza σ_l^2 del movimiento diferencial longitudinal para $d \geq 2D$:

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}] \quad (3.13)$$

Considerando ahora la dirección transversal se obtiene:

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \quad (3.14)$$

Estas varianzas pueden ser expresadas en términos de la varianza total para un movimiento en dos dimensiones a través de una apertura única de diámetro D :

$$\sigma^2 = 2B(0, 0) = 0.358 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)^{5/3} \left(\frac{\lambda}{D} \right)^{1/3} \quad (3.15)$$

por lo tanto:

$$\sigma^2 = 0.373 \varepsilon_{FWHM}^2 \left(\frac{r_0}{D} \right)^{1/3} \quad (3.16)$$

en donde $\varepsilon_{FWHM} = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}$

Esquema general del DIMM

Históricamente el diseño del DIMM ha sufrido diversas modificaciones, desde el diseñado por Stock y Keller (1960, [33]) hasta Sarazin y Roddier (1990,[32]), llegando a la versión comercial de Vernin y Muñoz-Tuñón (1995, [37]).

El DIMM empleado en estas observaciones fue adquirido por el IA-UNAM a la compañía LHESA Electronique (Francia), y originalmente fue desarrollado en colaboración entre el DAUNSA y el Instituto de Astrofísica de Canarias, España, por Vernin y Muñoz-Tuñón (1995, [37]).

Parámetros optomecánicos: Telescopio (20 cm) Schmidt-Cassegrain (Celestron), con un diámetro de 20.3 cm, longitud focal de 200 cm, diámetro de cada una de las pupilas dobles 6 cm, distancia de 14 cm entre pupilas, longitud focal equivalente de 730 cm, ángulo aproximado de desviación del prisma de 30 segundos de arco.

Cámara CCD intensificada: LH-50385 (LHESA-Electronique) intensificador acoplado al CCD con fibra óptica, (desamplificación 1:15), con fotocátodo S20R, placa fósforo P20, disparador variable con tiempos entre 1 y 10 ms, CCD de 576×550 pixeles con 23×23 μm de tamaño de píxel.

Sistema de captura de imagen: PIP 1024 (MATROX), no está sincronizada con el píxel de salida del CCD. El tamaño del píxel en la ventana de entrada del intensificador de imagen es de 24.5×33.4 μm .

Montura ecuatorial: MT 3 (Basellga) sin apuntado automático y con guiado automático.
Computadora: PC-AI.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

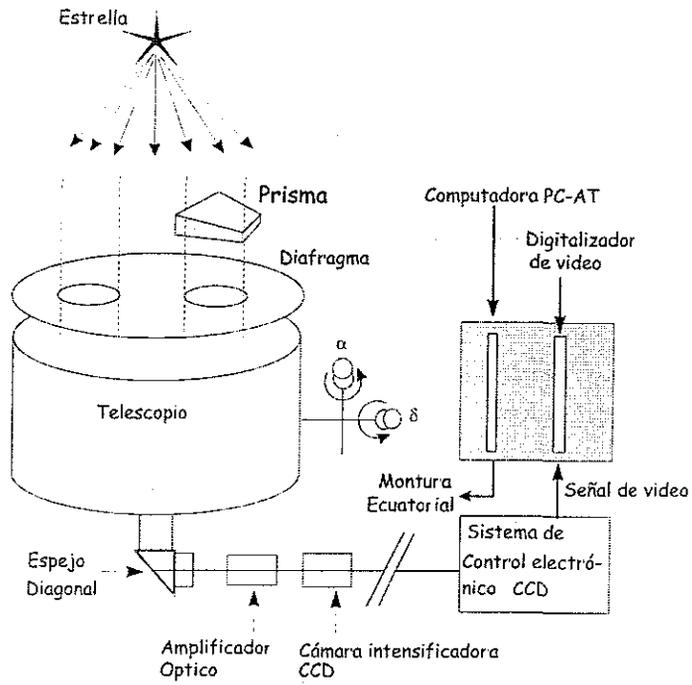


Fig. 3-2 Configuración general y componentes del DIMM [37]

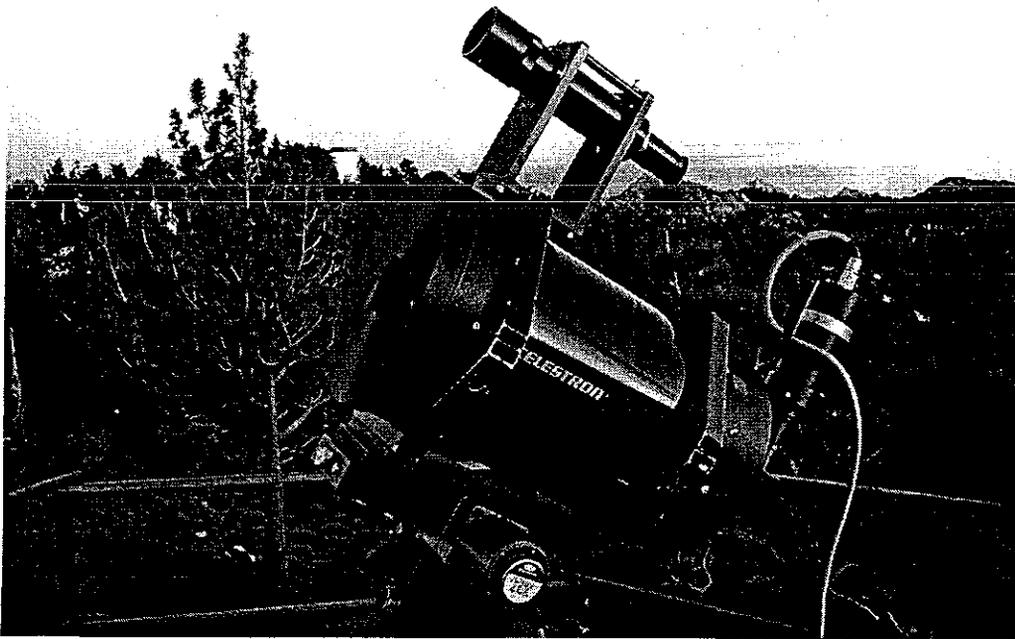


Fig. 3-3 DIMM instalado en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, B C

3.2.2 Mástil instrumentado con sensores de temperatura microdiferenciales

El mástil instrumentado con sensores de temperatura microdiferenciales se basa en el principio explicado en la sección 3.1. El mástil instrumentado además de tener sensores de temperatura microdiferenciales, puede incluir anemómetros, barómetros, termómetros, etc., en este caso específico el mástil instrumentado solamente cuenta con sensores de temperatura microdiferenciales.

Esquema general del Mástil Instrumentado con sensores de temperatura microdiferenciales

Se colocaron pares de sensores de temperatura microdiferenciales sobre un riel, separados una distancia d , estos rieles se colocan a las alturas específicas para las cuales se desea conocer el comportamiento de la turbulencia óptica.

El sistema completo esta compuesto de: los sensores de temperatura microdiferenciales, sistema de procesamiento de información, sistema de almacenamiento y sistema de procesamiento de datos. El sistema empleado ha sido diseñado y desarrollado por Max Azouit de la Universidad de Niza-Sophia Antipolis, Francia y lo ha llamado Sistema AZX-SOL [6].

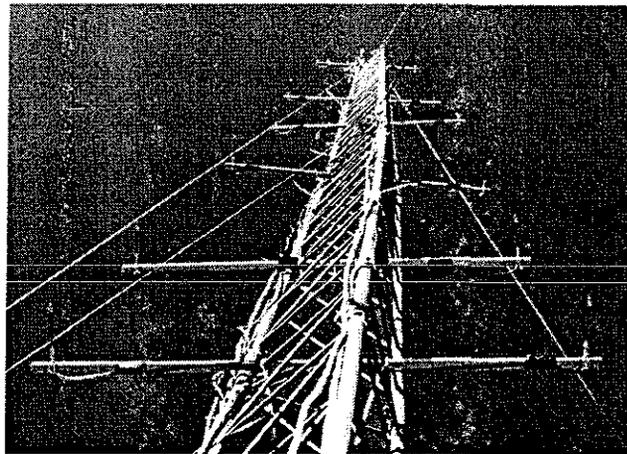


Fig. 3-4 Mástil Instrumentado instalado en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, B.C.

Sensores de temperatura microdiferenciales

Cada sensor microtérmino está conformado por cuatro filamentos metálicos en configuración de puente de Wheatstone. La resistencia del filamento varía de acuerdo a la variación de la temperatura a través de la relación [6]:

$$R_{C_T} = R_{C_{20}} [1 - \alpha_{20} (T - 20)], \quad (3.17)$$



en donde $R_{C_{20}}$ es el valor de la resistencia de un sensor a una temperatura de 20 °C.

Para medir variaciones de temperatura en ordenes de microgrados se emplean sensores de pequeñas dimensiones, con filamentos de 5 μ de espesor y con tiempos de respuesta muy cortos, para así limitar la integración espacial y temporal, respectivamente.

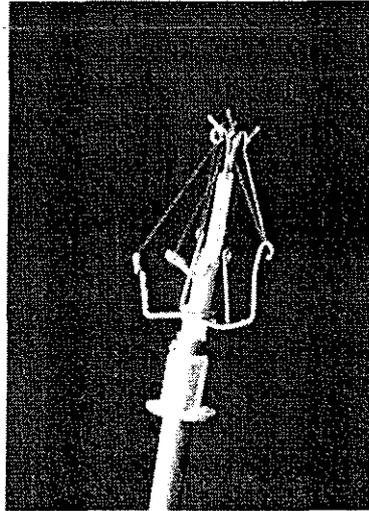


Fig 3-5 Sensor de Temperatura microdiferencial (nótese el filamento ultradelgado)

Características técnicas de los sensores

Se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2	
Filamento	De tipo frío.
Metal	Níquel
Dimensiones	Largo de 8 mm, diámetro de 25 μ m
Pureza	99.7 % de Níquel
$\frac{\Delta R[\Omega]}{\Delta T[^\circ C]}$	1.516 $\Omega/^\circ C$
Intervalo de operación	- 100 °C a 50 °C. \pm 0.045 °C
$\frac{\Delta V}{\Delta T}$	600 $\frac{nV}{m^\circ C}$

La señal de salida puede ser muestreada directamente o puede pasar previamente a través de un filtro con frecuencias de corte de 1 Hz y 25 Hz.

Cuando se mide la señal sin filtrar el tiempo de respuesta de los sensores (>100 Hz), la velocidad de muestreo y el tiempo promedio determinarán el ancho espectral de operación. Con una velocidad de muestreo de 60 Hz y un tiempo promedio de alrededor de 10 s se obtiene un ancho espectral adecuado para la medida del parámetro de estructura de temperatura, de 0.1 Hz a 30 Hz.

Sistema de procesamiento de información¹

Cada sistema AZX-SOL consiste de dos parejas de sensores térmicos de filamento frío y determina cuatro valores diferenciales y un valor absoluto. Estas cinco salidas permiten evaluar los valores siguientes:

- Diferencia de temperatura entre los dos sensores de cada pareja dentro del dominio frecuencial comprendido entre 0 y 0.3 Hz.
- La energía de las fluctuaciones de la diferencia de temperaturas existente entre los dos sensores de cada pareja integrados dentro de 0.3 a 250 Hz. Estos valores son representativos de la función de estructura para la distancia ρ de separación de los sensores.
- La temperatura ambiente para cada uno de los sensores y así proporcionar un valor de referencia requerido.

Cada sistema contiene un archivo de parámetros que permite convertir los valores digitales en valores analógicos, para convertir estos valores en valores térmicos, se deben considerar las características de los sensores.

Adquisición de datos

Cada sistema entrega una cadena de datos cada 1.4 segundos. La adquisición de los datos entregados por el sistema se hace a través de los puertos serie de la computadora. Debido a que se tienen dos sistemas se requieren dos puertos serie en la computadora. El sistema operativo empleado es MS-DOS.

Se emplean tres programas: ACQDMAT.BAS, DEPMAT.FOR, ADJUST.BAS., detallados a continuación.

ACQDMAT.BAS

ACQDMAT.BAS es un programa basado en el lenguaje TurboBasic. Efectúa la adquisición y el análisis en tiempo real. Crea dos tipos de archivos:

- Archivos 'BRUT', llamados por los programas matxxx.rw1 y matxxx.rw2, el cual contiene los parámetros numéricos dentro del sistema.
- Los archivos de análisis, llamados por el programa matxxx.r01 y matxxx.r02, los cuales contienen las medidas temporales de $C_N^2(h)$.

ACQDMAT.BAS llama a dos archivos de parámetros:

1. Parsonde.dat, el cual contiene las características de los sistemas.
2. Config.mat, en el cual se indican las características de los sensores: alturas, separaciones y resistencias a 20 °C.

ACQDMAT.BAS escribe un encabezado dentro de los archivos que crea.

En donde se encuentran:

- Nombre del archivo y comentarios adicionales
- Lugar, fecha, hora, y número de sistema
- Altura de cada sensor

¹ Una descripción detallada del sistema se encuentra en el Apéndice A

- Distancia entre sensores, posiciones relativas (H significa pareja sobre una misma horizontal), Tipo de medida realizada (N sin medida del viento), códigos de cantidades medidas.
- Parámetros del sistema
- Resistencias promedio de los sensores a 20 °C dentro de config.mat
- Presión y temperatura. Estos datos los debe introducir el experimentador.

DEPMAT.FOR

Está destinado al análisis de los archivos: BRUT, matxxx.rw1 y matxxx.rw2, así como de su almacenamiento.

Localiza en el encabezado de los archivos anteriores los parámetros necesarios para efectuar el análisis.

ADJUST.BAS

ADJUST.BAS es una utilidad que facilita la calibración inicial de las parejas de sensores. Localiza dentro del archivo Parsonde.dat las consignas de equilibrio y aporta una ayuda al experimentador al visualizar el desequilibrio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 4 Campaña intensiva de estudio del sitio: Observatorio Astronómico Nacional – San Pedro Mártir.

El Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California (OAN - SPM) es el más importante observatorio profesional con que cuenta México. El sitio en el que se encuentra tiene un nivel de calidad de los mejores a nivel mundial, por lo cual se han realizado diversas campañas de observaciones para efectuar estudios detallados sobre las condiciones astroclimatólogicas y en particular sobre las características locales de la turbulencia atmosférica.

4.1 Localización del sitio de estudio

El Observatorio Astronómico Nacional se encuentra situado en la parte Noreste del parque nacional de San Pedro Mártir, dentro de la sierra de SPM, Península de Baja California. Se localiza a una latitud de $31^{\circ} 02' N$, altitud de 2800 m sobre el nivel del mar y longitud de $115^{\circ} 29' O$ este. El sitio particular de este estudio local de turbulencia óptica se encuentra cercano (a unos cientos de metros) de los tres telescopios con los que cuenta el observatorio [Fig. 4-1].



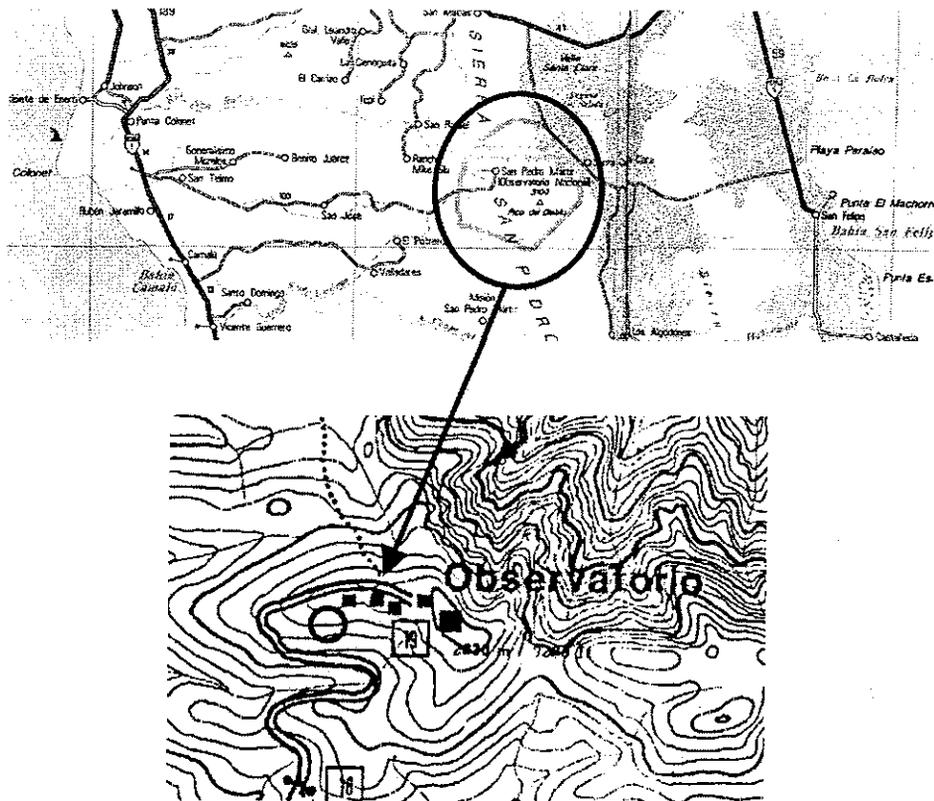


Fig 4-1 Localización del sitio del OAN-SPM y en particular del DIMM y Mástil Instrumentado (círculo)

4.2 Antecedentes astroclimatológicos

En la localidad, los vientos del Noreste (NE) siguen a lo largo y ancho del valle, el cual se considera entre el observatorio y el pico Norte del Venado Blanco, mientras los vientos del Suroeste soplan directamente sobre el lado posterior ascendiendo una pendiente uniforme. Los vientos dominantes que llegan al observatorio fluyen desde Sur – Sur – Este (Álvarez [1]), confirmado posteriormente por Echeverría et al. [9] y Michel et al. [24]. Los vientos que fluyen de esta dirección no encuentran montaña alguna a altitud comparable a la del observador, que pudieran contribuir a la generación de turbulencia cerca de la superficie.

Se han reportado numerosos estudios climatológicos a lo largo de los años de operación del OAN - SPM , dando una mejor visión sobre sus características como sitio astronómico. Uno de los estudios realizado por Tapia [34] ha compilado 10 años de estadísticas climatológicas, determinando 56.7% de noches fotométricas, 80.4% de noches espectroscópicas y un porcentaje total de cobertura de nubes similar al de La Silla y Cerro Tololo (Chile), y ligeramente mejor que Mauna Kea (Hawaii). La transparencia del cielo y número de noches observables se deben a las corrientes frías del Océano Pacífico. Hiriart et al. [15] han medido la opacidad atmosférica a 215 GHz. Sobre 210 días y noches, determinando un valor medio de 0.22, el cual es comparable a Mauna Kea, y a Pico Veleta (España).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Echeverría et al. [9] reportan una calidad de imagen cuya mediana es de 0.69 segundos de arco, obtenidos durante una campaña extensiva de 3 años.

Ávila [2] monitorea la distribución vertical de la constante de turbulencia óptica $C_N^2(h)$, empleando el Scidar Generalizado del Departamento de Astrofísica de la Universidad de Niza-Sophia Antipolis, determinando que la calidad de imagen en el primer kilómetro, en la atmósfera libre y en el resto de la atmósfera, tienen un valor medio de 0.56", 0.45" y 0.78" respectivamente. Estos valores fueron determinados con el Scidar generalizado instalado en el telescopio de 2.1 m e incluyen el "seeing" producido en el domo del telescopio.

4.2.1 Campaña Intensiva

El presente trabajo se centra en el estudio de la contribución de la capa superficial de turbulencia óptica que contribuye a la degradación de imágenes astronómicas.

El interés sobre este tema se presenta tanto en un contexto mundial como nacional. A nivel mundial el desarrollo actual de los telescopios e interferómetros de nueva generación considera a la alta resolución angular como un área prioritaria que requiere de un fuerte apoyo para su investigación y desarrollo. Dentro de este contexto se tiene el requerimiento de encontrar los sitios astronómicos con las condiciones atmosféricas óptimas, en donde los estudios sobre turbulencia atmosférica tienen un carácter fundamental para la planeación de las observaciones astronómicas a realizar considerando algunas características astroclimatológicas. Estas líneas de investigación en astroclimatología se han venido desarrollando en organismos tan importantes como el Observatorio Europeo Austral y en los consorcios norteamericanos (NOAO).

En el contexto nacional el desarrollo en estas áreas es relativamente reciente. Actualmente, en el Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM) se desarrollan sistemas de óptica adaptativa que serán instalados en el telescopio de 2.1 m del OAN-SPM. Estos proyectos se encuentran a cargo del grupo de Alta Resolución Espacial del IA-UNAM. En el mismo instituto, se está diseñando el Telescopio Optico-Infrarrojo Mexicano de Nueva Tecnología (TIM), que se planea instalar en el OAN-SPM. Para estos proyectos, es necesario caracterizar la turbulencia óptica en el sitio de los telescopios, y sus alrededores cercanos. Se han realizado campañas de medición de la calidad de las imágenes (o seeing) [9], sin embargo, la caracterización de la turbulencia atmosférica de un sitio astronómico, significa mucho más que la medición del seeing únicamente e implica un complejo trabajo estadístico.

Para la medición de las principales características de la turbulencia atmosférica se organizó un proyecto conjunto con el equipo de alta resolución angular del IA-UNAM e integrantes de otras instituciones tanto nacionales como internacionales. El proyecto *Estudios de turbulencia atmosférica para observaciones astronómicas*, que contó con apoyo del CONACyT y de la DGAPA-UNAM conforma observaciones en el dominio óptico con diferentes instrumentos, SCIDAR, DIMM, Globo sondas, Mástil, modelos numéricos en

tres dimensiones. La duración de este proyecto ha sido de tres años, actualmente se encuentra en desarrollo, y el responsable principal es el Dr. Remy Ávila.

El tema principal del presente trabajo forma parte fundamental de este proyecto y para su desarrollo particular se requirió planear y llevar a cabo una campaña intensiva en el OAN-SPM durante el año 2000, empleando entre otros instrumentos el DIMM y el mástil instrumentado con microsensores de temperatura. Dicha campaña se dividió en dos periodos de observaciones: del 12 al 22 de Mayo y del 7 al 15 de Diciembre con intervalos de tiempo de adquisición entre 6 y 13 hrs por noche.

Con los datos adquiridos se obtendrán los siguientes parámetros atmosféricos:

- Sensores de temperatura microdiferenciales: A través de los valores de $C_N^2(h,t)$ adquiridos se pretende describir y determinar comportamiento y tendencia de la turbulencia óptica, así como la obtención del seeing integrado para alturas específicas, cercanas al nivel del suelo (capa superficial).
- DIMM: A través de los valores de seeing adquiridos por el DIMM se pretende determinar su comportamiento temporal (variaciones y tendencias) así como la existencia de un tiempo de correlación característico.
- Con los datos de ambos instrumentos se obtendrá la razón entre la energías turbulentas de la capa superficial con respecto al total de la energía turbulenta de todas las capas, y el porcentaje con el cual contribuye la capa superficial a la degradación del seeing.

A lo largo de los siguientes capítulos se efectúa el análisis detallado de los datos adquiridos y se obtienen las características mencionadas en el párrafo anterior.

Capítulo 5 Sensores de temperatura microdiferenciales: Resultados y análisis.

5.1 Altura de los sensores de temperatura microdiferenciales

Los sensores de temperatura microdiferenciales fueron colocados sobre un mástil a las siguientes alturas: 2.3, 3, 4, 6, 8.3, 10 y 15 m [Fig. 5-1].

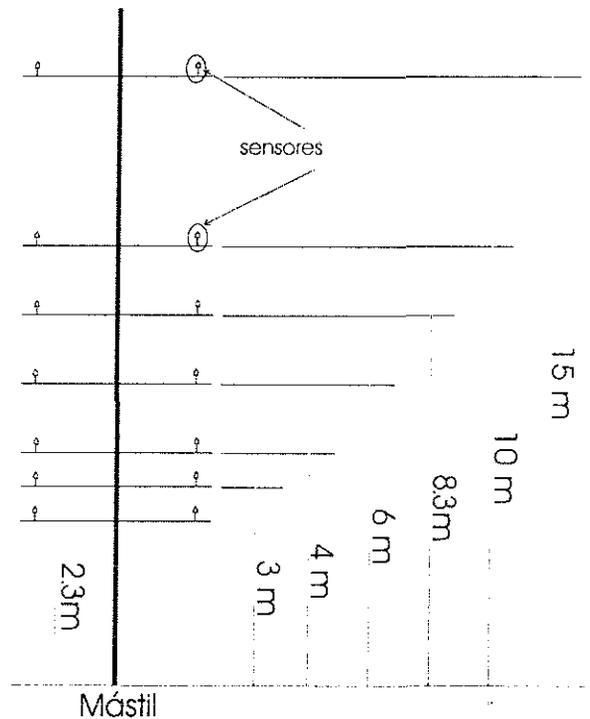


Fig. 5-1 Colocación de los sensores de temperatura microdiferenciales en el mástil, las alturas son con respecto al nivel del suelo.

5.2 Formato de los datos.

Los sensores de temperatura microdiferenciales entregan mediciones de: $C_N^2(h, t)$, tiempo de adquisición y temperatura. Dado que la adquisición se hace por pares de valores de $C_N^2(h, t)$ para pares de alturas distintas los archivos generados presentan la siguiente información:

$$Ti, Cn21, Cn22, Te,$$

con Ti = tiempo de adquisición [s], $Cn21 = C_N^2(h_1, t)$ [$m^{-2/3}$], $Cn22 = C_N^2(h_2, t)$ [$m^{-2/3}$] y Te = temperatura [$^{\circ}C$], con $h_1 \neq h_2$.

5.3 Análisis

5.3.1 Comportamiento del $C_N^2(h,t)$

En una gráfica de evolución temporal del $C_N^2(h,t)$ a lo largo del día y de la noche se puede distinguir claramente la parte nocturna (21 - 5 hrs) de la diurna (10-18 hrs). Esta diferencia se observa al efectuar un análisis de las amplitudes y los histogramas del $\log[C_N^2(h,t)]$:

- En el régimen nocturno, el comportamiento del $C_N^2(h,t)$ sigue una distribución log normal aunque, presenta una asimetría observable al superponer la gaussiana correspondiente a el histograma del $\log[C_N^2(h,t)]$. Esta asimetría disminuye con la altitud mostrando así la influencia del suelo sobre la distribución del $C_N^2(h,t)$.
- Un régimen diurno donde el $C_N^2(h,t)$ no presenta una distribución log-normal, debido a que cerca del suelo el viento y la orografía producen una convección forzada unida a la convección debida al gradiente de temperatura. Esta convección se remarca más cuando se asciende en altura, sin embargo el $C_N^2(h,t)$ continua presentando una distribución log-normal. Por lo tanto la turbulencia del suelo va desapareciendo progresivamente con la altitud explicando así este cambio de estadística

La transición entre estos dos regímenes se caracteriza por una inversión de temperatura: en el día el suelo es más caliente que el aire, el medio es convectivo, en la noche el suelo es más frío que el aire y por lo tanto el medio estable es esporádicamente perturbado por las zonas turbulentas debidas al viento y a la orografía. Por lo tanto generalmente antes de la salida del sol y después de su puesta la atmósfera se encuentra a una temperatura uniforme y el medio debe ser mas estable.

Wyngaard, Izumi y Collins [41] determinaron que el perfil de $C_N^2(h,t)$ presenta una dependencia exponencial decreciente con respecto a la altura. Esta dependencia se encuentra expresada por $C_N^2(h) = kh^{-4/3}$ para el día, y $C_N^2(h) = kh^{-2/3}$ para la noche. Para ambas expresiones se deben considerar condiciones estables.

A continuación se analiza el comportamiento del $C_N^2(h,t)$ para las diversas noches que constituyen la campaña.

Se generan gráficas múltiples del $\log[C_N^2(h,t)]$ vs. t para cada altura [Fig. 5-2], por lo tanto aunque gráficamente los espectros se visualicen con variaciones pequeñas realmente presenta variaciones hasta en un factor de 10.

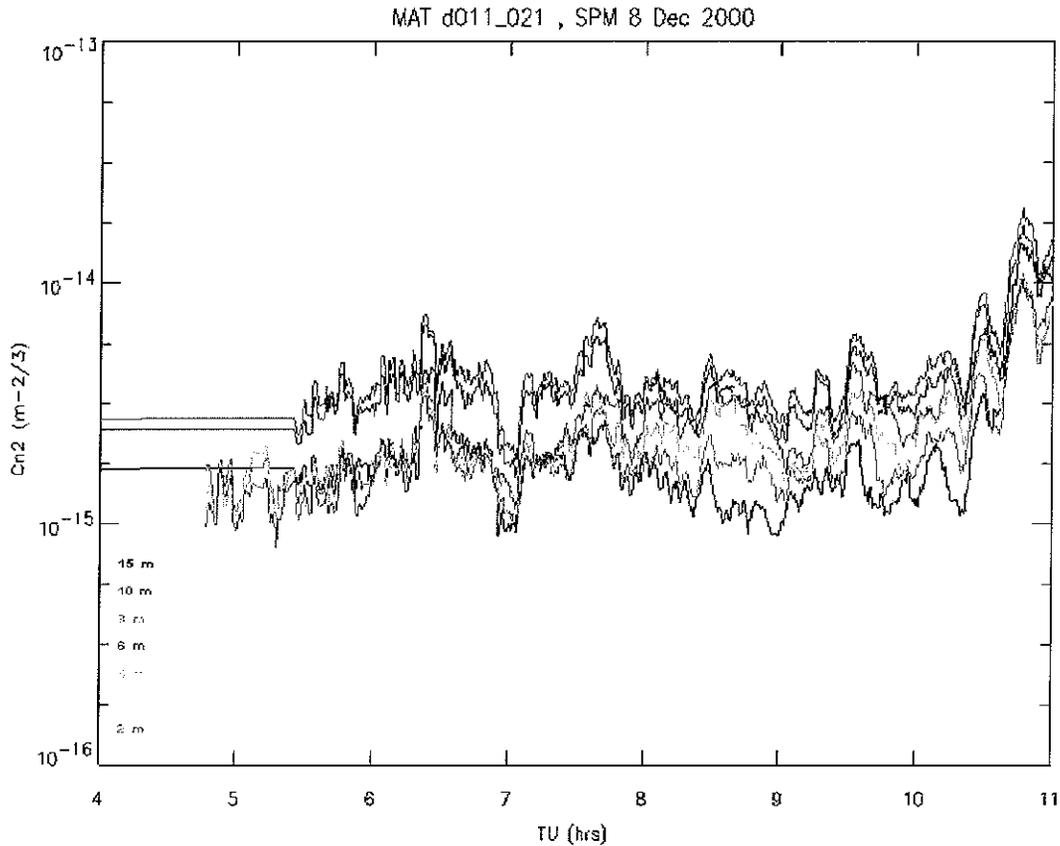


Fig 5-2 Evolución temporal del $C_N^2(h,t)$ para las distintas alturas a las que se encuentran los sensores, para la noche del 8 de Diciembre del 2000

En la Fig. 5-2 se observa que el comportamiento del $C_N^2(h,t)$ sigue claramente una dependencia decreciente con respecto a la altura, es decir se cumple que $C_N^2(h_1,t) > C_N^2(h_2,t) > C_N^2(h_3,t)$ para toda $h_1 < h_2 < h_3$, sin embargo para los niveles 6 y 10 m se observa un comportamiento invertido, es decir $C_N^2(h_1,t) < C_N^2(h_2,t)$ con $h_1 < h_2$, probablemente a esas alturas se presenta una pequeña capa de turbulencia.

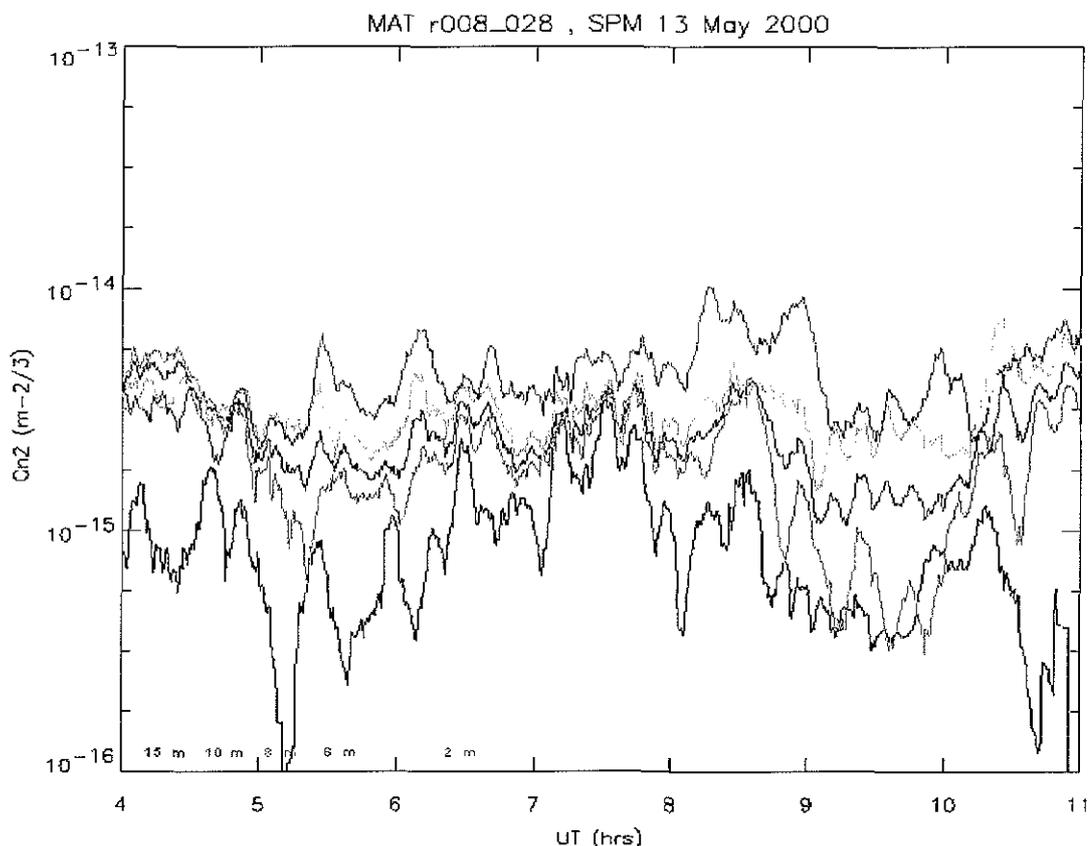
Analizando el comportamiento del $\log[C_N^2(h,t)]$ a lo largo de la noche y para las diferentes alturas con base a las relaciones establecidas por Wyngaard, Izumi y Collins [41], se observan tres casos de comportamiento del $C_N^2(h,t)$, nombrándolos como: Noche casi normal, noche invertida y noche uniforme, explicadas a continuación

Noche casi normal

Para los valores de $C_N^2(h,t)$ a distintas alturas, se dice que la noche presenta un comportamiento casi normal cuando independientemente del intervalo de variaciones que presenten los valores de $C_N^2(h,t)$ se cumple que: $C_N^2(h_1,t) > C_N^2(h_2,t) > C_N^2(h_3,t)$ para toda $h_1 < h_2 < h_3$, [Fig. 5-3] Las noches durante la campaña completa en las que el $C_N^2(h,t)$ sigue este comportamiento son las de la Tabla 5-1.

Amplias variaciones en los valores de $C_N^2(h,t)$ implican un medio no estático, es decir se está generando turbulencia óptica

Tabla 5-1
13-Mayo-2000
16-Mayo-2000
19-Mayo-2000



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Fig 5-3 Evolución temporal del $C_N^2(h,t)$ para las distintas alturas a las que se encuentran los sensores, noche del 13 de Mayo del 2000. Las amplias variaciones en los valores de $C_N^2(h,t)$ se presentan al inicio y final de la noches

Noche invertida

Se afirma que la noche es invertida si el comportamiento del $C_N^2(h,t)$ a las diferentes alturas es: $C_N^2(h_1,t) < C_N^2(h_2,t) < C_N^2(h_3,t)$ para toda $h_1 < h_2 < h_3$, y por lo tanto no sigue un comportamiento exponencial decreciente en función de la altura, [Fig 5-4]. Las noches que presentan este comportamiento se enlistan en la Tabla 5-2

Tabla 5-2
17 de Mayo del 2000
18 de Mayo del 2000
9 de Diciembre del 2000
10 de Diciembre del 2000

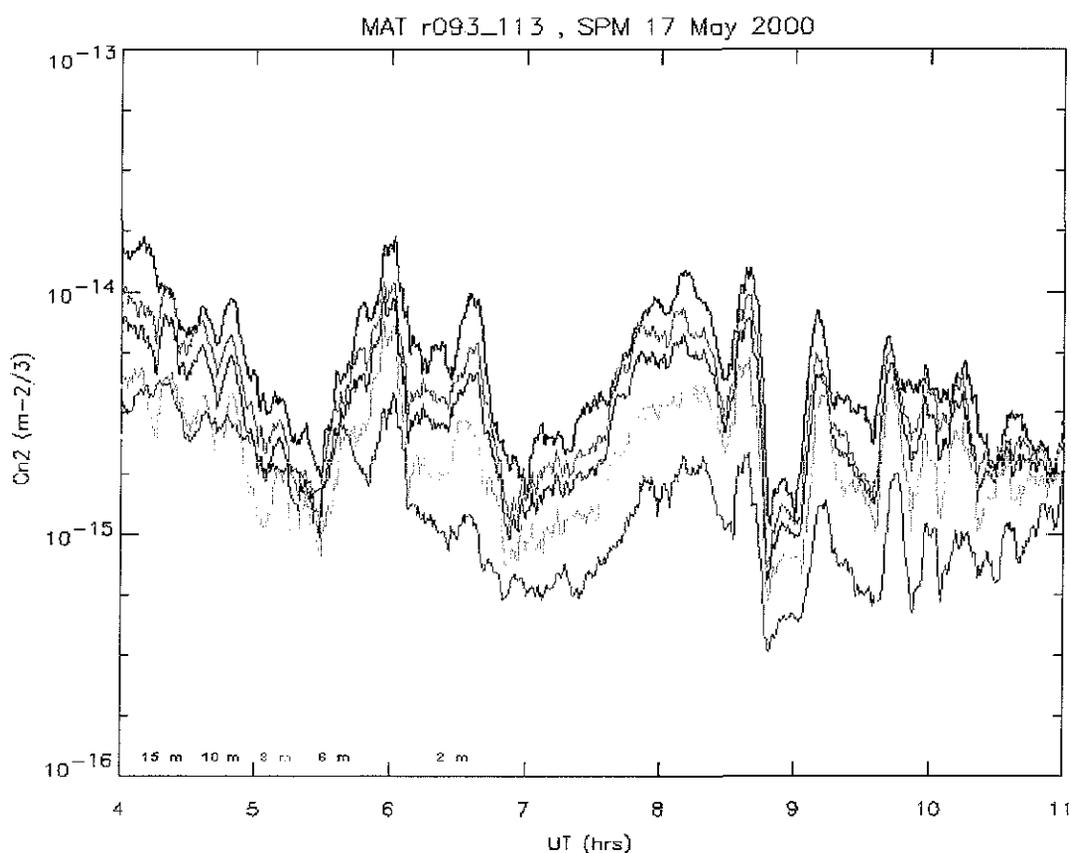


Fig 5-4 Evolución temporal del $C_N^2(h,t)$ para las distintas alturas a las que se encuentran los sensores, noche del 17 de Mayo del 2000. Se observa una clara inversión en el comportamiento, valores de $C_N^2(h,t)$ mayores a menores alturas

Noche uniforme

Se denomina noche uniforme cuando los valores del $C_N^2(h,t)$ para las distintas alturas no sigue un claro comportamiento decreciente o creciente, es decir si las relaciones:

$C_N^2(h_1,t) > C_N^2(h_2,t) > C_N^2(h_3,t)$ y $C_N^2(h_1,t) < C_N^2(h_2,t) < C_N^2(h_3,t)$ para toda $h_1 < h_2 < h_3$ no se cumplen claramente. Presentan pequeñas variaciones en los valores del $C_N^2(h,t)$, valores casi idénticos para las diferentes alturas [Fig 5-5].

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

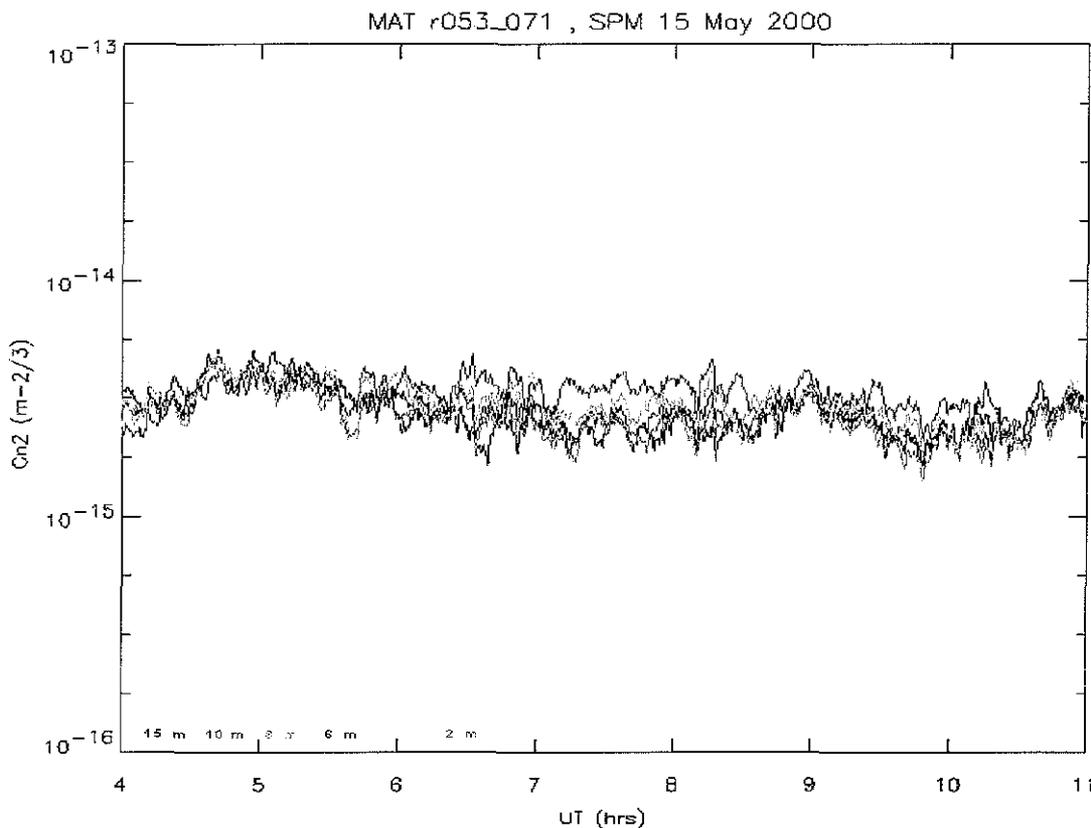


Fig 5-5 Evolución temporal del $C_N^2(h,t)$ para las distintas alturas a las que se encuentran los sensores, noche del 15 de Mayo del 2000. Se observa un pequeño intervalo de variación en los valores $C_N^2(h,t)$

$C_N^2(h,t)$ promedio del tiempo y la altura

Un parámetro importante es el conocer la energía producida por la turbulencia óptica en la capa superficial, la cual posteriormente ayuda a determinar el valor del seeing en la capa superficial. En este caso particular consideramos la capa superficial a la comprendida entre los 2.3 m y 15 m con respecto al nivel del suelo.

Para la obtención de la energía se debe calcular la relación (5.1), debido a que se tienen valores de $C_N^2(h,t)$ dependientes del tiempo, se obtiene previamente su promedio con respecto al tiempo para una altura específica, posteriormente se calcula (5.1).

$$\int_{2.3m}^{15m} \langle C_N^2(h) \rangle dh \quad (5.1)$$

Los valores obtenidos en (5.1) para todas las noches que conforman la campaña se presentan en la Tabla 5-3.

5.3.2 Seeing

Una vez que se obtiene la energía generada por la turbulencia óptica entre 2.3 y 15 m se puede calcular el valor del seeing para este mismo intervalo de alturas, el seeing de la capa superficial, se aplica la siguiente relación² (ecs. (2.13) y (2.19)):

$$\varepsilon_{CS}(t) = (0.98\lambda) / \left[16.7\lambda^{-2} \left\langle \int_{h_1}^{h_2} C_N^2(h) dh \right\rangle \right]^{-3/5} \quad (5.2)$$

con unidades en radianes y

$$\varepsilon_{CS}(t) = 2.063 \times 10^5 \varepsilon_{CS}(t) \quad (5.3)$$

en segundos de arco.

Por lo tanto el seeing con el cual contribuye la capa superficial para cada noche se da en la Tabla 5-3, obteniéndose para Mayo un $\langle \varepsilon_{CS}(t) \rangle_{Mayo} = 5.2 \times 10^{-2}$ seg de arco, para

Diciembre de $\langle \varepsilon_{CS}(t) \rangle_{Diciembre} = 0.001$ y para la campaña completa de

$$\langle \varepsilon_{CS}(t) \rangle_{Mayo-Diciembre} = 0.001$$

² La descripción de los programas utilizados se encuentra en el Apéndice B

Tabla 5-3		
Fecha TU	$\int_{2.3m}^{1.5m} \langle C_N^2(h) \rangle dh$ [m ^{-2/3}]	$\varepsilon_{cs}(t)$ [seg arc]
Mayo		
12-5-2000	1.70 x 10 ⁻¹⁴	0.11
13-5-2000	6.57 x 10 ⁻¹⁵	0.06
14-5-2000	6.67 x 10 ⁻¹⁵	0.06
15-5-2000	6.07 x 10 ⁻¹⁵	0.06
16-5-2000	1.00 x 10 ⁻¹⁵	0.02
17-5-2000	4.09 x 10 ⁻¹⁵	0.05
18-5-2000	4.41 x 10 ⁻¹⁵	0.05
19-5-2000	1.31 x 10 ⁻¹⁵	0.02
20-5-2000	1.99 x 10 ⁻¹⁵	0.03
21-5-2000	6.84 x 10 ⁻¹⁶	0.05
Promedio Mayo	4.98 x 10 ⁻¹⁵	5.2 x 10 ⁻²
Diciembre		
7-12-2000	2.43 x 10 ⁻¹⁴	0.14
8-12-2000	1.28 x 10 ⁻¹⁴	0.09
9-12-2000	4.19 x 10 ⁻¹⁴	0.19
10-12-2000	1.09 x 10 ⁻¹⁴	0.08
Promedio Dic.	2.25 x 10 ⁻¹⁴	0.001
Promedio Total	1.35 x 10 ⁻¹⁴	0.001

Capítulo 6 DIMM: Resultados y análisis

6.1 Características de las adquisiciones

Para obtener la variación de la posición de los fotocentros con respecto al tiempo [3.2.1] se adquiere una ráfaga de imágenes, así para cada ráfaga de imágenes se calcula un valor de seeing. Cada imagen que conforma la ráfaga tiene un tiempo de integración de 1 a 4 ms y cada ráfaga esta conformada por 400 imágenes [Fig. 6-1]. El valor del seeing calculado, es el seeing integrado a partir de la pupila del telescopio hacia infinito.

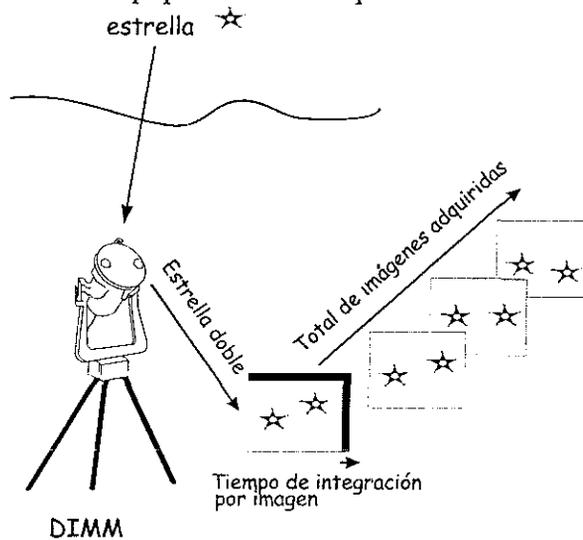


Fig 6-1 Adquisición de ráfagas de imágenes a través del DIMM.



Fig 6-2 Interfase de adquisición y despliegue del DIMM

El sistema de procesamiento de información del DIMM genera archivos en los cuales se encuentra toda la información de la adquisición. Los archivos presentan las siguientes características:

- Cada vez que se pone en funcionamiento se genera un archivo, el nombre es asignado automáticamente.

Nombre del archivo: Año/Mes/Día/hora.décimas de hora

La extensión son las décimas de la hora de la adquisición, sin embargo su información se puede ver con cualquier paquete que lea archivos .txt.

- La información contenida en cada archivo es:

Información general:

Lugar: PLACE ;;SPM

Coordenadas geográficas del sitio: LAT ;; 31.0200; LONG ;;115.3000;

Estrella observada: STAR ;;VEGA

Posición en coordenadas celestes: ALPHA ;; 18.3700; DELTA ;; 38.4700;

Fecha y hora de adquisición: YY,MM,DD ;; 99; 10; 9; TIME ;; 3; 25;

Número de imágenes por adquirir: IMAGES ;; 400;

Información de la adquisición: Se presenta en 6 columnas,

TIME	SING.L;	SING.T;	L/T	AIR M	SCINT;	PIXMAX	MVT
3.4314	.7665	.7002	1.0947	1.1413	.0250	255	0
3.4389	.8386	.7180	1.1679	1.1422	.0298	254	0

contiene:

TIME: Tiempo de adquisición.

SING L: Seeing Lateral.

SING T: Seeing Transversal.

L/T: Cociente entre el Seeing Lateral y el Ttransversal.

AIR M: Masa de aire.

SCINT: Centelleo.

PIXMAX: Píxel de intensidad máxima.

MVT: Archiva el tipo de movimiento que efectúa el sistema, si requiere reajustar en alguna dirección, etc.

Dado que durante una noche de adquisición el número de archivos generados por el sistema puede ser mayor a uno, se requiere un pre-procesamiento para obtener archivos más fácilmente manejables. El pre-procesamiento consiste en:

Leer cada uno de los archivos que conforman una noche de adquisición.

- Para cada archivo: Se leen las columnas de seeing longitudinal y del seeing transversal.

- Se obtiene su cociente: seeing longitudinal entre transversal, si se cumple que $0.8 \geq \frac{SeeingL}{SeeingT} \leq 1.2$ entonces es un dato válido y por lo tanto se almacena en un

archivo general correspondiente a ese día. El intervalo de validez del cociente es un criterio propio.

El archivo generado por noche de adquisición presenta el tiempo, el seeing longitudinal y el transversal como información.

Finalmente se leen cada uno de los archivos y se genera un nuevo archivo en donde se almacena el tiempo y el seeing global, el nombre es el día de la adquisición y la extensión es .dat.

6.1.1 Cadencia de adquisición

La cadencia promedio de los valores de seeing para cada noche de observación es de 30 s, sin embargo los intervalos de tiempo entre un valor y el siguiente son variables:

- De 22 s, 30 s, 32 s debido al reapuntado de la estrella y a el sistema de guiado, entre otras causas.
- Mayores a 1 min conocidos como tiempos muertos causados cuando la adquisición ha sido detenida temporalmente.

Por esta razón el DIMM almacena tiempo de entrega del valor del seeing y el valor del seeing.

Debido a que posteriormente se efectúa un análisis estadístico entre las noches de observación, la cadencia de adquisición para cada noche es homologada a 30 s³.

6.1.2 Nivel del DIMM

La altura del suelo a la pupila del DIMM en el mes de Mayo fue de 2.3 m., y para el mes de Diciembre fue de 8.3 m. Debido a que el análisis a realizar requiere la homologación en alturas y en tiempo de los datos de DIMM obtenidos en ambas campañas se debe aplicar un factor de corrección para los valores de seeing del mes de Mayo y así homologar la altura a 8.3 m para ambos meses [Fig 6-3].

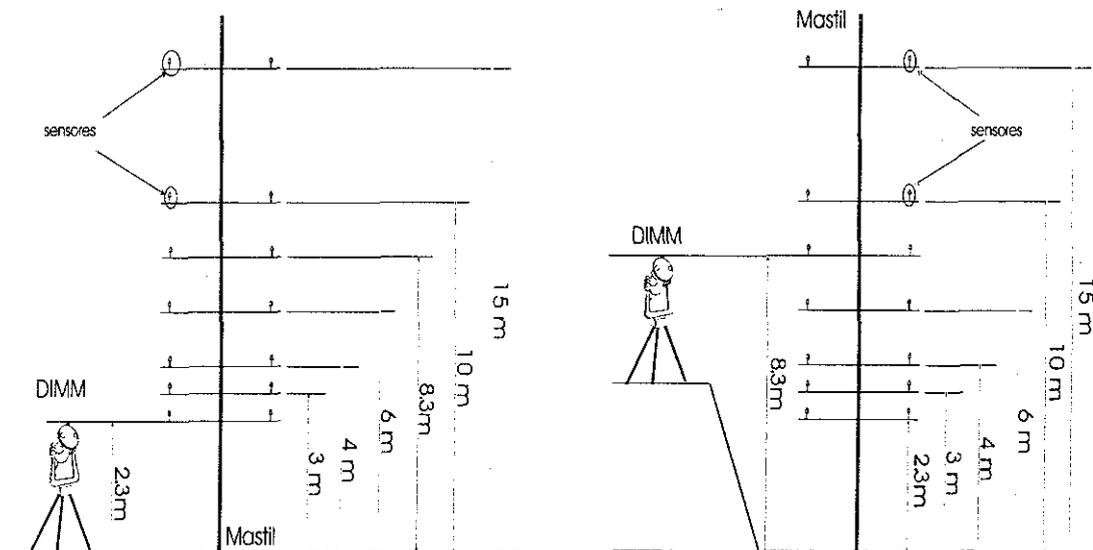


Fig. 6-3 Posición del sistema completo para Mayo y Diciembre del 2000.

³ Programa para homologar la cadencia, ver Apéndice B



Fig 6-4 Posición del DIMM en Mayo y Diciembre del 2000 respectivamente.

Para la corrección de los valores de seeing obtenidos en Mayo se siguen los siguientes pasos:

- Calcular el valor promedio de $\langle C_N^2(h) \rangle$ entre 2.3 y 8.3 m. a partir de los valores obtenidos de Mástil⁴.
- Convertir los valores de seeing obtenidos a través del DIMM para las noches de observación de Mayo de segundos de arco a radianes
- Obtener los valores de $C_N^2(h)$ para cada valor de seeing convertido
- Aplicar la corrección $C = C_N^2(h) - \langle C_N^2(h) \rangle$ para homologar la altura a 8.3 m. en ambos meses, para cada valor de $C_N^2(h)$, con $\langle C_N^2(h) \rangle = 5.89 \times 10^{-15} [m^{-2/3}]$ el factor de corrección.
- Recalcular el valor de seeing $\varepsilon(C)$ y convertirlo a segundos de arco

Los valores de seeing obtenidos a lo largo de la campaña completa (Mayo y Diciembre) son mostrados en la Fig. 6-5, se observan valores entre 0 y 4.8 seg arc. Al obtener el valor promedio del seeing por noche se obtienen la gráfica de la Fig. 6-6 y la Tabla 6-1, en donde se observa un mínimo de seeing promedio de 0.5 seg arc y un máximo de 2.5 seg arc.

⁴ Programa en el Apéndice B

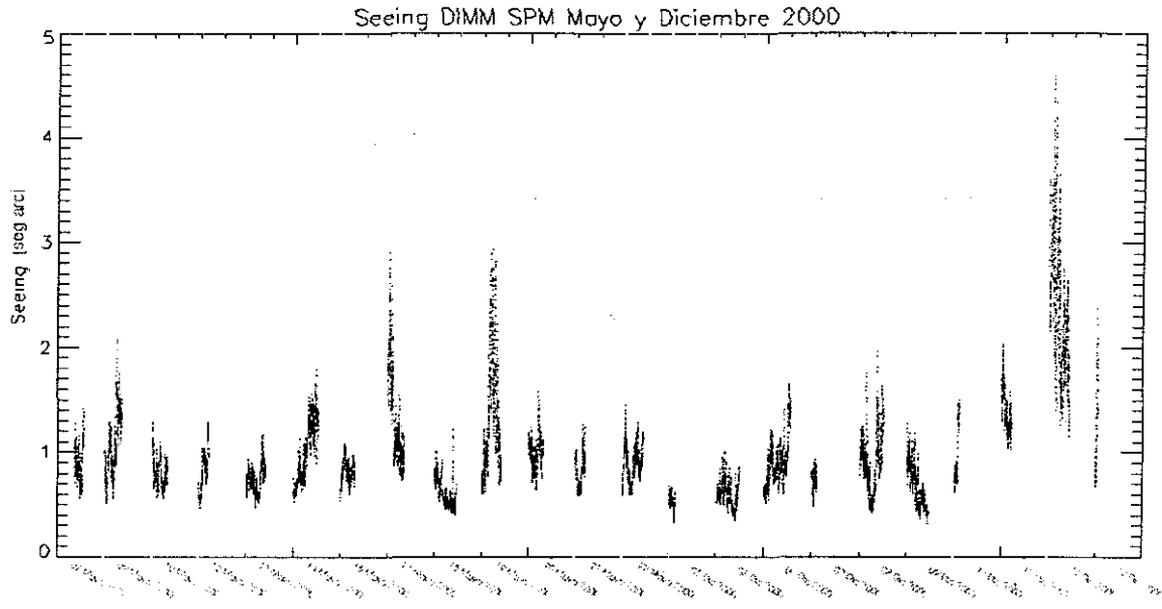


Fig 6-5 Valores de Seeing de cada noche de Mayo y Diciembre, adquiridos por el DIMM en el OAN en 2000

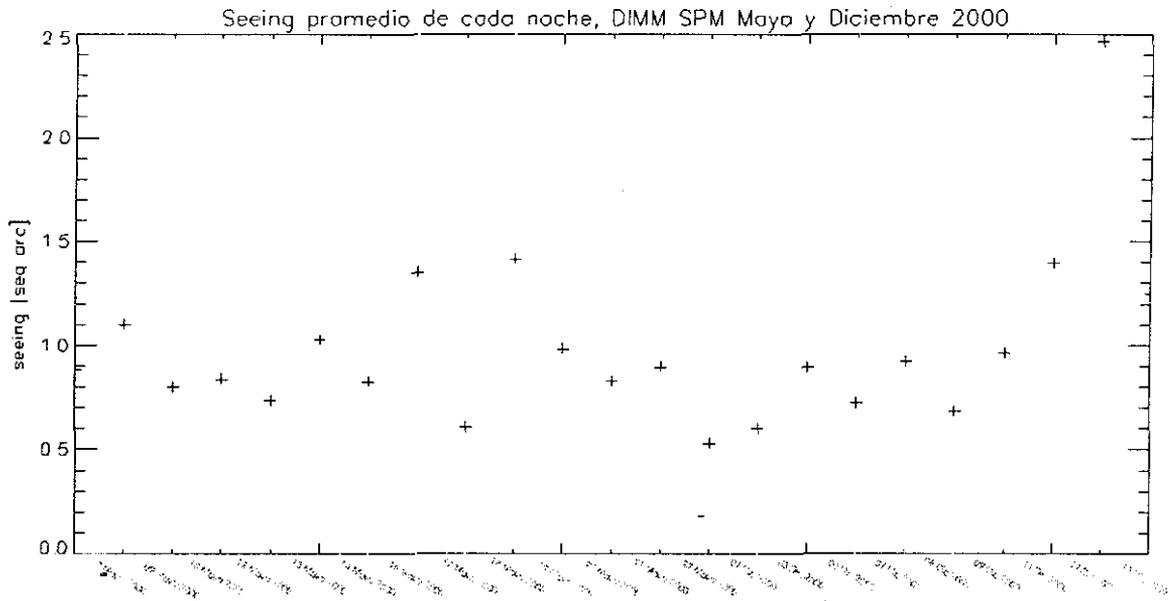


Fig 6-6 Seeing promedio para cada una de las noches de la campaña de observación, DIMM SPM 2000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fecha	$\langle \varepsilon \rangle_{Noche}$ [seg arc]	Fecha	$\langle \varepsilon \rangle_{Noche}$ [seg arc]
07-05-2000	0.88	01-12-2000	0.52
09-05-2000	1.08	03-12-2000	0.59
10-05-2000	0.80	04-12-2000	0.88
12-05-2000	0.83	07-12-2000	0.72
13-05-2000	0.73	08-12-2000	0.89
14-05-2000	1.00	09-12-2000	0.66
15-05-2000	0.83	11-12-2000	0.94
17-05-2000	1.30	12-12-2000	1.38
18-05-2000	0.60	13-12-2000	2.40
19-05-2000	1.34	14-12-2000	1.19
20-05-2000	0.98		
21-05-2000	0.82		
22-05-2000	0.89		

En la Fig. 6-7 se observan las características estadísticas del seeing de una de las “mejores” noches, es decir los valores el seeing no cambian drásticamente.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

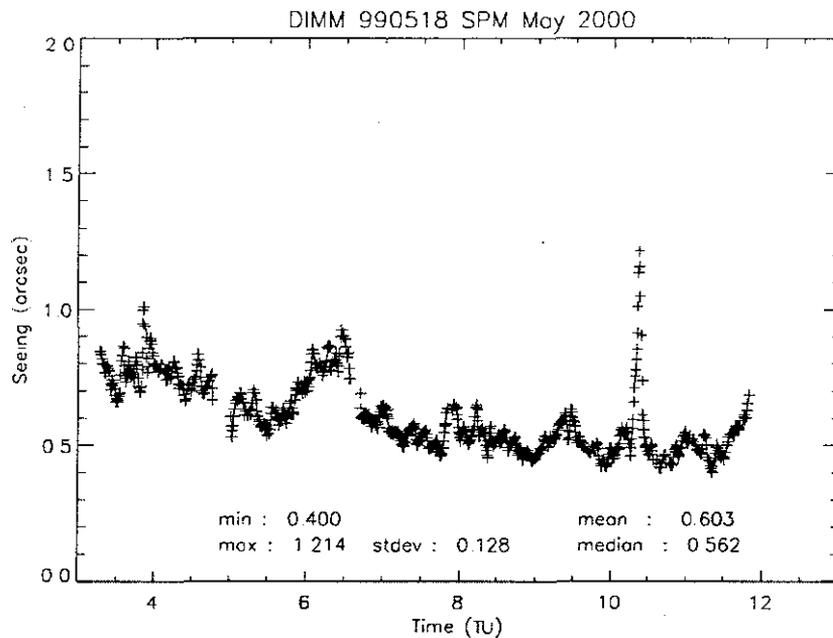


Fig. 6-7 Comportamiento del seeing adquirido a través del DIMM, en la noche del 18 de Mayo del 2000, presenta los principales parámetros estadísticos

El comportamiento del seeing para la noche del 18 de Mayo del 2000 (una “buena noche”), presenta un valor mínimo y máximo del seeing de 0.40 y 1.21 [seg arc] respectivamente, con un valor promedio de 0.60 seg arc, una mediana de 0.56 seg arc y con desviación estándar que presentan es de 0.13 seg arc.

6.2 Tendencia promedio del seeing a lo largo de la noche

Considerando el número total de valores de seeing adquiridos en esta campaña de observación se pretende determinar cual es, si es que hay una tendencia general del seeing a lo largo de una noche. Es decir si el seeing mejora o empeora a ciertas horas o al principio o al final de la noche.

Determinamos la tendencia del seeing a lo largo de una noche calculando:

$$\langle \varepsilon(t) \rangle = \frac{\sum_{i=0}^N \varepsilon_i(t)}{N} \quad (6.1)$$

con N el número total de noches de observación. Debido a que cada noche tiene homologada la base de tiempo habrá noches que presenten intervalos de tiempos muertos los cuales no son considerados al calcular (6.1).

En este caso el promedio del seeing para la campaña completa (Mayo y Diciembre) no presenta una tendencia específica, [Fig. 6-8]. En la Fig. 6-8 se observan dos gráficas conjuntas: Una delineada con cruces la cual representa el seeing promedio para el periodo completo de observación, cuyo intervalo de valores se encuentra entre 0.65 y 1.3 seg arc. La segunda gráfica representa el número de datos promediados.

Al analizar conjuntamente el seeing promedio y el número de datos promediados se observa que, al inicio y término de la adquisición el número de datos a promediar es determinante para el valor del seeing promedio, por ser tan pocos datos. Cuando el número de valores a promediar se convierte en un factor determinante, el nivel de ruido del cálculo se incrementa y por lo tanto también el intervalo entre el valor máximo y el mínimo. Para tener un decrecimiento en el nivel de ruido, es decir una estadística más precisa deben ser promediados una mayor cantidad de datos.

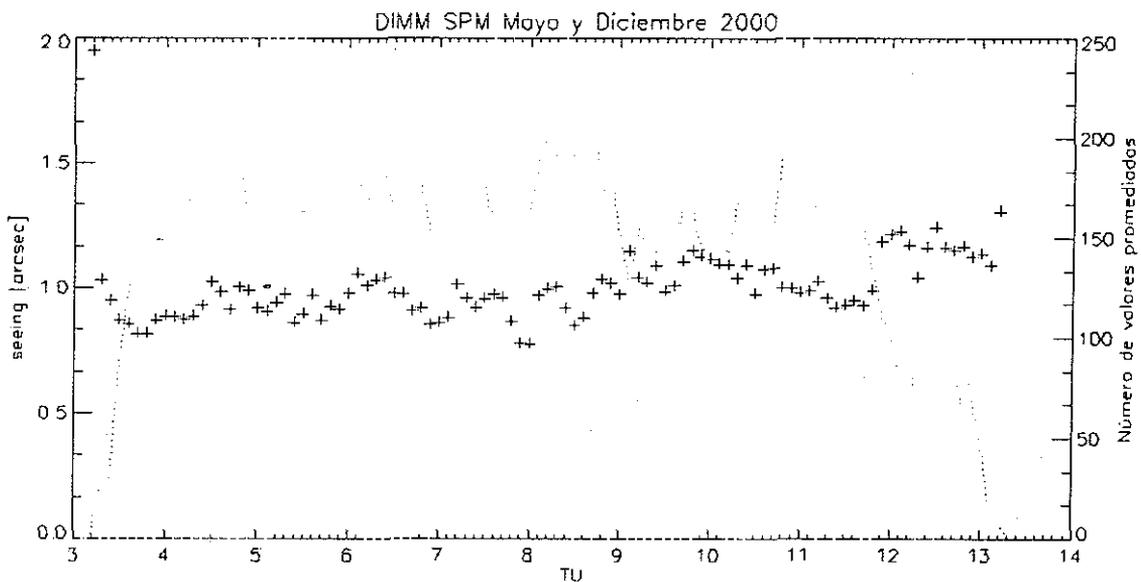


Fig. 6-8 Seeing promedio (+++) para el periodo completo de observación, (23 noches), la gráfica en línea punteada representa el número de datos promediados para cada valor de seeing.

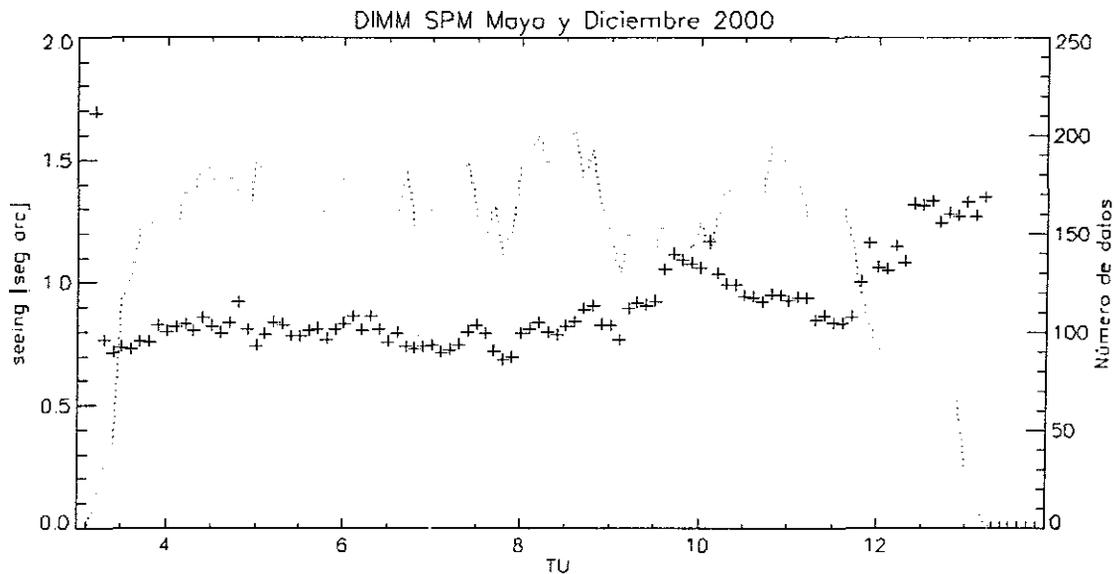


Fig. 6-9 Medianas de los valores de seeing (++++) obtenidos a lo largo de la campaña completa (23 noches), la línea punteada representa el número de datos considerados para obtener la mediana

De este análisis no podemos concluir que exista una tendencia temporal representativa del seeing durante la noche. Para obtener una estadística más completa que sea representativa de la tendencia del seeing a lo largo de la noche se requiere tener una mayor cantidad de datos, es decir, realizar campañas de observación que abarquen las diferentes estaciones del año y períodos más largos de observación.

6.3 Distribución log-normal

Para el principio de la técnica DIMM, se demuestra teóricamente que los valores del seeing siguen una distribución log-normal (cf. teoría óptica⁵). El histograma de los valores de seeing en la Fig. 6-10 presenta una simetría característica de una distribución log-normal al igual que la función de distribución acumulativa de la Fig. 6-11.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁵ Apéndice C

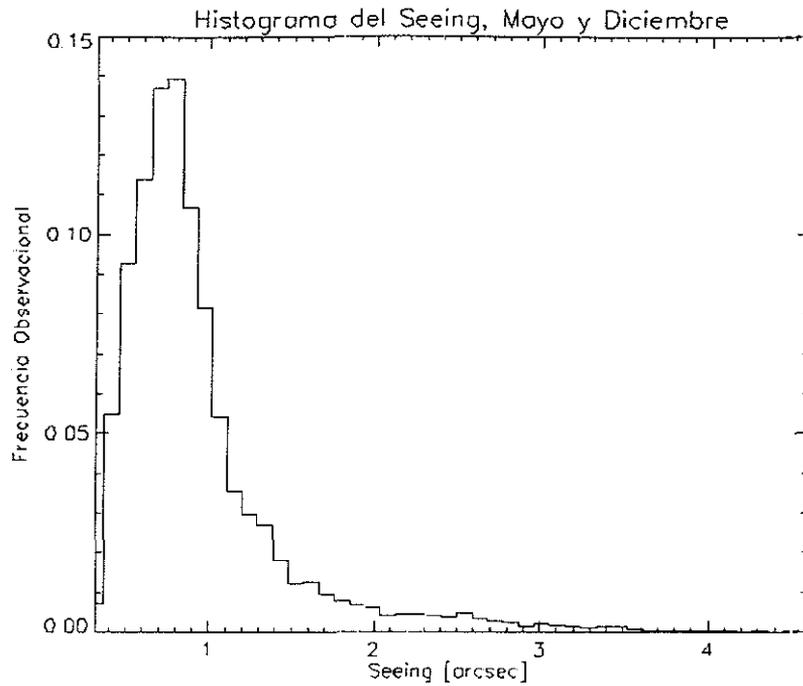


Fig 6-10 Histograma normalizado del seeing obtenido por el DIMM en el OAN - SPM en la campaña completa de Mayo y Diciembre del 2000

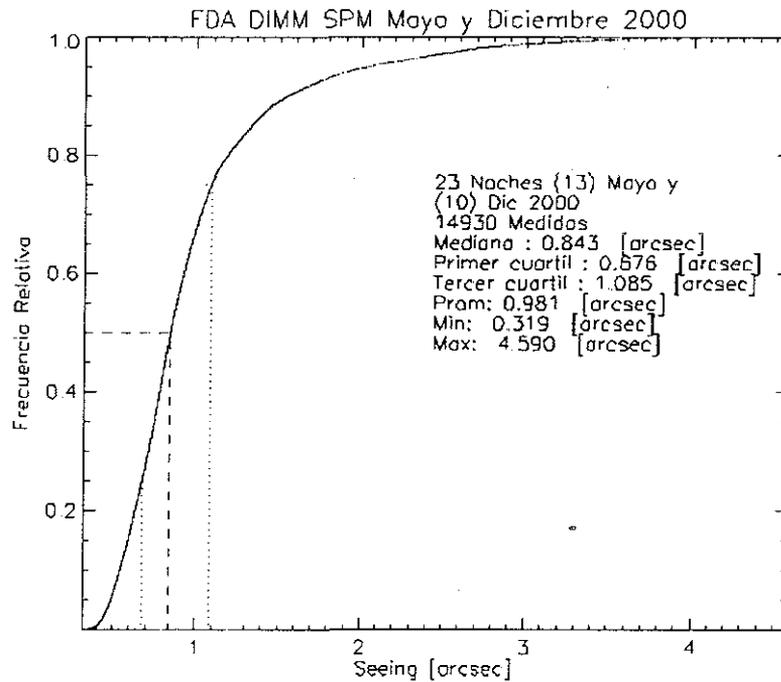


Fig 6-11 Función de distribución acumulativa para los valores del seeing obtenido por el DIMM en el OAN - SPM en la campaña de Mayo y Diciembre del 2000

Considerando que el seeing es descrito por una función de distribución log-normal de la forma:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\log(x) - \mu)^2\right) \quad (6.2)$$

con $x = \text{seeing}$, se calcula el logaritmo base diez para cada valor de seeing y así cualquier análisis estadístico posterior se efectúa como si fuese una distribución normal.

Los parámetros estadísticos descriptivos de la función (6.2) están dados por:

- Promedio del logaritmo del seeing $(\bar{\omega}) = -0.05$ [$\log(\text{seg arc})$],
- Varianza $(\sigma^2) = 0.03$ [$\log(\text{seg arc})^2$],
- Desviación estándar $(\sigma) = 0.18$ [$\log(\text{seg arc})$].

Por lo tanto la función de distribución log-normal obtenida es:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{0.18 \times \varepsilon \times \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{0.07}(\log(\varepsilon) + 0.05)^2\right) \quad (6.3)$$

para los valores reales de seeing determinados a través del DIMM.

Las medidas de log - seeing presentan la distribución normal de la Fig. 6-12 (histograma), a la cual se le ajusta una función normal Fig. 6-12 (línea continua) de la forma:

$$y = A_0 \exp\left[\frac{-z^2}{2}\right] \quad (6.4)$$

con $z = \frac{x - A_1}{A_2}$, en donde $A_0 = 974$, $A_1 = \mu = -0.093$ [$\log(\text{seg arc})$] y $A_2 = \sigma = 0.145$ [$\log(\text{seg arc})$], por lo tanto:

$$y = 974 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon + 0.093}{0.145}\right)^2\right] \quad (6.5)$$

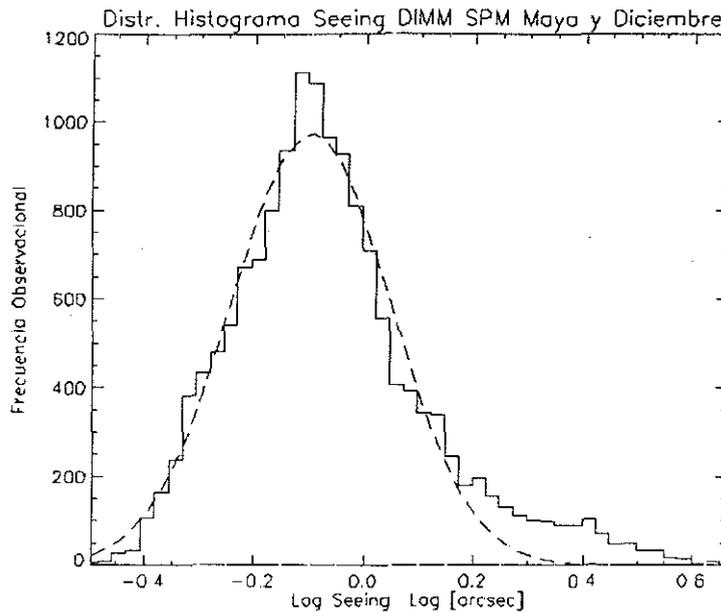


Fig. 6-12 Histograma del logaritmo del seeing para valores de log-seeing reales (función escalonada) e histograma ajustado de una distribución normal (línea punteada).

En la distribución de la Fig. 6-12 se observan dos funciones: Histograma del logaritmo de valores reales de seeing (función escalonada) y la función de distribución que mejor se ajusta al histograma, trazada con pequeña líneas. Al obtener la mejor función de distribución no se consideran el total de datos

Al aplicar la transformación log – seeing la función de distribución acumulativa obtenida se observa en Fig. 6-13, cuya distribución de los cuartiles es casi simétrica antes y después de la mediana. Ambas figuras corroboran la distribución log-normal presentada por el seeing.

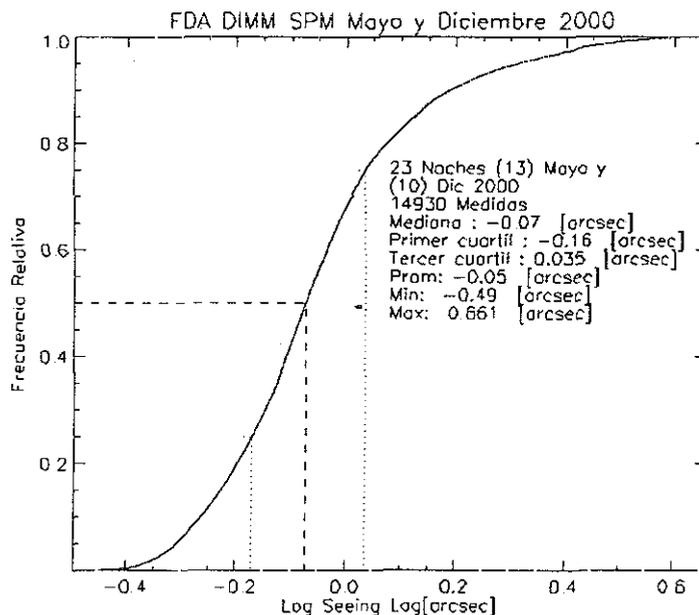


Fig. 6-13 Función de distribución acumulativa del Log-seeing obtenido por el DIMM en el OAN en Mayo y Diciembre del 2000.

6.4 Tiempo característico (τ)

Conocer el tiempo característico del seeing en un determinado sitio de observación es útil astronómicamente para: poder optimizar el tipo y tiempo de las observaciones, determinar los parámetros iniciales para programas específicos que requieran conocer este valor, así como contribuir a la información que se requiere para el diseño e implementación de instrumentos usados con los telescopios.

Sin embargo los estudios que se han efectuado en este campo son muy pocos, existiendo actualmente pocos métodos para obtener este tiempo característico del seeing, entre ellos: el Método de autocorrelación (Muñoz, Vernin y Varela [25]) y la determinación de la función fraccionaria (Racine [28]). Ambos métodos se basan en principios diferentes y son analizados a continuación.

6.4.1 Autocorrelación

Este método consiste en determinar el tiempo característico analizando el promedio de la autocorrelaciones normalizadas de las funciones centradas del seeing.

Muñoz-Vernin-Varela [25] proponen que la autocorrelación promedio de las autocorrelaciones normalizadas para cada función de seeing se determine a través de:

$$\langle C_\varepsilon(\Delta t) \rangle = \left\langle \frac{\langle \varepsilon(t) \varepsilon(t + \Delta t) \rangle_i - \langle \varepsilon \rangle_i^2}{\langle \varepsilon \rangle_i^2} \right\rangle \quad (6.6)$$

en donde el índice i se refiere a cada noche de observación.

Dado que se debe suponer que la función seeing es la superposición de funciones de tipo exponencial decreciente (6.7) su autocorrelación es exponencial decreciente de la forma (6.8).

$$\varepsilon_i(t) = \exp\left(\frac{-(t-t_i)}{\tau}\right) \quad (6.7)$$

para $t \geq t_i$ y 0 en cualquier otro caso,

$$\int \varepsilon_i(t) \varepsilon_i(t + \Delta t) dt = e^{-\Delta t/\tau} \quad (6.8)$$

Por lo tanto la función promedio de la autocorrelación sigue la función exponencial decreciente:

$$C_{\varepsilon}(\Delta t) = A \exp\left(\frac{-\Delta t}{\tau}\right) \quad (6.9)$$

en donde τ es el tiempo característico buscado.

Discusión

En este método existen tres puntos importantes cuyos resultados requieren ser discutidos:

- El seeing es la superposición de funciones decrecientes entonces la autocorrelación promedio es exponencial decreciente
- Ecuación de autocorrelación promedio propuesta por Muñoz-Vernin-Varela [25] [ec. (6.6)].
- Determinación del tiempo característico a través del ajuste de una función exponencial decreciente.

a) El seeing como resultante de la superposición de funciones decrecientes

Muñoz-Vernin-Varela [25] parten de la hipótesis de que la función seeing es la función resultante de la superposición de funciones exponenciales decrecientes, sin embargo, no se conoce demostración teórica al respecto. La Fig. 6-14 representa el seeing durante una noche de observación, 3 de Diciembre del 2000, en ella se observa que el comportamiento del seeing a lo largo del tiempo de observación es creciente y decreciente por intervalos, por lo tanto suponer que el seeing es la superposición de funciones exponenciales decrecientes (6.7) es parcialmente correcto. De hecho en secciones posteriores se analiza con detalle la autocorrelación de las funciones seeing y se observa que su comportamiento es casi lineal, lo cual no quiere decir que sea de tipo exponencial decreciente.

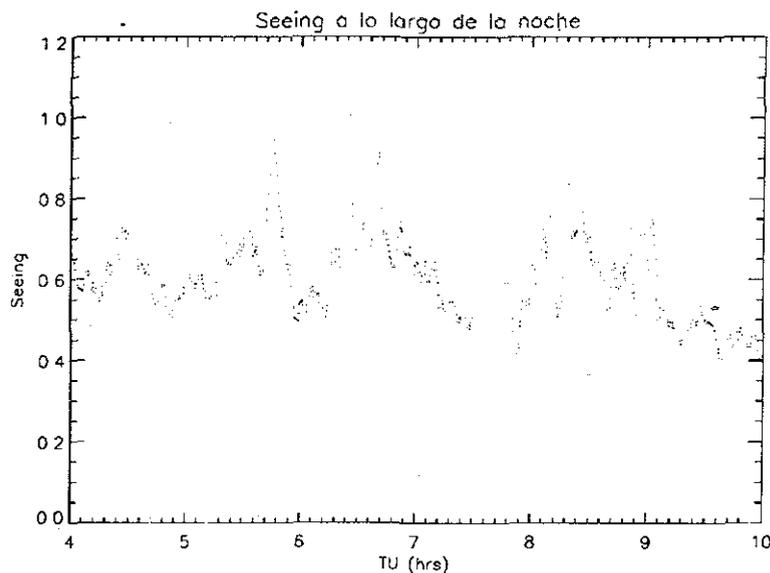


Fig 6-14 Seeing DIMM SPM noche del 3 de Diciembre del 2000

b) Ecuación de autocorrelación propuesta por Muñoz-Vernin-Varela.

El cálculo promedio de la autocorrelación a través de la ecuación (6.6) no entrega el promedio de autocorrelaciones normalizadas de funciones centradas. Para cada función, entrega la autocorrelación de una función centrada y dividida por el promedio de la función al cuadrado, lo cual implica un error en la normalización y por lo tanto el promedio de estas autocorrelaciones no está correctamente normalizado⁶.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

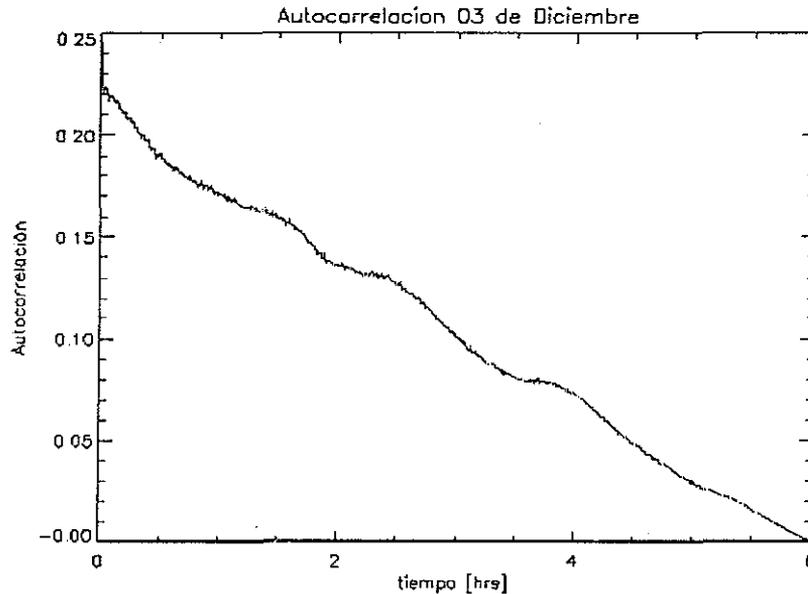


Fig. 6-15 Autocorrelación para un intervalo de 6 hrs calculada a través de la ecuación propuesta por Muñoz – Vernin – Varela, Noche de observación del 3 de Diciembre del 2000.

Partiendo de la definición de autocorrelación, se obtiene la ecuación de la autocorrelación promedio para las autocorrelaciones normalizadas de funciones centradas⁷:

$$\langle C_{\varepsilon}(\Delta t) \rangle = \left\langle \frac{\langle (\varepsilon_i(t) - \langle \varepsilon \rangle_i)(\varepsilon_i(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle_i) \rangle}{\langle (\varepsilon_i(t) - \langle \varepsilon \rangle_i)^2 \rangle} \right\rangle \quad (6.10)$$

Para aplicar el método propuesto por Muñoz – Vernin – Varela [25], se calcula la autocorrelación promedio a través de la ecuación (6.10).

La Fig. 6-16 representa la autocorrelación para la noche del 3 de Diciembre del 2000 obtenida a través de la ecuación (6.10). Al comparar la Fig. 6-15 y la Fig. 6-16 se observa que la primera presenta un máximo en 0.25 mientras que la segunda presenta un máximo en 1 como lo indica la definición de autocorrelación.

⁶ Ver Apéndice D

⁷ Apéndice D

Las figuras Fig. 6-17 y Fig. 6-18 representan las autocorrelaciones promedio para los meses de Mayo y Diciembre del 2000 respectivamente, considerando una ventana de análisis de 6 hrs. Finalmente la autocorrelación promedio para toda la campaña (Mayo y Diciembre) considerando una ventana de análisis de 6 hrs se representa en la Fig. 6-19.

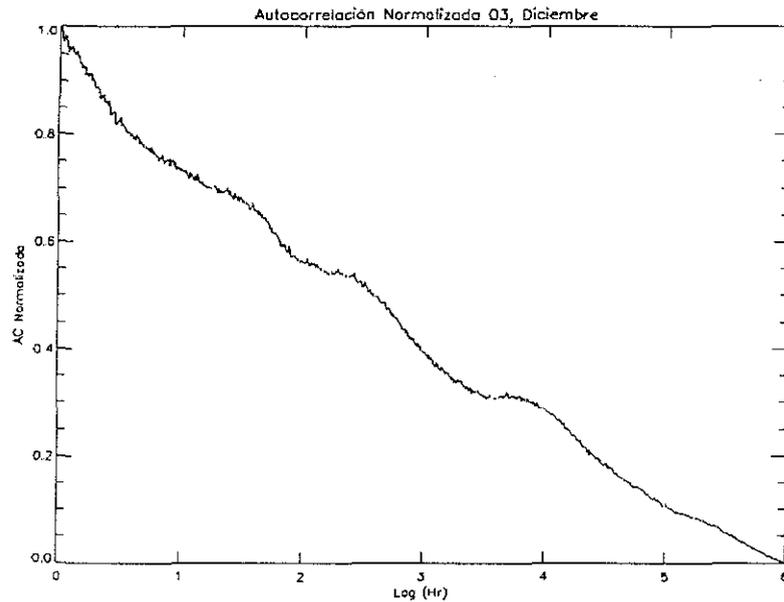


Fig 6-16 Autocorrelación del seeing de la noche de observación del 3 de Diciembre del 2000, calculada a través de la ecuación (6 10)

Autocorrelación promedio del mes de Mayo del 2000.

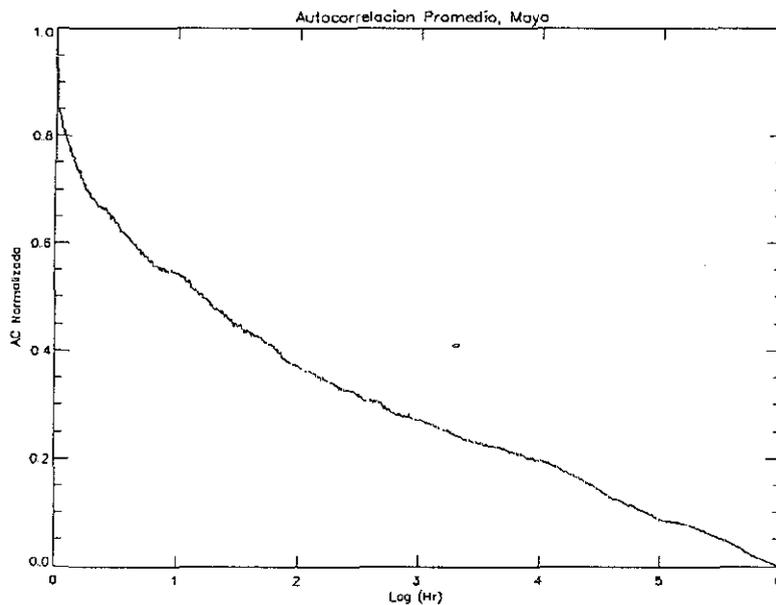


Fig 6-17 Autocorrelación promedio para los valores de seeing del mes de Mayo del 2000, la ventana de análisis es de 6 hrs

Autocorrelación promedio del mes de Diciembre del 2000.

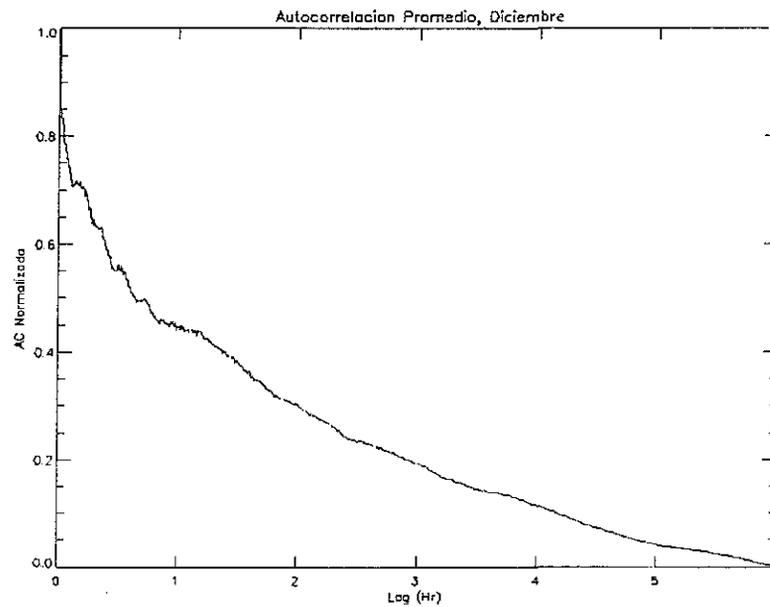


Fig 6-18 Autocorrelación promedio para los valores de seeing del mes de Diciembre del 2000 calculada a través de la ecuación (6 10) con una ventana de análisis de 6 hrs

Autocorrelación promedio de los meses de Mayo y Diciembre del 2000.

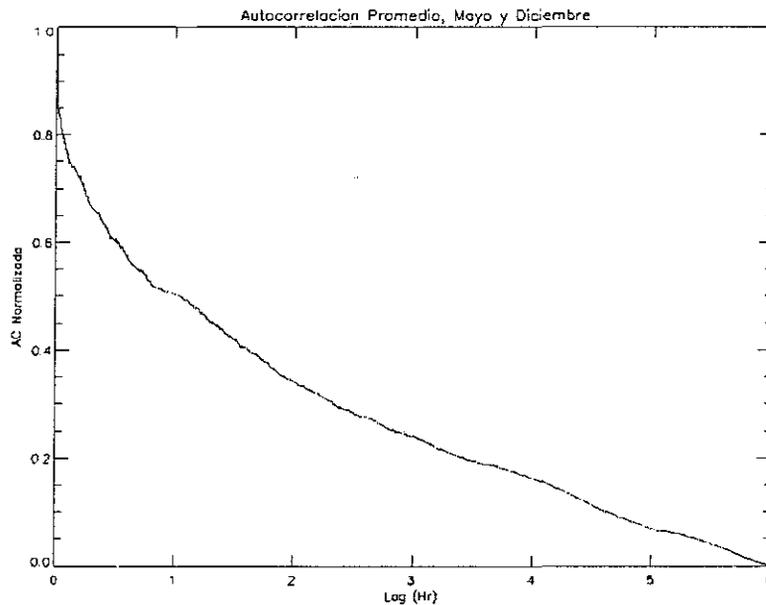


Fig 6-19 Autocorrelación promedio de la temporada de observación completa calculada a través de la ecuación (6 10) con una ventana de análisis de 6 hrs.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

c) *Determinación del tiempo característico (τ) a través del ajuste de una función exponencial decreciente.*

Por definición, el tiempo característico es aquel en el cual el seeing permanece casi uniforme y por lo tanto es independiente al tiempo de observación. Muñoz- Vernin-Varela [25] proponen determinarlo ajustando una función exponencial decreciente a la autocorrelación promedio. Sin embargo, el comportamiento de la autocorrelación depende de dos parámetros importantes:

1. La función descriptiva del seeing, y
2. La ventana de análisis.

De acuerdo a la función seeing se obtiene que el comportamiento de la autocorrelación para algunos casos puede ser casi lineal y en otros es no lineal, sin que en cualquier caso implique un comportamiento claramente exponencial decreciente.

Por ejemplo: En la Fig. 6-20 se observa el comportamiento del seeing durante 6 hrs, 4 de Diciembre del 2000, sus valores describen una función creciente y decreciente sin la presencia de tiempos muertos. Su función de autocorrelación esta representada en la Fig 6-21, en la cual se observa que es casi lineal, por lo tanto no presenta un comportamiento claramente exponencial decreciente. En cambio en la Fig 6-23 se observa la autocorrelación no lineal obtenida de la noche de observación del 17 de Mayo del 2000 [Fig 6-22], la cual contiene tiempos muertos.

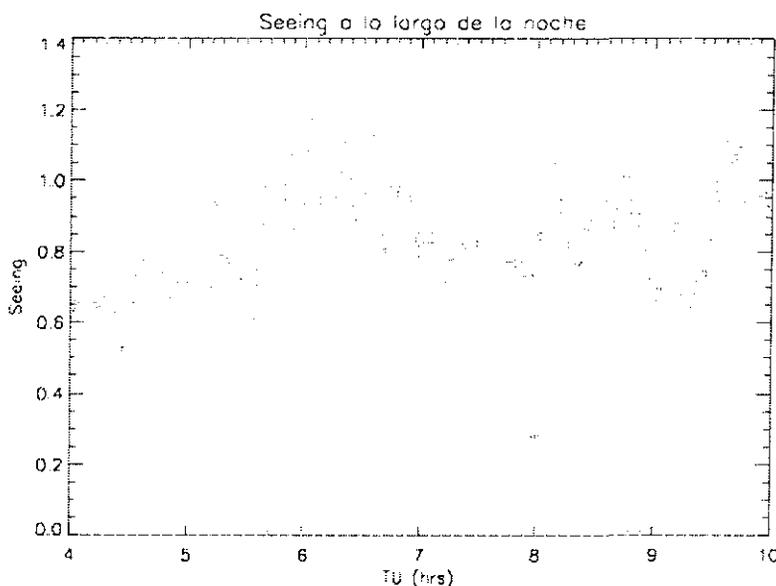


Fig. 6-20 Seeing obtenido por el DIMM durante la noche del 4 de Diciembre del 2000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

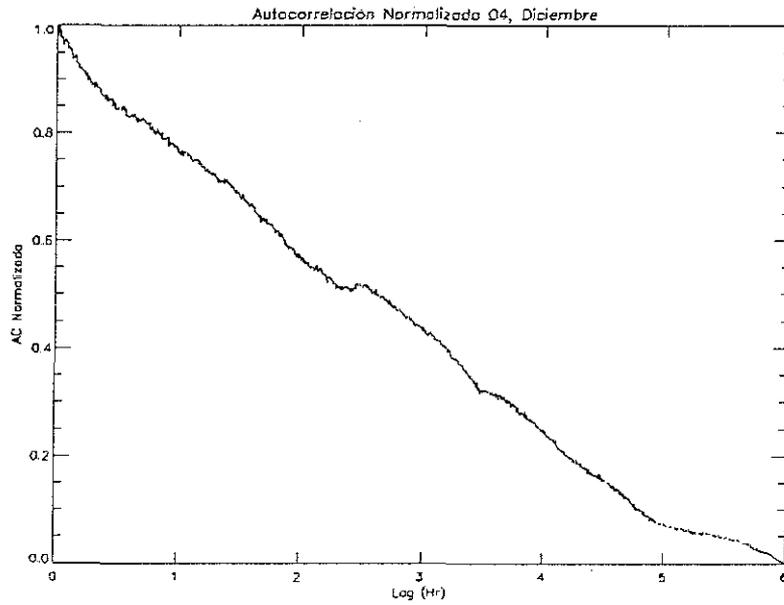


Fig 6-21 Autocorrelación de la noche del 4 de Diciembre del 2000, para un intervalo de tiempo de 6 hrs. Se observa que la autocorrelación es casi lineal

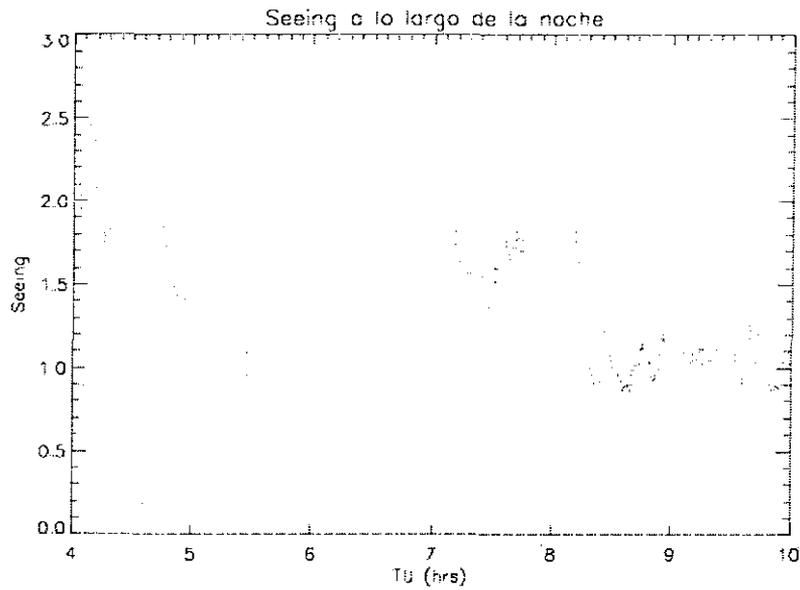


Fig 6-22 Seeing obtenido durante la noche del 17 de Mayo del 2000, en esta gráfica se observan valores de seeing altos e intervalos de tiempos muertos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

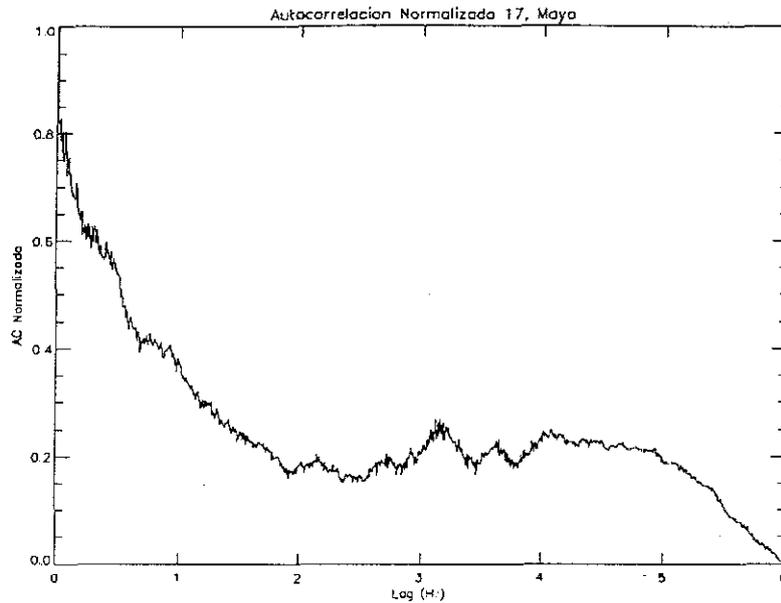


Fig 6-23 Autocorrelación de la noche del 17 de Mayo del 2000, para un intervalo de tiempo de 6 hrs. La autocorrelación es no lineal lo cual no implica que sea exponencial decreciente.

Por otro lado, el comportamiento de la autocorrelación al tomar distintas ventanas de análisis varía de acuerdo al tamaño de la ventana, por lo tanto, el tiempo característico dependerá de la ventana de análisis, porque proviene de una función exponencial decreciente que se le ajusta a la autocorrelación promedio.

En la Fig 6-24 se observa el comportamiento de la autocorrelación promedio para distintas ventanas de análisis (2, 4 y 6 hrs.), considerando el ajuste cuando la función exponencial decae en una razón de $2/e$ para las cuales se obtienen los siguientes tiempos característicos [Tabla 6-2]:

Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	1.10
4	1.75
6	2.55

Para el mes de Diciembre los tiempos característicos obtenidos con las mismas ventanas de análisis son [Tabla 6-3, Fig. 6-25]:

Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	1.00
4	1.95
6	2.40

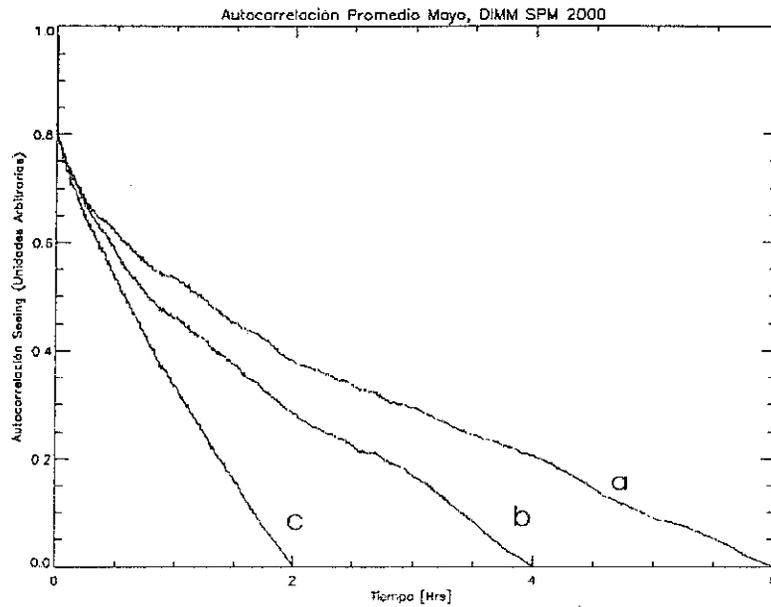


Fig 6-24 Autocorrelación promedio de Mayo del 2000 para diferentes intervalos de tiempo, DIMM SPM a) Intervalo de tiempo de 6 Hrs, b) Intervalo de tiempo de 4 hrs y c) Intervalo de tiempo de 2 hrs

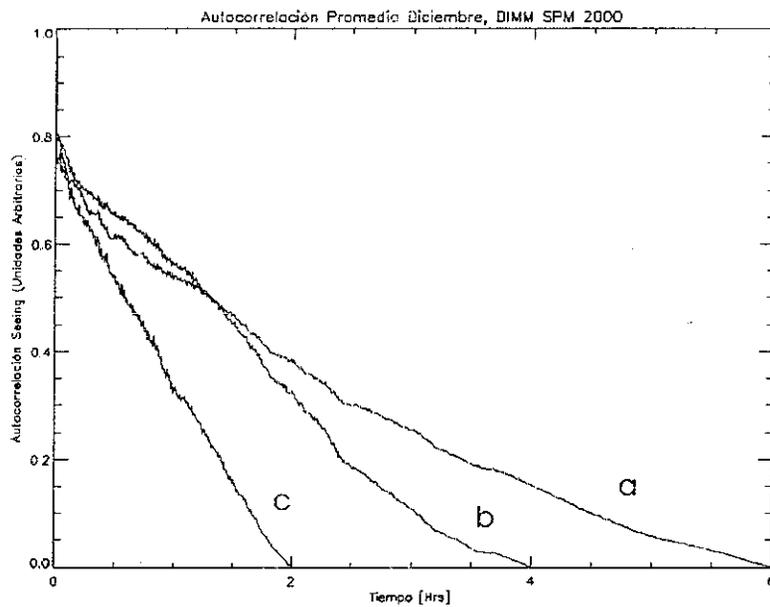


Fig 6-25 Autocorrelación promedio del mes de Diciembre del 2000 para diferentes intervalos de tiempo DIMM SPM a) Intervalo de tiempo de 6 Hrs b) Intervalo de tiempo de 4 hrs y c) Intervalo de tiempo de 2 hrs

En la Tabla 6-4 [Fig 6-26] se observan los tiempos característicos para la autocorrelación promedio de la campaña completa, en donde cada tiempo depende de la ventana de análisis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 6-4	
Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	0.75
4	1.80
6	2.10

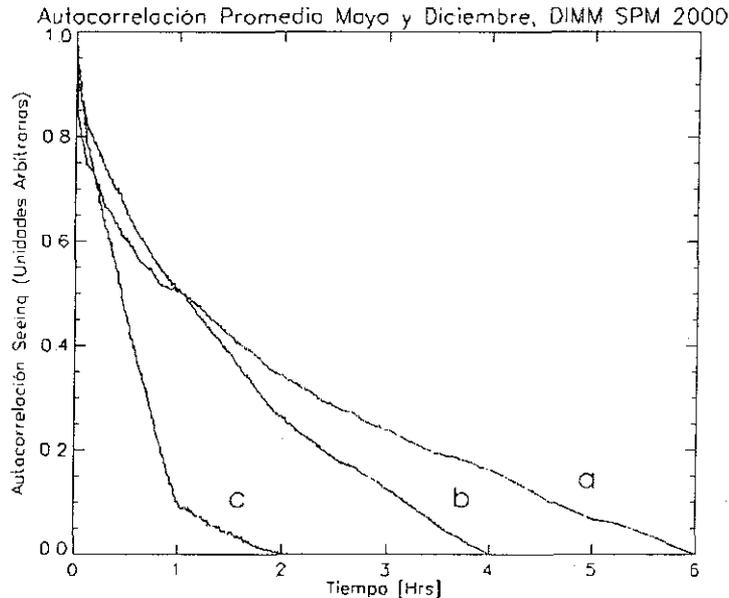


Fig 6-26 Autocorrelación promedio de la campaña completa (Mayo y Diciembre del 2000, SPM). Con ventanas de análisis de a) 6 hrs b) 4 hrs y c) 2 hrs

Conclusiones

Existen varias desventajas de este método:

- Suponer que la función descriptiva del seeing es la superposición de funciones exponenciales decrecientes es una descripción parcial del mismo, ya que no se consideran los intervalos en donde la función es creciente.
- Considerando que el seeing es superposición de funciones exponenciales decrecientes se debe obtener en su autocorrelación una función exponencial decreciente. Sin embargo la función de autocorrelación obtenida para el seeing es no lineal lo cual no implica que sea claramente exponencial decreciente.
- La función exponencial decreciente que se ajusta al comportamiento de la autocorrelación no es independiente de la ventana de análisis tomada y por lo tanto el tiempo de correlación que se obtiene también es dependiente al intervalo de tiempo de análisis [Tabla 6-2, Tabla 6-3, Tabla 6-4].
- El tiempo característico se encuentra en intervalos que van de 0.74 hrs a 2.55 hrs por lo que no se puede dar una conclusión.

6.4.2 Fluctuaciones temporales del seeing atmosférico determinado a través de una función fraccionaria.

Para examinar la estructura temporal del seeing, Racine propone [28] una función (*función fraccionaria*) $0 \leq f(\Delta t) \leq 1$, la cual mide los cambios fraccionarios del seeing en un intervalo de tiempo Δt y esta definida por:

$$f(\Delta t) \equiv \frac{|\varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon(t)|}{\varepsilon(t + \Delta t) + \varepsilon(t)} \quad (6.11)$$

en donde la razón del seeing para este intervalo está dado por:

$$X(\Delta t) \equiv \left[\frac{\varepsilon(t + \Delta t)}{\varepsilon(t)} \right]^{\text{sign}[\varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon(t)]} = \frac{1 + f(\Delta t)}{1 - f(\Delta t)} \quad (6.12)$$

Si la distribución de seeing presenta dispersión logarítmica σ y un tiempo de correlación finito, entonces el valor promedio de la función fraccionaria $\langle f(\Delta t) \rangle$ debe crecer desde cero $\langle f(0) \rangle = 0$ hasta un valor saturado $\langle f(\infty) \rangle$.

Dado que el promedio del radio del seeing para un tiempo en el infinito $\langle X(\infty) \rangle$, esta determinado por la relación:

$$\langle X(\infty) \rangle = 10^\alpha, \quad \text{con } \alpha = (0.68 \cdot \sqrt{2}\sigma), \quad (6.13)$$

a través de las ecuaciones (6.13) y (6.12), se determina $\langle f(\infty) \rangle$.

Por lo tanto el comportamiento de la función fraccionaria (6.11) debe estar descrita por una relación de la forma:

$$\langle f(\Delta t) \rangle = \langle f(\infty) \rangle \cdot [1 - \exp(-\Delta t / \tau)^\gamma] \quad (6.14)$$

en donde τ es el tiempo característico y γ la velocidad a la que el seeing se estabiliza

Discusión

Este método conlleva a la discusión de los siguientes puntos:

- Convergencia de la función $f(\Delta t)$ y ajuste de una función exponencial decreciente.
- Obtención del tiempo característico a través de los parámetros $\langle X(\infty) \rangle, \sigma, \langle f(\Delta t) \rangle, \langle f(\infty) \rangle, \gamma$ y la ecuación (6.14).

a) Convergencia de la función $f(\Delta t)$ y ajuste de una función exponencial decreciente

Debido a que el tiempo característico es independiente de la ventana de análisis, se determina la independencia de la función fraccionaria con respecto a la ventana de análisis, para ello es calculada $f(\Delta t)$ [ec. (6.11)] para diferentes ventanas de análisis: 2 hrs, 4 hrs, 6 hrs y 12 hrs [Fig. 6-27].

En la Fig. 6-27 se observa que el eje de tiempo va de 0 a 1200 lo cual quiere decir que se tienen 1200 intervalos de tiempo en donde cada intervalo es de 30 s. por lo tanto la escala de tiempo va de 0 a 10 hrs, sin embargo el análisis fue hecho para un tiempo máximo de 14 hrs. La escala de tiempo sólo se grafica para 10 hrs porque en las últimas 2 horas no existen valores de seeing que ayuden a determinar el valor de la ecuación (6.11).

Analizando la Fig. 6-27 se observa que las distintas gráficas para cada ventana se presentan problemas a la frontera, es decir, para los intervalos $\Delta t \cong$ Tamaño de la ventana de análisis, los valores $f(\Delta t)$ que son promediados son pocos y por lo tanto tienen mucho peso en la gráfica. Sin embargo y dado que al ampliar la ventana de análisis estos problemas de frontera son eliminados podemos olvidarnos de estos valores.

La función $\langle f(\Delta t) \rangle$ para cualquier ventana de análisis presenta siempre el mismo comportamiento, por lo tanto es independiente al tiempo de análisis [Fig. 6-27] y representa la principal ventaja con respecto al método anterior.

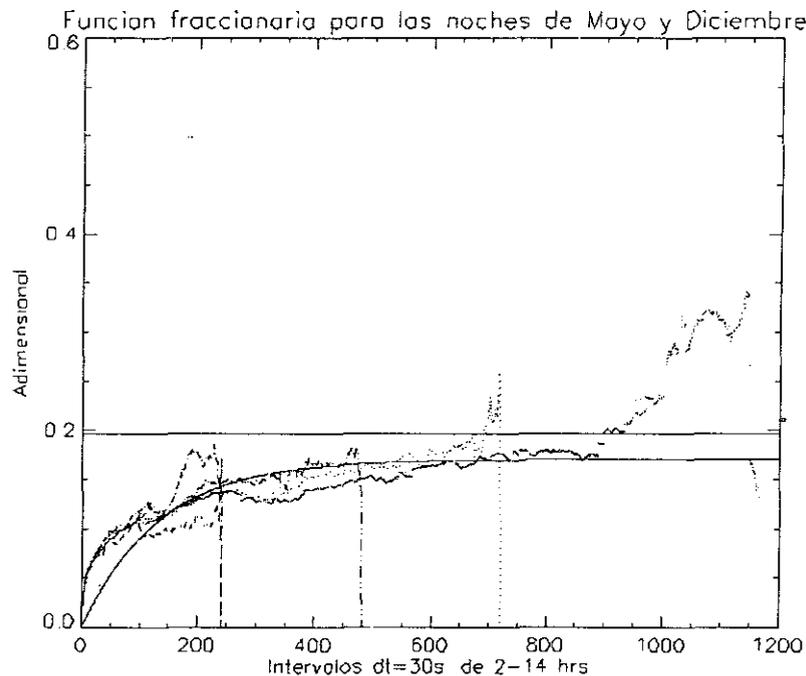


Fig. 6-27 Función fraccionaria para diferentes intervalos de tiempo (2-14 hrs sin considerar el intervalo de 12 a 14 hrs porque no existen valores para $\langle f(\Delta t) \rangle$), DIMM SPM Mayo y Diciembre del 2000

A las funciones de la Fig. 6-27 se les ajusta una función exponencial creciente (línea continua Fig. 6-27) descrita por la ecuación:

$$\langle f(\Delta t) \rangle = b(0) \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{b(1) * 0.35}\right) * 0.7 \right] \quad (6.15)$$

$$b = [0.17, 50.0]$$

en donde el tiempo característico esta dado por:

$$\tau = 1.19 \text{ hrs}, \quad (6.16)$$

es decir, es el tiempo en el cual las variaciones del seeing son casi nulas.

b) Obtención del tiempo característico a través de los parámetros $\langle X(\infty) \rangle, \sigma, \langle f(\Delta t) \rangle, \langle f(\infty) \rangle, \gamma$ y la ecuación (6.14).

Dado que la función fraccionaria $\langle f(\Delta t) \rangle$ [Fig. 6-27] cumple con tener un valor inicial igual a cero y crece hasta un valor saturado para $\langle f(\infty) \rangle$ entonces, la función $\langle X(\Delta t) \rangle$ es una función que presenta una saturación en infinito, por lo tanto puede ser descrita a través de la ecuación (6.13) y al graficar sus valores se obtiene la gráfica de la Fig. 6-28.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

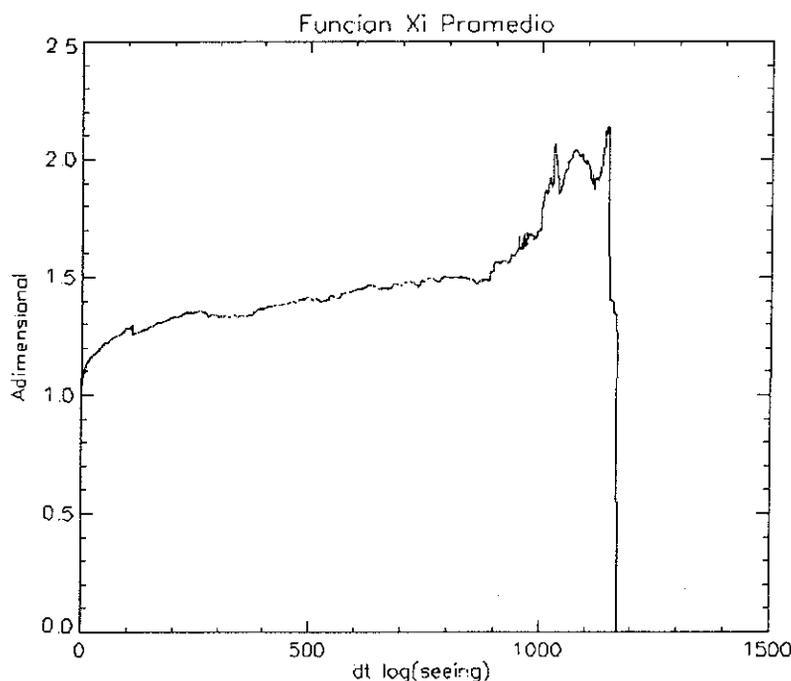


Fig. 6-28 Función $\langle X(\Delta t) \rangle$ para un intervalo de tiempo de 2-14 hrs tomando la información adquirida por el DIMM de la campaña completa, SPM 2000.

Es importante mencionar que se eliminan los problemas de frontera que también presenta esta función, debido a que el número de valores promediados es muy bajo comparado al resto de la función y por lo tanto presentan un gran peso sobre el promedio de la función.

Se calcula estadísticamente la dispersión de los valores de seeing, obteniendo $\sigma = 0.18$, sustituyendo este valor en (6.13) nos da un valor de $\langle X(\infty) \rangle = 1.49$, el cual al ser sustituido en la ecuación (6.12) determina $\langle f(\infty) \rangle = 0.20$ y $\gamma = 1$, por lo tanto:

$$\langle f(\Delta t) \rangle = 0.16 \left[1 - \exp\left(\frac{-0.38 * \Delta t}{50}\right) \right] \quad (6.17)$$

De esta ecuación [ec (6.17)] se tiene que el tiempo característico esta dado por:

$$\tau = \left(\frac{0.38}{50}\right)^{-1} \quad (6.18)$$

en donde este valor esta en intervalos Δt de tiempo, por lo tanto al efectuar la conversión:

$$\tau = \left(\frac{0.38}{50}\right)^{-1} * \Delta t = 131.58 * 30s = 3947s = 1.1hrs \quad (6.19)$$

Conclusiones:

A través de este método se obtiene el tiempo característico independiente a la ventana de análisis con valores entre $\tau = [1.1, 1.19]hrs$, de donde se puede concluir que el tiempo característico es de $\tau = 1.1 hrs$.

6.4.3 Función de estructura

La definición de función de estructura para el seeing:

$$D_{\Delta}(\varepsilon) = \left\langle \left| \varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon(t) \right|^2 \right\rangle \quad (6.20)$$

la cual es muy similar a la función fraccionaria. Sin embargo la función de estructura cumple con la relación:

$$D_{\Delta}(t) = 2 \left[B_{\Delta}(0) - B_{\Delta}(t) \right] \leq 2\sigma^2 \quad (6.21)$$

con

$$B_{\Delta}(\Delta t) = \langle \varepsilon(t) \varepsilon(t + \Delta t) \rangle \quad (6.22)$$

y σ^2 la varianza de los valores de seeing, ($\sigma^2 = 0.26$)

De la ecuación (6.21) se observa que la función de estructura es una función acotada, por lo tanto presenta un límite para $\langle D_{\Delta}(\infty) \rangle \leq 2\sigma^2$, Fig. 6-29. En la Fig. 6-29 el límite está marcado con una línea continua, sin embargo al graficar la función de estructura se observa los valores que la describen son menores al valor de saturación.

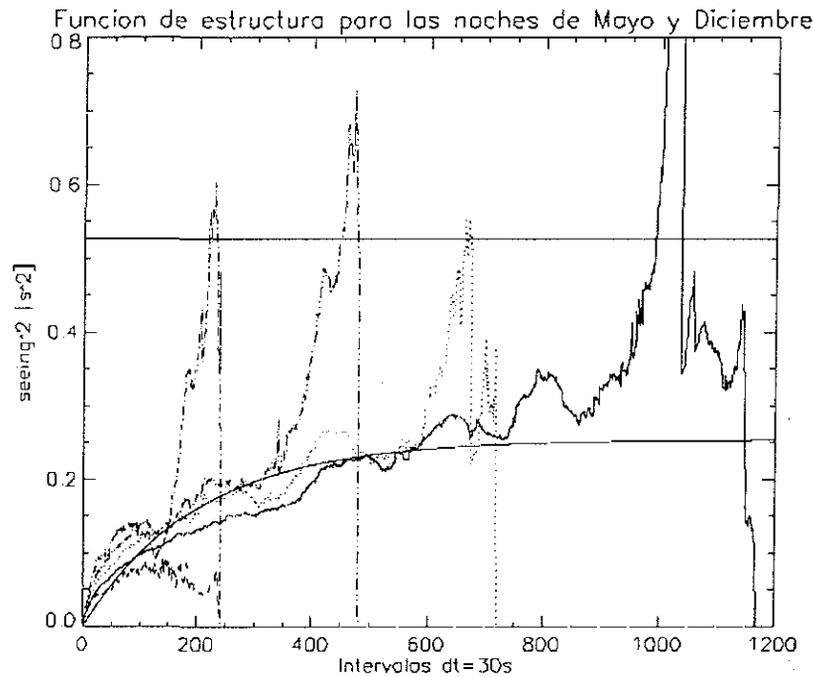


Fig 6-29 Función de estructura para diferentes intervalos de tiempo de 2, 4 6, 24 hrs, DIMM SPM Mayo y Diciembre del 2000

La función de estructura para diversos intervalos de tiempo presenta los mismos problemas de frontera que la función fraccionaria determinada por Racine [28] [ec. (6.11)], sin embargo como se observa en la Fig. 6-29 los problemas de frontera pueden ser despreciados y a la función de estructura se le puede ajustar una función exponencial que no es dependiente del intervalo de tiempo. La función exponencial ajustada tiene la forma:

$$\langle D(\Delta t) \rangle = 0.254 \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{140}\right) \right] \quad (6.23)$$

en donde $\tau = 200$ intervalos de tiempo, por lo tanto:

$$\tau = 140 * \Delta t = 140 * 30s = 4200s = 1.17hrs \quad (6.24)$$



6.4.4 Conclusiones del Tiempo característico:

A través de los distintos métodos se obtienen los siguientes tiempos característicos.

Autocorrelación

Mayo 2000

Tabla 6-2	
Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	1.10
4	1.75
6	2.55

Diciembre 2000

Tabla 6-3	
Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	1.00
4	1.95
6	2.40

Mayo y Diciembre del 2000

Tabla 6-4	
Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	0.75
4	1.80
6	2.10

Sin embargo, por este método no es posible determinar un tiempo característico independiente de la ventana de análisis.

Fluctuaciones temporales del seeing atmosférico determinado a través de una función fraccionaria.

Tabla 6-5	
Función	Tiempo característico (τ) Hrs.
$\langle f(\Delta t) \rangle$ ajustada	1.19
$\langle f(\Delta t) \rangle$ determinada [ec.(6.17)]	1.10

Cada tiempo característico obtenido es independiente de la ventana de análisis y por lo tanto el tiempo característico promedio de $\tau = 1.15hrs$.

Función de estructura

Tabla 6-6	
Función	Tiempo característico (τ) Hrs.
$\langle D(\Delta t) \rangle$	1.17

Este tiempo característico también es independiente de la ventana de análisis, por lo tanto $\tau = 1.17hrs$

Los programas generados para el calculo de cada una de las funciones se encuentran en el Apéndice B

6.5 Razón de energía turbulenta

Para determinar la contribución de la capa superficial a la degradación total del seeing, se define la Razón de Energía Turbulenta (REI, o Turbulent Energy Ratio TER) como la relación entre las energías turbulentas obtenidas de las capas de 2.3 m a 15 m y de 2.3 a infinito

$$REI = \frac{\int_{2.3m}^{15m} C_N^2(h) dh}{\int_{2.3m}^{+\infty} C_N^2(h) dh} \quad (6.25)$$

El coeficiente $\int_{2.3m}^{+\infty} C_N^2(h) dh$ proviene de los datos adquiridos por el DIMM y el factor

$\int_{2.3m}^{15m} C_N^2(h) dh$ de los datos adquiridos por los sensores de temperatura microdiferenciales.

Para la determinación de la razón de energía turbulenta de la campaña completa de observación se consideraron las siguientes noches:

Tabla 6-7	
Mayo	Diciembre
12/05/2000	07/12/2000
13/05/2000	08/12/2000
14/05/2000	
15/05/2000	
17/05/2000	
18/05/2000	
19/05/2000	
20/05/2000	

La RET promedio para toda la campaña es de un 10.55 %, es decir la capa superficial contribuye con un 10 % del seeing atmosférico total, sin embargo al observar la Fig. 6-30 la mayoría de valores de la RET se encuentran por debajo del 10 %. La Fig 6-30 es una gráfica de la evolución del RET promedio a lo largo de la noche para la campaña completa

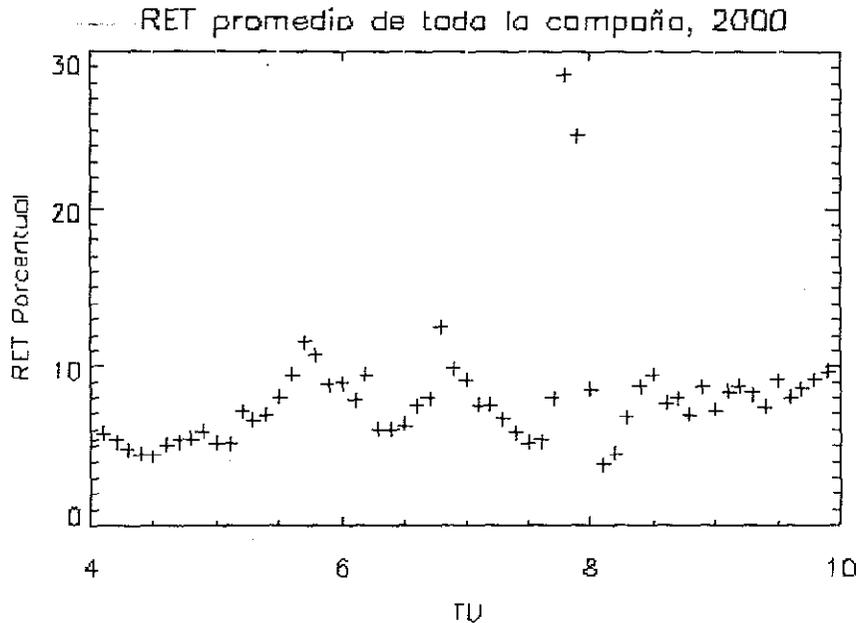


Fig 6-30 Razón de energía turbulenta promedio, considerando 10 noches de adquisición de la campaña completa.

Al efectuar un análisis noche a noche del promedio del RET, se obtienen valores entre 0.94 % y 33 %, lo cual representa un gran intervalo de variación global para cada noche

Tabla 6-8		
Fecha	RET	RET (%)
12/05/2000	0.14	13.75
13/05/2000	0.09	9.07
14/05/2000	0.08	8.33
15/05/2000	0.08	8.13
17/05/2000	0.04	4.20
18/05/2000	0.13	12.73
19/05/2000	0.01	0.94
20/05/2000	0.03	2.93
07/12/2000	0.33	33.00
08/12/2000	0.12	12.41

La evolución de la razón de la energía turbulenta a lo largo de la noche se considera tomando intervalos de 6 minutos, en las siguientes gráficas se observa que su valor a lo

largo de la noche es casi constante, existiendo noches en donde la contribución al seeing total debido a la capa superficial es casi nula [Fig. 6-31], en la mayoría de las noches la contribución al seeing total es de un 10 % [Fig. 6-32], sin embargo se observa que existe una noche en donde esta contribución llega a ser hasta del 33 % [Fig. 6-33].

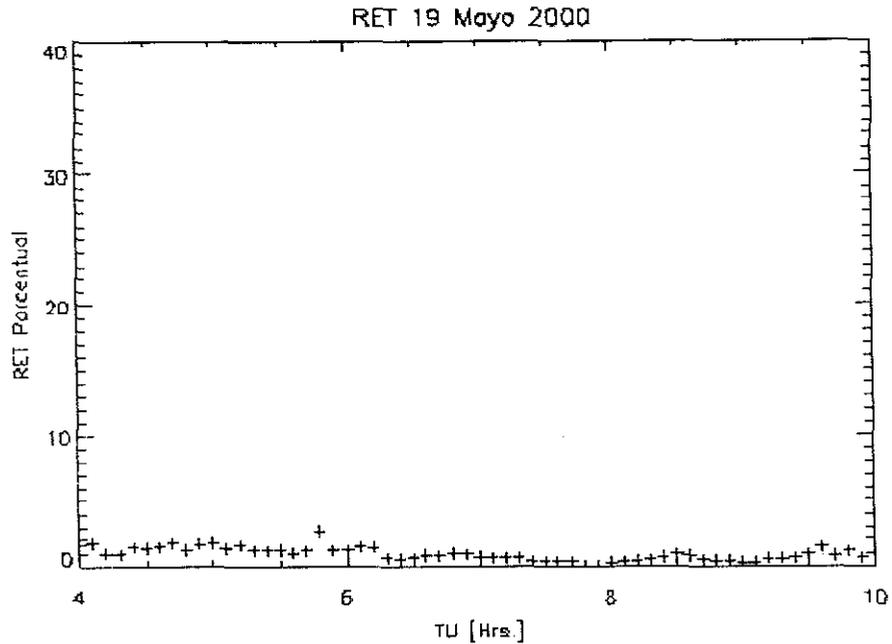


Fig 6-31 Evolución de la razón de energía turbulenta para la noche del 19 de Mayo. Contribución casi nula

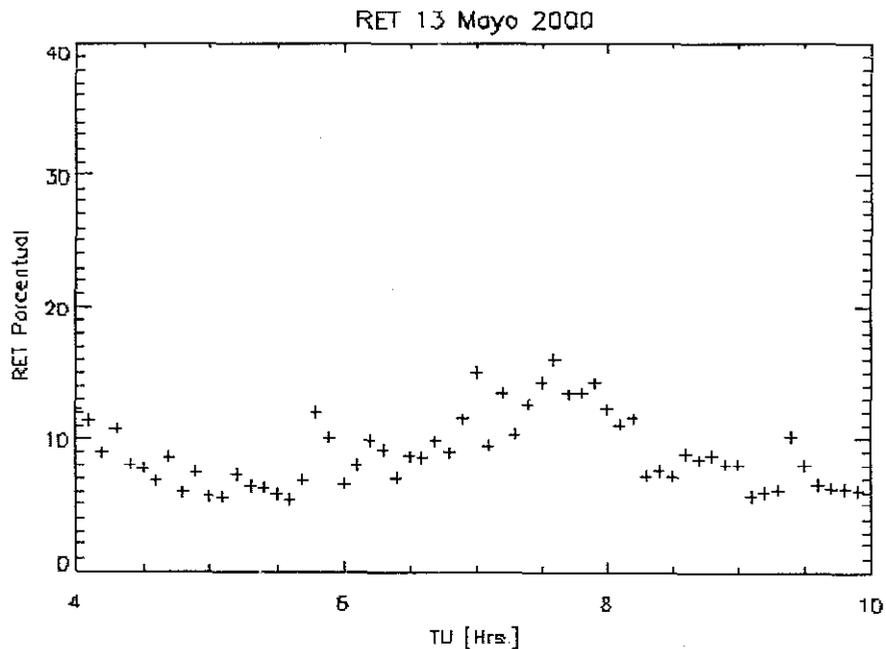


Fig 6-32 Evolución temporal de la RET en donde la contribución al seeing total es de un promedio del 10 %.

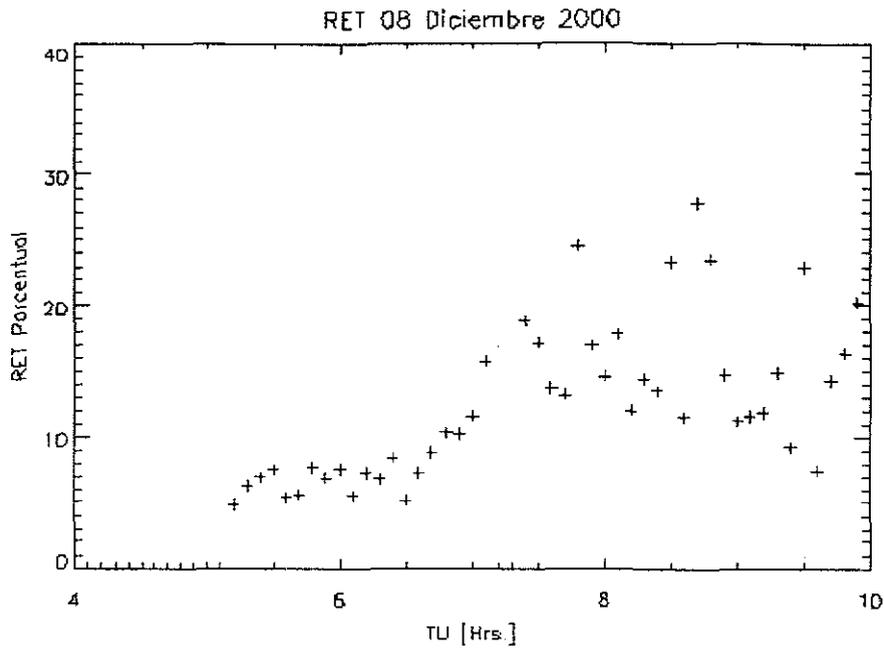


Fig 6-33 La contribución al seeing total a lo largo de esta noche es muy alto entre un 10 y un 33 %

6.6 Degradación del seeing

Otra medida que ayuda a cuantificar los efectos de la turbulencia producida por la capa superficial la llamada *degradación del seeing*, la cual está determinada por la relación:

$$\text{Degradación del seeing} = \left[1 - (1 - RET)^{0.6} \right] \quad (6.26)$$

La degradación promedio del seeing debida a la capa superficial que se ha obtenido a lo largo de esta campaña es de un 6.47 %, lo cual indica que su contribución a la degradación del seeing total es casi nula

La evolución a lo largo de la noche de la degradación del seeing para la campaña completa se observa en la Fig 6-34, en la cual se confirma que el porcentaje de contribución a la degradación se encuentra alrededor del 6.5%

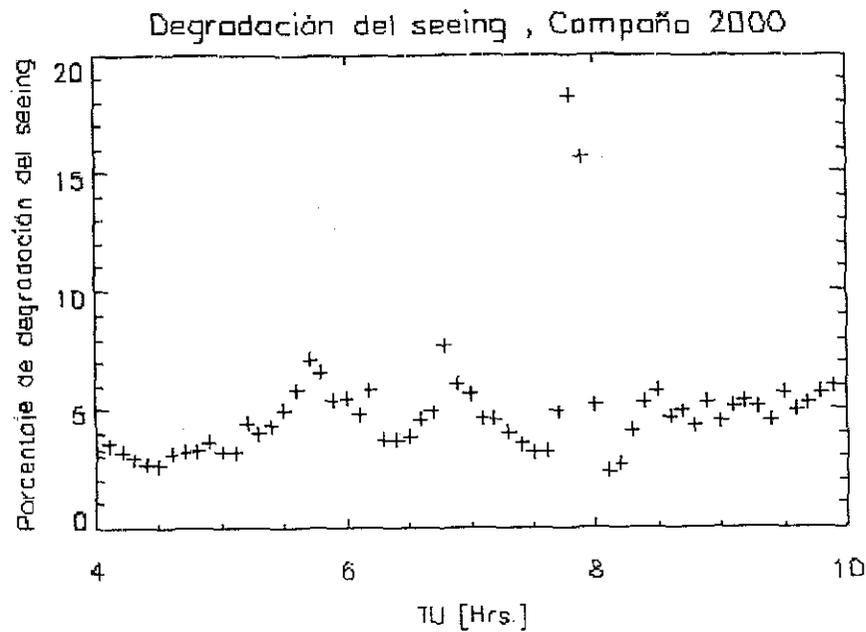


Fig. 6-34 Evolución promedio temporal de la degradación del seeing a lo largo de la campaña.

El porcentaje de degradación del seeing para cada noche es:

Fecha	Degradación del seeing	Degradación del seeing [%]
12/05/2000	0.0849	8.49
13/05/2000	0.0555	5.55
14/05/2000	0.0509	5.09
15/05/2000	0.0496	4.96
17/05/2000	0.0254	2.54
18/05/2000	0.0784	7.84
19/05/2000	0.0056	0.56
20/05/2000	0.0177	1.77
07/12/2000	0.2136	21.36
08/12/2000	0.0764	7.64

Degradación del seeing para cada noche a lo largo del tiempo entre 4 y 10 hrs., tiempo universal. Si la noche presenta una baja RET entonces presenta un bajo valor para la contribución de la degradación del seeing [Fig 6-35], si presenta un valor casi constante igualmente su contribución en la degradación [Fig 6-36] y si la contribución al seeing es muy variable, de igual forma la contribución a la degradación del seeing [Fig 6-37]

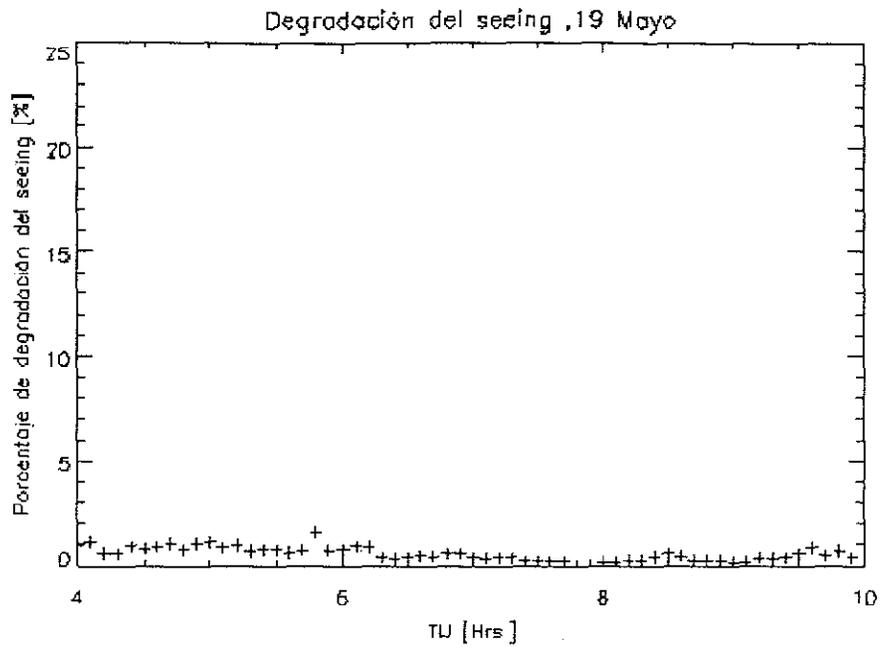


Fig 6-35 Bajo porcentaje de contribución a la degradación del seeing.

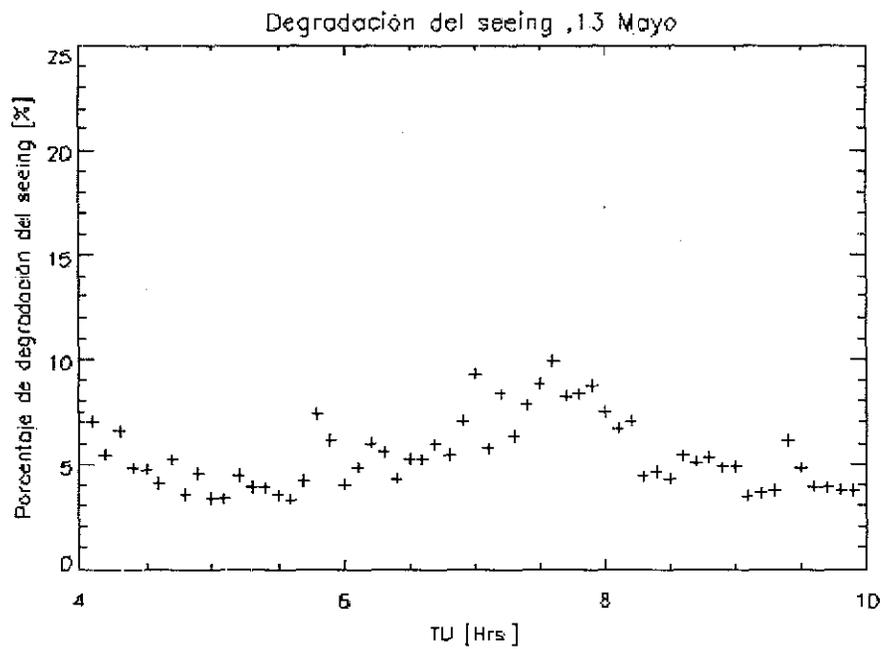


Fig. 6-36 Evolución promedio en la degradación del seeing

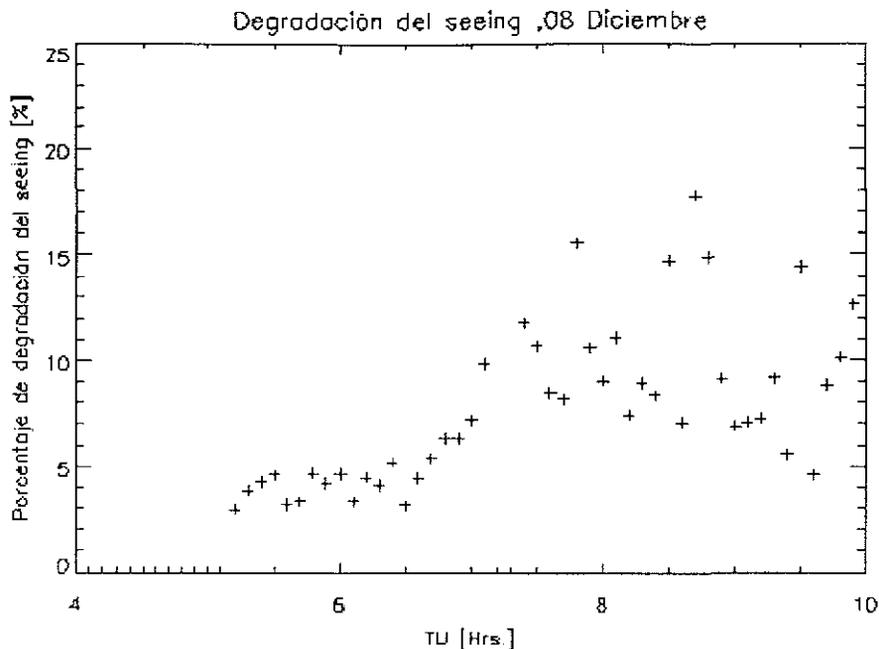


Fig. 6-37 Noche en la cual se presenta la máxima contribución a la degradación del seeing

En el histograma de la degradación del seeing [Fig 6-38] se observa que la mediana se encuentra entre un 4% y 5 %.

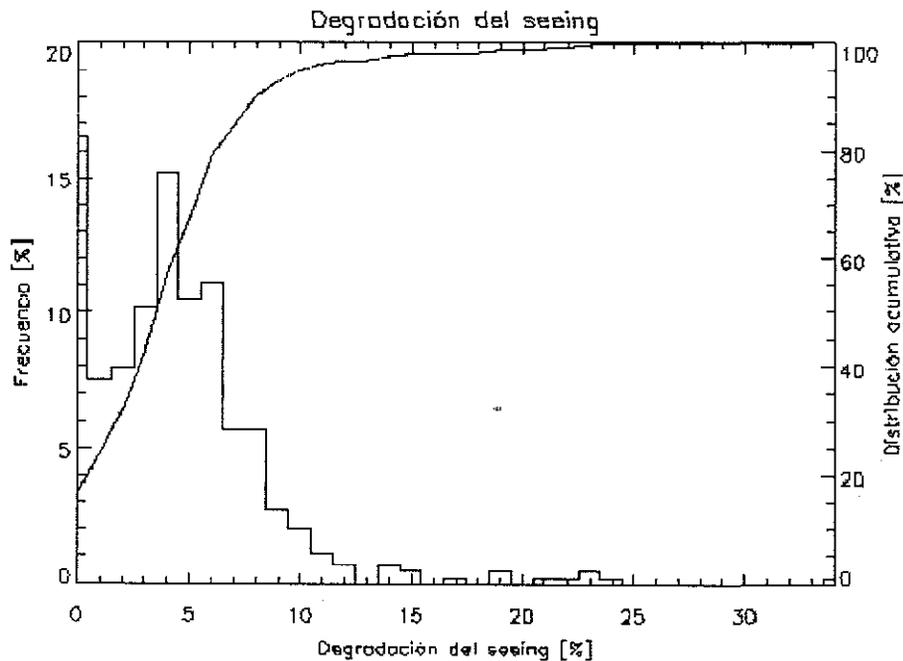


Fig. 6-38 Histograma del comportamiento de la degradación del seeing debido a la capa superficial

Capítulo 7 Conclusiones y perspectivas

El estudio de la capa superficial realizado durante la campaña intensiva de los meses de Mayo y Diciembre del 2000 en el sitio del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, B.C. ha ayudado a proponer un método alternativo para la obtención del tiempo en el cual el seeing casi no cambia (tiempo característico), su obtención y corroboración a través de otros métodos, así como la obtención de otros resultados útiles en el estudio de la turbulencia atmosférica óptica para este sitio.

Constante de estructura del índice de refracción en función de la altura y del tiempo: $C_N^2(h,t)$

- Los análisis realizados de los valores adquiridos de $C_N^2(h,t)$ a través de los sensores de temperatura microdiferenciales indican que presenta un comportamiento en la capa superficial predominantemente normal, es decir conforme se asciende en altura el valor del $C_N^2(h,t)$ decrece. Sin embargo no excluye casos de comportamiento totalmente invertido o en donde su comportamiento a lo largo del 70 % de la observación es normal, invirtiéndose al final de la noche. Esta inversión coincide con el comienzo del amanecer que es el periodo de tiempo en el cual se acentúan los cambios térmicos, siendo esta una posible explicación.
- De los valores de $C_N^2(h,t)$ obtenidos se determinó que el valor de seeing promedio para la capa superficial, (de 2.3 m a 15 m), es de 0.07 segundos de arco

Seeing

De los datos adquiridos para el seeing total que comprende la capa superficial, la capa límite y la atmósfera libre se obtuvieron los siguientes resultados:

- El comportamiento del seeing a lo largo de la noche no presenta una tendencia temporal definida, es decir no se observa ni un crecimiento ni un decrecimiento específico y constante a lo largo de la campaña de observación, sin embargo si se efectúa un monitoreo constante a lo largo del año y durante algunos años se podría determinar si presenta una tendencia o es casi uniforme siempre
- Los valores adquiridos de seeing presentan una distribución logarítmica normal, con las siguientes características:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALDÁ
DE LA BIBLIOTECA

Variable	Valores [seg. arc]
Promedio $\langle \varepsilon \rangle$	0.98
Mediana $\mu(\varepsilon)$	0.84
Mínimo de ε	0.31
Máximo de ε	4.6
Desviación estandar σ	0.18

- Una de las características fundamentales determinada en este trabajo fue el tiempo característico del seeing. Los estudios que se han hecho en este campo han sido pocos, y en este trabajo se estudiaron las ventajas y desventajas de tres métodos propuestos [Tiempo característico (τ), 6.4], obteniendo las siguientes conclusiones:

Autocorrelación (Muñoz, Vernin y Varela) [25]

El tiempo característico determinado se encuentra en función del tamaño de la ventana de análisis:

Tiempo característico promedio de la campaña de observación OAN-SPM, 2000	
Ventana de análisis [Hrs]	Tiempo característico [Hrs]
2	0.75
4	1.80
6	2.10

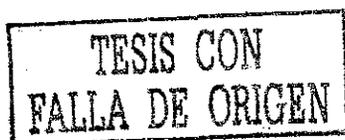
Sin embargo y debido a que el tiempo característico buscado debe ser independiente del intervalo de horas de las cuales esté comprendida la ventana de análisis, este método no resulta concluyente.

Determinación de la función fraccionaria (Racine)[28]

Este método presenta la gran ventaja de ser independiente del intervalo de tiempo de análisis que sea tomado, obteniendo valores del tiempo característico para diferentes intervalos de análisis, que se encuentran entre $\tau = [1.1, 1.19] \text{ hrs}$, con un tiempo característico promedio de $\tau = 1.1 \text{ hrs}$.

Función de estructura (Método Propuesto)

Este método se basa en determinar la función de estructura del seeing $\langle D(\Delta t) \rangle$ tomando como hipótesis que el seeing presenta una distribución log-normal, la evolución temporal de sus valores es mayor a cero, y por lo tanto el comportamiento de la función de estructura se describe por una función exponencial acotada, a través



de la cual se determina el tiempo característico. En este caso particular el tiempo característico ajustado es de 1.17 Hrs. Comparable al tiempo característico obtenido a través de la función propuesta por Racine [28]. Presenta grandes ventajas: es independiente a la ventana de análisis, y su cálculo no es complicado.

Contribución de la capa superficial al seeing total

- El porcentaje promedio de energía turbulenta con el que contribuye la capa superficial es de un 10.55 %, de lo cual se obtiene una contribución promedio a la degradación del seeing de un 6.47 %, con una mediana de un 4%.

Comparación con otros sitios astronómicos

En el siguiente recuadro se presentan los resultados que se han obtenido en diferentes sitios astronómicos, considerados como los óptimos para el desarrollo de las observaciones astronómicas.

Sitio	Altitud [m]	Seeing total [seg arc]	Seeing CS [seg arc]	$\tau(\varepsilon)$ [Hrs]
OAN-SPM (2000)**	2800	0.98	0.07, 15 m	1.1
Polo Sur	2830	1.86	0.64, 27 m	
Cerro Paranal, Chile	2500	0.73 0.64*	-	1.2 ^a
La Silla, Chile	2400	0.97 0.87	0.15, 30 m	
Mauna Kea, Hawaii	4200	0.74	-	0.3 ^b
La Palma, Islas Canarias.	2100	0.96	0.07, 12 m	

**= Datos obtenidos en este trabajo, *=Valor de la mediana, ^a= Sarazin [32] ^b= Racine [28]. Los datos de la tabla se obtuvieron (a excepción de OAN-SPM) de Marks [20]

De este recuadro, se observa que la calidad del sitio de SPM es comparable o mejor, en donde los parámetros determinados a lo largo del presente trabajo se encuentran dentro de los mismos ordenes de magnitud que los de los mejores sitios a nivel mundial.

Perspectivas

La contribución más importante del presente trabajo de investigación es el haber efectuado un análisis detallado de los diversos métodos existentes para la determinación del tiempo característico del seeing, obteniendo que el método que mejor describe esta tasa de variación temporal es el propuesto por Racine [28], dando una base firme para el análisis de la información por ser adquirida en campañas de observación posteriores. Sin embargo, esta contribución no demerita los otros parámetros determinados, porque los estudios sobre turbulencia atmosférica que se han realizado en este sitio no han sido tan completos, en la mayoría de los casos se han abocado a determinar el seeing promedio total, en cambio aquí

se incluye la descripción del comportamiento del seeing en función del tiempo, así como una caracterización más detallada de la contribución de la turbulencia atmosférica existente en la capa superficial. Así, el presente trabajo contribuye con el análisis teórico y los programas implementados para los análisis estadísticos de campañas de observación posteriores.

El estudio realizado en esta tesis dará origen a una publicación [31] en donde se presentarán estos resultados.

Referencias

- [1] Álvarez, M. *Reporte Técnico No. 5, IAUNAM*, 1969.
- [2] Ávila R., Vernin J. & Cuevas S.; *Turbulence Profiles with Generalized Scidar at San Pedro Mártir Observatory and Isoplanatism Studies*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, June, **110**, 1106-1116, 1998.
- [3] Ávila R., Vernin, J. & Sánchez, L. J.; *Atmospheric turbulence and wind profiles monitoring with generalized scidar*. Astronomy and Astrophysics, December, **368**, 364-372, 2001.
- [4] Ávila, R. & Vernin, J.; *Mechanism of formation of atmospheric turbulence relevant for optical astronomy*. Comm. Interstellar Turbulence. Proc. of the 2nd Guillermo Haro Astrophysics Conference, Puebla, México, 1998.
- [5] Ávila, R.; *Caractérisation de la turbulence atmosphérique pour la Haute Résolution angulaire en astronomie: Mise en oeuvre et exploitation du Scidar Généralisé et du Grating Scale Monitor*. Thèse Docteur en Sciences (Physique). Département d'Astrophysique. Université de Nice, Nice, France, 1998.
- [6] Azouit M.; *Comunicación Privada*, 2001
- [7] Conan, R., Ziad, A., Tokovinin, A. et al.; *Measurement of the optical relevant parameters for high angular resolution astronomy with the Generalized Seeing Monitor (G.S.M)*. Adaptive Optics and interferometry in the 21st Century. ASP Conf. Ser., **174**, 27-31, 1999.
- [8] Danjon, A.; <http://astroclub.net/saturne/toussaint/danjon.htm>.
- [9] Echeverría, J., Tapia, M., Costero, R. et al; *Site testing at Observatorio Astronómico Nacional in San Pedro Mártir*. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. March, **34**, 47-60, 1998.
- [10] Ehgamberdiev, S., Baijumanov, A., Ilyasov, S., et al.; *The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, August, **145**, 293-304, 2000.
- [11] Ehgamberdiev, S., Baijumanov, A., Ilyasov, S., et al.; *The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, August, **145**, 293-304, 2000.
- [12] Goodman J., W.; *Statistical Optics*. John Wiley & Sons, USA, 1985.
- [13] Gur'yanov, A., Kallistratova, M., Kuttyrev, A., et al; *The contribution of the lower atmospheric layers to the seeing at some mountain observatories*. Astronomy and Astrophysics, January, **262**, 373-381, 1992.
- [14] Hardy, J.; *Adaptive optics for astronomical telescopes*. Oxford University Press. United States of America, 1998.
- [15] Hiriart, D., Goldsmith, P.F., Skrutskie, F., et al; *Atmospheric Opacity at 215 GHz over San Pedro Martir*. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, **59**, 1997
- [16] Kolmogorov, A.N.; *Local structure of turbulence in incompressible fluids with very high Reynolds numbers*. DAN, S.S.S.R. **30-4**, 229, 1941.
- [17] Kolmogorov, A.N. *A refinement of previous hypothesis concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number*. Journal of fluid mechanics. **13**. 82, 1962.

- [18] Lena, P., Mignard, F. & Lebrum F.; *Observational Astrophysics*. Springer-Verlag Berlín Heidelberg, Germany, 1998.
- [19] Loos, G., Hogge C.; *Turbulence of the upper atmosphere and isoplanatism* Applied Optics. August, **18**, 2654-2661, 1979.
- [20] Marks, R., Vernin, J., Azouit, M., et al; *Antarctic site testing – microthermal measurements of surface-layer seeing at the South Pole* Astronomy and Astrophysics Supplement Series, January, **134**, 161-172, 1999.
- [21] Marks, R., Vernin, J., Azouit, M., et al; *Measurement of optical seeing on the high Antarctic plateau*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, January, **134**, 161-172, 1999.
- [22] Martin, F., Conan. R., Tokovinin, A., et al; *Optical parameters relevant for High Angular Resolution at Paranal from GSM instrument and surface layer contribution* Astronomy and Astrophysics Supplement Series, May, **144**, 39-44, 2000.
- [23] Martín, F., Tokovinin, A., Agabi, A. et al; *GSM: a Grating Scale Monitor for atmospheric turbulence measurements. I The instruments and first results of angle of arrival measurements*. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, November II, **108**, 173-189, 1994.
- [24] Michel, R., Bohigas, J., Arroyo, E., et al; *The meteorological stations of the 1.5 and 0.84 m telescopes of the OAN: description and results* Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, **37**, 165-171, 2001.
- [25] Muñoz-Tuñón, C., Vernin, J. & Varela, A.; *Night-time image quality at Roque de los Muchachos Observatory*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, October, **125**, 183-193, 1997.
- [26] Obukhov, A.M., Izv Akad. Nauk S.S.S.R., Ser Geograf. Geofiz. **13**, 58, 1949.
- [27] Pant, P., Stalin, C. & Sagar, R.; *Microthermal measurements of surface layer seeing at Devasthal site*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, October, **136**, 19-25, 1999.
- [28] Racine, R. *Temporal fluctuations of atmospheric seeing*. Astronomical Society of the Pacific, April, **108**, 372-374, 1996.
- [29] Roddier, F., Gilli & Lund.; *On the origin of speckle boiling and its effects in stellar speckle interferometry*. Journal Optics, **13**, 63, 1982.
- [30] Roddier, F.; *The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy*. Progress in optics. North Holland, **XIX**, 281-376, 1981.
- [31] Sánchez, L.J., Avila,R., Cruz, D. X., et al.; *Contribution of the surface layer to the seeing at San Pedro Mártir, Simultaneous microthermal and DIMM measurements*. (En preparación).
- [32] Sarazin, M. & Roddier, F.; *The ESO differential image motion monitor*. Astronomy and Astrophysics, May, **227**, 294-300, 1990.
- [33] Stock, J.; Keller, G.; *Astronomical Seeing, in Stars and Stellar Systems*. eds, G.P. Kuiper, B. M.Middlehurst, Vol. 1, Chicago University Press, Chicago, p138. 1960.
- [34] Tapia, M.; *Ten Years of Weather and Observing Statistics in San Pedro Martir, Baja California, México* Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, **24**, 179, 1992.

- [35] Tatarski, V. I., *Wave propagation in a turbulent medium*, Dover, New York, 1961.
- [36] Irinquet, H.; *Influence de la couche limite superficielle sur la dégradation des images astronomiques*. Thèse DEA (Physique). Département d'Astrophysique. Université de Nice, Nice, France 1999.
- [37] Vernin J. & Muñoz-Tuñón, C.; *Measuring Astronomical Seeing. The DA/IAC DIMM*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, March, **107**, 265-272, 1995.
- [38] Vernin, J. & Muñoz-Tuñón, C.; *Optical Seeing at La Palma Observatory. I General guidelines and preliminary results at the Nordic Optical Telescope*. Astronomy and Astrophysics. **257**, 811-816, 1992.
- [39] Vernin, J. & Muñoz-Tuñón, C.; *Optical Seeing at La Palma Observatory. II Intensive site testing campaign at the Nordic Optical Telescope*. Astronomy and Astrophysics, September, **284**, 311-318, 1994.
- [40] Vernin, J. & Muñoz-Tuñón, C.; *The temporal behaviour of seeing*. New Astronomy Reviews, **42**, 451-454, 1998.
- [41] Wyngaard, J., Izumi, Y., Collins; *Behavior of the Refractive-Index-Structure Parameter near the ground*. Journal Optical Society of America, **61**, 12, 1971.
- [42] Yaglom, A. M., Dan. S S S R., **69** (6), 743, 1949.
- [43] Ziad, A., Conan, R., Tokovinin, A. et al.; *From the grating scale monitor to the generalized seeing monitor* Optical Society of America. October, **30**, 5415-5425, 2000

Apéndice A Mástil- Sistema AZX-SOL

El mástil empleado es conocido como Sistema AZX-SOL, el cual se describe a continuación. El sistema AZX-SOL se conforma por el instrumento, la electrónica asociada al instrumento, el sistema de procesamiento de la señal y los programas de adquisición y almacenamiento.

A.1 Principio Teórico

Este sistema tiene como finalidad estimar la turbulencia atmosférica empleando un par de sensores microtérmicos, cuyo principio fue explicado en la sección 3.1.

A.2 Instrumento - Sistema AZX-SOL

El instrumento completo se divide en: pareja de sensores, sistema de adquisición y procesamiento de información, mástil, análisis de datos.

Sensores

Se emplea como sensor térmico un filamento metálico de tipo frío. Este filamento tiene como característica que su resistencia es función de la temperatura, a través del coeficiente de resistividad térmica α_{20} .

Los sensores se colocan en configuración de puente de Wheatstone, probablemente equilibrado. Todas las variaciones de temperatura se traducen en una variación relativa de las resistencias. Estas variaciones son cuantificables, debido a que el puente debe estar siempre equilibrado. Para poder medir las variaciones en temperatura con ordenes de micras se emplean sensores de pequeñas dimensiones y con tiempos de respuesta muy cortos, para así limitar la integración espacial y temporal.

La relación entre la resistencia y la temperatura está dada a través de la relación:

$$R_{s_T} = R_{s_{20}} [1 - \alpha_{20} (T - 20)], \quad (A.1)$$

en donde $R_{s_{20}}$ es el valor de la resistencia del sensor a una temperatura de 20°C.

Configuración

Cada uno de los sensores ($R_{s_{1T}}$ y $R_{s_{2T}}$) colocados a una distancia ρ se encuentran en cada brazo de un puente de Wheatstone, y en serie dos resistencias (R_p y R_p) en los otros brazos del puente.

Análisis de la configuración de los sensores

La suma de las resistencias R_{p1} y R_{p2} es constante aproximadamente $10K\Omega$, para mantener el equilibrio se emplea un potenciómetro ajustable.

Se considera $\overline{R_p}$ al valor promedio de R_{p1} y R_{p2} , y a $\overline{R_{s_r}}$, al valor promedio de R_{s1_r} y R_{s2_r} .

El voltaje v en los extremos de cada sensor es:

$$v = V_{ref} \frac{\overline{R_{s_r}}}{\overline{R_{s_r}} + \overline{R_p}}, \quad (A.2)$$

en donde V_{ref} es el voltaje de alimentación del puente.

Las variaciones en el voltaje v correspondientes a una fluctuación en la temperatura entre los sensores es:

$$dv = V_{ref} \alpha_{20} \overline{R_{s_{20}}} d\theta \frac{\overline{R_p}}{(\overline{R_{s_r}} + \overline{R_p})^2}, \quad (A.3)$$

dentro de la práctica $\overline{R_{s_r}}$ es del orden de 200Ω , el cual es despreciable al compararse con el valor de $\overline{R_p}$, que tiene un valor aproximado de 5000Ω . Por lo tanto la ecuación (A.3), se puede escribir:

$$d\theta = dv \left(\frac{1}{V_{ref} \alpha_{20} \overline{R_{s_{20}}}} \right) \overline{R_p} \left(1 + 2 \frac{\overline{R_{s_r}}}{\overline{R_p}} \right). \quad (A.4)$$

Debido a que el término $\frac{\overline{R_{s_r}}}{\overline{R_p}}$ en la ecuación (A.4) varía muy poco, se puede considerar a

$\frac{dv}{d\theta}$ como una constante. Por lo tanto en el instante de efectuar la medición, la temperatura

es T . El valor de $\frac{dv}{d\theta} = 600 \frac{nV}{\text{miligrado}}$.

Sistema de procesamiento de la información de AZX-SOL.

Este sistema está construido para recibir la información de dos parejas de sensores, a través de cables coaxiales y efectuarle un preprocesamiento. El sistema completo está formado por filtros, amplificadores y convertidores analógico - digital de 12 bits. La salida de los datos es a través del puerto serie. Un módulo FSK que codifica los bits en paquetes que se transmiten a una frecuencia de 2 KHz o 2.2 KHz según sean los valores.



1. Pre-procesamiento de la señal

Filtrado

La señal diferencial dv que se mide en los extremos de los sensores, esta conformada por las siguientes componentes, sin tomar en cuenta el ruido de la señal.

- A. La diferencia de temperaturas instantáneas entre los dos sensores.
- B. Un corrimiento inicial con respecto al cero (offset) y la deriva del amplificador de instrumentación que mide dv (en el intervalo de tiempo de la medición y en función de la temperatura ambiente) Este error comprende una magnitud entre 0.1 y 0.5 °C, el cual es un error de gran magnitud debido a las fluctuaciones de temperatura que se desean medir. Por lo tanto por ser una componente a muy bajas frecuencias es eliminada antes de calcular la función de estructura, al emplear un filtro temporal pasa altos,

La señal dv es separada en una componente de bajas frecuencias (TBF) \bar{v} y una componente alternativa \tilde{v} por dos filtros (Pasa altos y pasa bajos) con frecuencia de corte de 0.3 Hz.

Cálculos analógicos

Las señales \bar{v} y \tilde{v} son amplificadas con una ganancia G_s aplicada a dv . G_s es del orden de 500. La ganancia G_f aplicada a \tilde{v} es del orden de 10,000. Estas señales nos permiten obtener el valor de $D_f(\rho, h)$, para lo cual se requiere calcular la esperanza matemática

$\langle (\tilde{v})^2 \rangle$, sin embargo, se calcula $\sqrt{\langle (\tilde{v})^2 \rangle}$ por razones de dinámica. El circuito analógico que realiza esta operación contiene un filtro pasa bajos de Butterworth de tercer orden, con una frecuencia de corte a 0.3 Hz.

Todas las señales anteriores pasan por un proceso de filtrado y se encuentran en el mismo circuito.

Señal adicional: Temperatura externa (*Text*)

De acuerdo a la ecuación (A.2), se muestra que $\overline{R_{s_r}}$, se obtiene de la medida de v . Esta relación será utilizada en dos fases diferentes.

En un primer tiempo el conocer $\overline{R_{s_r}}$ y una medida de la temperatura ambiente permiten deducir $\overline{R_{s_{20}}}$. $\overline{R_{s_{20}}}$ es el parámetro fundamental que interviene dentro del cálculo de la sensibilidad del puente a las variaciones de la temperatura. Posteriormente $\overline{R_{s_{20}}}$ será introducido dentro de un archivo de parámetros y el valor de v servirá para monitorear el

valor de $T_{ambiente}$. Esta medida no afecta a los puentes de Weatstone, debido a que previamente los cuatro sensores han sido calibrados entre ellos para deducir el valor de $\overline{R_{S_{20}}}$ en el segundo puente. Esto es debido a que v después del filtrado a 0.3 Hz y amplificado a una ganancia G_{Text} es igualmente muestreada y digitalizada.

2. Convertidor analógico-digital

El convertidor es de tipo doble rampa. La señal a convertir es aplicada a un circuito integrador, que carga un capacitor a velocidad proporcional a la señal durante un tiempo fijo de 106 ms. El integrador posteriormente es descargado y se le aplica un voltaje fijo de referencia. En el momento de la descarga se inicia un contador, su valor final da el valor numérico de la señal.

Este sistema es adaptado a las señales polarizadas comprendidas entre 0 y -2.4 V, los cuales proporcionan un valor numérico entre 0 y 4095. Cuando llega a los 2.4 V el contador se reinicia, por lo tanto se debe sumar 4096 al valor dado.

Las señales \bar{v} no son polarizadas, sin embargo el sistema los convierte de un valor analógico ($DEC2$ y $DEC4$ en mV) a señales digitales (SD_{0A} y SD_{0B}) para poder ser procesadas.

Un multiplexor analógico de 8 entradas efectúa la conversión analógico-digital y el tiempo total de la conversión es de 1.4 seg. Se pueden medir casi simultáneamente 8 voltajes diferentes. Cinco entradas manejan las señales mencionadas,

$$(CI_A, CI_B, SD_A, SD_B, T_{ext}), \quad (A.5)$$

las otras tres son señales de calibración.

Multiplexado

El interés del multiplexado es que todas las señales pasen por el mismo circuito electrónico y por lo tanto sean afectadas de la misma forma, es decir misma ganancia y mismo valor del error de corrimiento con respecto al cero (offset). El resultado de la conversión de un voltaje de referencia, (V_{U_2}) permite establecer y conocer una medida de la ganancia (U_2).

Al conectar una de las entradas a una carga, midiendo el voltaje resultante se conoce el voltaje de corrimiento con respecto al cero (U_0).

El voltaje medido real para una señal CI_A se deduce a través de la fórmula:

$$V(CI_A) = (CI_A - U_0) \frac{V_{U_2}}{(U_2 - U_0)} \quad (A.6)$$

En la última entrada del multiplexor se introduce la temperatura interna del sistema electrónico (T_{int}).

Por lo tanto las señales que se introducen al multiplexor son:

$$T_{int}, CI_A, SD_A, T_{ext}, U_2, CI_B, SD_B, U_0$$

Serialización

Con el fin de minimizar el número de salidas del sistema, se numeran las señales de acuerdo al código hexadecimal para que sean transmitidas por el puerto serie moduladas por el FSK. El cual permite conectar al sistema solamente por tres hilos, dos para la alimentación a 15 V. y el tercero para la salida de los datos.

3. Demodulador FSK

La línea serial FSK es conectada a un demodulador AZ20-S-2, que también asegura la alimentación del sistema. El demodulador AZ20-S-2 transforma la línea FSK a una línea RS232, la cual es conectada a una computadora. Se puede evitar la conexión con el RS232 si la transmisión se efectúa por fibra óptica a la computadora. La transmisión es a 300 baudios, sin paridad, 8 bits de señal y 1 de marca de finalización.

4. Resumen del sistema AZX-SOL

Cada sistema AZX-SOL emplea dos parejas de sensores térmicos de filamento frío y determina cuatro valores de tipo diferencial y un valor de tipo absoluto. Estas cinco salidas permite evaluar los valores térmicos siguientes:

- Diferencia de temperatura entre los dos sensores de cada pareja dentro del dominio frecuencial comprendido entre 0 y 0.3 Hz.
- La energía de las fluctuaciones de la diferencia de temperaturas existente entre los dos sensores de cada pareja integrados dentro de 0.3 a 250 Hz. Estos valores son representativos de la función de estructura para la distancia ρ de separación de los sensores.
- La temperatura ambiente para cada uno de los sensores y así proporcionar un valor de referencia requerido.

Cada sistema contiene un archivo de parámetros que permite convertir los valores digitales en valores analógicos, para convertir estos valores en valores térmicos, se deben considerar las características de los sensores.

Posición de los sensores

Cuatro cables BNC-SMB-35-C, con C el color del cable, de 35 metros por sistema. En un extremo deben tener un conector para conectarlo al sistema, del otro extremo debe tener un conector SMB en el cual se conecta el sensor. Este conector SMB es colocado en un soporte previamente para ser fijado sobre una varilla cuadrada de 15 mm de lado.

Una caja en el cual se contenga el número necesario de sistemas y por lo tanto el número necesario de conectores BNC, considerando que son cuatro conectores por sistema. De acuerdo al modelo, puede:

- Contener una fuente de alimentación, los decodificadores FSK y presentar una salida RS232 para los sistemas. La conexión entre los RS232 y el sistema de adquisición puede ser por fibra óptica.

- La distancia de los cables de tres hilos al FSK AZX-20-S, deben asegurar una buena alimentación al sistema y una buena transmisión de las señales.

Montaje de los sensores en el mástil

Se colocan a la distancia h escogida, en la cual se debe fijar una varilla de sección cruzada de 15 mm por lado y de distancia mayor a la ρ deseada.

Los cables de soporte de los sensores, BNC-SMB-35-“C” , son colocados sobre los costados de las varillas de tal forma que la cara sensible del sensor se encuentren de frente a los vientos dominantes y que no se encuentre obstáculo alguno enfrente de ellos. La longitud de los cables debe ser de la distancia de donde son colocados los sensores en el mástil hasta la caja en donde se encuentran los sistemas de adquisición y procesamiento.

Para facilitar las conexiones, los cables deben tener colores distintos, cada conexión entre el cable y la caja del sistema debe ser del mismo color. Una vez colocado el sistema completo se debe proceder a calibrarlos como se describe a continuación.

Calibración inicial y sensibilidad.

Reglas de calibración:

Los sensores presentan una sensibilidad nominal definida por la resistencia a 20 °C ($R_{S_{20}}$) y por el coeficiente de resistividad térmica α_{20} . Las medidas de las funciones de estructura son por naturaleza diferenciales y es necesario que el coeficiente α_{20} sea el mismo para todos los sensores. La medida de la temperatura instantánea T de cada sensor i , se obtiene para la medida de su resistencia R_{Ti} . Esta resistencia se deduce del voltaje v_i medido a sus extremos, por la cual pasa una corriente I_i .

$$v_i = I_i R_{Ti} = I_i R_{S_{20}} [1 - \alpha_{20} (T - 20)] \quad (A.7)$$

Para que dv_i/dT sea idéntica para la pareja de sensores, se deben ajustar las corrientes que pasan a través de ellos empleando un potenciómetro localizado en la cabeza del puente. Por lo tanto:

$$v_i = \overline{I} R_{Ti} = \overline{I} R_{S_{20}} [1 - \alpha_{20} (T - 20)] \quad (A.8)$$

Sensibilidad relativa a las parejas de sensores:

La sensibilidad relativa a las parejas de los sensores es determinada por el parámetro $\overline{R_{S_{20}}}$, de cada uno de los sensores, debido a que ya se conoce el valor de α_{20} . Sin embargo el sistema permite medir $\overline{R_{S_{20}}}(A)$ de la pareja A . Se debe conocer previamente la sensibilidad relativa de la pareja de sensores que no dependen del valor medio relativo de los sensores

que lo constituyen. Este valor medio relativo, no depende de la temperatura a la que se encuentran

Procedimiento de equilibrio y sensibilidad relativa:

Para esta operación , el sistema debe estar conectado a su demodulador FSK y a la salida RS232 que va a la computadora. Se calibra el instrumento.

Los cuatro sensores deben estar inmersos dentro de un mismo medio isotérmico. Los sensores se deben tratar por parejas para minimizar la distancia entre las dos resistencias que conforman cada uno de los sensores. Se ajusta el valor SD_A , y SD_B , hasta llegar a los valores de equilibrio a través de un par de potenciómetros “trim”, localizados en el sistema. Los órdenes de magnitud de SD_{0A} , y SD_{0B} , están comprendidos entre 1950 y 2100. Un dígito corresponde a una diferencia de equilibrio equivalente a 1.5 m°C. Este ajuste posteriormente se hace a 50 dígitos.

Activación (Puesto en ruta)

Una vez equilibrado el sistema, se debe correr el programa de adquisición (“ACQDMAT”), el cual debe verificar que el equilibrio es correcto, es decir, los sensores se encuentran bien colocados y bien equilibrados. SD_A , y SD_B entregan señales muy fluctuantes, debido a que miden diferencias de temperatura, sin embargo los valores promedio deben ser próximos a los valores entregados por las señales SD_{0A} , y SD_{0B} , las cuales son aproximadamente 2000.

Adquisición de datos brutos

Cada sistema entrega una cadena de datos totales cada 1 4 segundos , en formato serie RS232. El programa debe verificar periódicamente cada serie de datos, por ejemplo que los intervalos de tiempo sean constantes. Los datos son 32 caracteres ascii seguidos de un carácter <CR> . Si los datos son correctos se deben registrar los datos presentes el programa de adquisición (“ACQDMAT”), también efectúa la conversión de Hexadecimal a Decimal, los datos obtenidos son almacenados en archivo, para verificación visual. Controla la validez de las medidas obtenidas, posteriormente efectúa el análisis de datos utilizando los archivos de los parámetros.

Puede crear dos tipos de archivos:

1. Archivos RWx antes de efectuar el análisis de los datos.
2. Archivos R0x, en el cual se archiva el resultado de una integración temporal de $C_N^2(h)$, determinada utilizando un valor de presión que se le da

Estos archivos son datos para la computadora.

A.3 Análisis

El análisis está comprendido en tres fases:

1. Convertir los voltajes numéricos obtenidos en la salida del convertidor analógico digital a los voltajes que representan.
2. Convertir estos voltajes a nuestros valores a la entrada.
3. Convertirlos en valores térmicos.

Fase 1: Voltajes de entrada del convertidor analógico digital (CAD).

En la sección de multiplexado se detalló como se restituyen los valores exactos de los voltajes S_V proporcionados al CAD, a la sección de análisis analógico a partir de los valores numéricos $Num(S_V)$. Estos voltajes se determinan a través de la ecuación:

$$V(S_V) = (Num(S_V) - U_0) \frac{V_{U_2}}{(U_2 - U_0)} \quad (A.9)$$

Las cinco señales " S_V " (A.5) de tipo "térmico" que nos interesan son mencionadas abajo [Tabla A-1].

La segunda línea son sus nombres simplificados, y la tercera los nombres de sus ganancias correspondientes.

Tabla A-1				
$G_{I_A} \sqrt{\langle (\overline{v_A})^2 \rangle}$	$G_{C_A} \overline{v_A}$	$G_{T_{ext} v}$	$G_{I_B} \sqrt{\langle (\overline{v_B})^2 \rangle}$	$G_{C_B} \overline{v_B}$
CT_A	SD_A	T_{ext}	CT_B	SD_B
$G1$	$G2$	$G_{T_{ext}}$	$G3$	$G4$

Fase 2: Voltajes en los extremos del puente

Esta fase emplea los datos de calibración del sistema que se encuentran almacenados en el archivo PERSONDE.DAT.

Parámetros almacenados en el archivo PERSONDE.DAT:

Cada sistema genera un archivo de parámetros, en el cual se almacenan todos los valores de calibración que se requieren: Las cinco ganancias [Tabla A-1], V_{U_2} , los desfases iniciales con respecto al cero SD_{0A} , y SD_{0B} . Los otros parámetros son otros desfases, y los ruidos.

- **Ganancias:** Como ya se describió, las ganancias que relacionan los voltajes medidos a las variaciones de voltaje observadas, son altamente dependientes de la

resistencia real $\overline{R_{CT}}$ de los sensores al momento de la medida. Para una eventual corrección, es necesario que las ganancias que son almacenadas en este archivo sean calibradas para una resistencia de 226 Ω .

- *Errores del cálculo electrónico.* Son de dos tipos, ruido y voltaje del corrimiento de la señal de los amplificadores con respecto del cero. Estos datos forman parte de los parámetros incluidos en el archivo. Se enlistan a continuación.
- *Señal T_{ext} .* Su voltaje de corrimiento con respecto al cero es el parámetro DECT en el archivo. Su ruido no puede ser medido ni puede ser eliminado.
- *Señal SD .* En el archivo se encuentran los valores de los corrimientos SD_{0A} , y SD_{0B} , los cuales son salidas del CAD. También se encuentran las referencias DEC2 y DEC4 en milivoltios. Sus ruidos (BT2 y BT4) no pueden ser eliminados, sin embargo en el archivo tienen valores de 0.00.
- *Señales CT .*

Un amplificador de ganancia aproximada de 10000 amplifica el valor de \tilde{v} . Esta amplificación es afectada por un ruido y un corrimiento de la señal con respecto al cero. El corrimiento de la señal con respecto al cero es eliminado al pasar la señal a través de un filtro pasa altos debido a que \tilde{v} tiene promedio nulo.

El circuito de raíz cuadrático medio (RMS) entrega un valor polarizado que está comprendido por tres componentes.

1. Su corrimiento de la señal con respecto al cero, llamado DEC1 o DEC3 en el archivo.
2. El ruido RMS br .
3. Las variaciones de su voltaje dv

Así si \tilde{v} es nula, la señal que se obtiene a la salida llamada BT1 o BT3, da el valor:

$$BT = DEC + \sqrt{\langle (br)^2 \rangle} \tag{A.10}$$

Debido a que el valor de \tilde{v} no es cero, entonces el valor de $\langle (\tilde{v})^2 \rangle$ se obtiene de la medida de CT, su relación es:

$$\langle (\tilde{v})^2 \rangle = (CT)^2 - \langle (br)^2 \rangle - DEC \tag{A.11}$$

Debido a que se deben efectuar estos cálculos, entre los parámetros que contiene el archivo están los valores de BT y de DEC.

Formato de los datos:

El archivo contiene 17 parámetros y el encabezado.

Tabla A-2	
Unidades	Parámetros
V	U2

mV	DEC1, DEC2, DEC3, DEC4, DECT, BI1, BI3, BI4
Dígitos numéricos	SD0A, SD0B
Sin unidades	G1, G2, G3, G4, Gtext

Las ecuaciones a utilizar son:

Para el tiempo externo

$$v = \left(\frac{Text}{GText} \right) - DECT \quad (A.12)$$

Para las señales directas del tipo SD, para A o B:

$$\overline{v(A \text{ o } B)} = \frac{(SD_{(A \text{ o } B)} - DECj)}{Gj} \quad (A.13)$$

Para las señales que entregan las funciones de estructura, del tipo CT, para A o B:

$$\sqrt{\left\langle (\tilde{v})^2 \right\rangle}_{(A \text{ o } B)} = \frac{[(CTj)^2 - \langle (BTj)^2 \rangle - DECj]}{Gj} \quad (A.14)$$

Fase 3. Valores Térmicos

- Temperatura en grados centígrados

De la ecuación $v = V_{ref} \frac{R_{S_T}}{(R_{S_T} + R_p)}$ se deduce el valor de $\overline{R_{S_T}}$.

La ecuación $R_{S_T} = R_{S_{20}} [1 - \alpha_{20} (T - 20)]$ permite deducir el valor de T.

- Valores de las Fluctuaciones

Estos valores comprenden la diferencia IBF de la temperatura entre dos sensores (\tilde{v}) y la función de estructura

La relación (A.3) explicita la ganancia aplicada para pasar de $\sqrt{\left\langle (\tilde{v})^2 \right\rangle}$ y \tilde{v} a $\sqrt{\left\langle (\tilde{\Theta})^2 \right\rangle}$ y $\tilde{\Theta}$.

A.4 Errores

Lista de errores involucrados

- Errores sobre la medida de $dv(\sqrt{\left\langle (\tilde{v})^2 \right\rangle})$ de \tilde{v} .

Los errores sobre la calibración de las ganancias Gj son despreciables ante los errores de conversión voltaje – temperatura enunciados abajo y no intervendrán en la estimación de los errores sobre las cantidades térmicas.

- Errores sobre la medida de V_{ref}

El valor de $V_{ref} = 5.05 \pm 0.01$ [V], el cual se conoce con una precisión de 2×10^{-3} [V].

- Error obtenido al calcular α_{20}

El coeficiente de resistividad térmica de los sensores para sensores atmosféricos, por comparación con las medidas de temperatura obtenidas con las sondas meteorológicas. Las dispersiones importantes son $\alpha_{20} = [3.02 \pm 0.01] \times 10^{-3}$.

- Errores sobre la medida de $\overline{R_{S_{20}}}$

Este error depende de los datos aportados al calibrar el sistema. Este error interviene en la medida de $\overline{R_{S_T}}$.

- Error sobre la medida de $\overline{R_{S_T}}$

El procedimiento que nos permite medir GT_{ext} emplea una medida dentro de la cual interviene V_{ref} y $\overline{R_p}$, lo cual hace que los errores sobre estas cantidades sean eliminadas. Por lo tanto nos restan dos errores por cuantificar, que provienen del CAD, uno es la medida de GT_{ext} , el otro es la medida de I_{ext} . Ambos son del orden $\frac{1}{4000}$.

Errores térmicos

- Error sobre $D_1(\rho)$

Los términos siguientes son un factor a la potencia ± 1 dentro del cálculo: V_{ref} (2×10^{-3}), $R_{S_{20}}$ (10^{-3}), α_{20} (3×10^{-3}), $\overline{R_p}$ (10^{-2}), sea un error total de 1.6 % sobre $\sqrt{\langle (\tilde{\Theta})^2 \rangle}$. Los mismos errores afectan a $\overline{D\Theta}$.

- Errores sobre $\overline{\Theta}$

El error es muy grande y se debe a los amplificadores y a la imprecisión del equilibrio inicial al puente (0.1 a 0.2 °C). Estos errores deben ser corregidos por un filtro TBF.

- Errores sobre I_{ext} :

La precisión no depende de la medida obtenida, tiene una resolución de 0.045 °C. Este error es completamente eliminado mientras los valores integrados dentro de los tiempos correspondientes no den una dependencia con la cuantificación.

Errores sobre $C_N^2(h)$:

Este error depende de la precisión de las medidas de presión y temperatura. Todos estos valores afectan de la misma manera al total de los niveles de las medidas y no influyen sobre los valores relativos.

Detectabilidad

- Detectabilidad para $D_T(\rho, h)$:

Esta se obtiene independientemente del ruido de la electrónica que puede ser eliminado. Este ruido (0.6 mV) es medido analógicamente con una precisión mayor a la cuantificación que interviene dentro de la medida de la señal y dentro del corrimiento de la señal con respecto al cero U_0 del CAD. La incertidumbre total es $1.6 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^2$. Al convertir a $C_N^2(h)$, para $P = 1000 \text{ mb}$ y $T = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$, la detectabilidad es de $16 \times 10^{-21} \text{ m}^{-2/3}$ y la medida sin presencia de turbulencia de $C_N^2(h)$ es del orden de $\pm 8 \times 10^{-21} \text{ m}^{-2/3}$.

- Detectabilidad para $\bar{\Theta}$:

Para esta medición el valor obtenido y el ruido de los amplificadores intervienen por partes iguales. Sin presencia de turbulencia, la detectabilidad es de $1.3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Dinámica

- Dinámica de $D_T(\rho, h)$:

Si $D_T(\rho, h)$ es de $0.11 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ su dinámica correspondiente es de $1.1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ para $C_N^2(h)$ con sensores separados un metro de distancia. Si las observaciones se efectúan en el día se pueden obtener saturaciones.

- Dinámica de $\bar{\Theta}$:

Es del orden de $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Obtener saturación en esta medida, indica un problema en el equilibrio del sistema.

Resumen

	Precisión	Detectabilidad	Dinámica
$D_T(\rho, h)$	1.6 %	$1.6 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^2$	$0.11 \text{ } ^\circ\text{C}^2$
$C_N^2(h)$	1.6 %	$\pm 8 \times 10^{-21} \text{ m}^{-2/3}$	$1.1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$
$\bar{\Theta}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$
T_{ext}	$45 \text{ m}^\circ\text{C}$		$-100^\circ, 50^\circ$

A.5 Programas disponibles

Preliminares

La adquisición de los datos entregados por el sistema es a través de los puertos serie de la computadora. Debido a que se tienen dos sistemas se requieren dos puertos serie en la computadora. El sistema operativo empleado es MS-DOS. Estos programas pueden ser transportados a cualquier otro sistema operativo que sea capaz de manejar dos puertos serie.

Programas:

Se emplean tres programas: ACQDMAT.BAS, DEPMAT.FOR,ADJUST.BAS., detallados a continuación.

ACQDMAT.BAS

ACQDMAT.BAS es un programa basado en el lenguaje TurboBasic. Efectúa la adquisición y el análisis en tiempo real. Crea dos tipos de archivos:

- Archivos 'BRUT', llamados por los programas matxxx.rw1 y matxxx.rw2, el cual contiene los parámetros numéricos dentro del sistema.
- Los archivos de análisis, llamados por el programa matxxx.r01 y matxxx.r02, los cuales contienen las medidas temporales de $C_N^2(h)$.

ACQDMAT.BAS llama a dos archivos de parámetros:

1. Parsonde.dat, el cual contiene las características de los sistemas.
2. Config.mat, en el cual se indican las características de los sensores: alturas, separaciones y resistencias a 20 °C

ACQDMAT.BAS escribe un encabezado dentro de los archivos que crea. En el contiene los parámetros necesarios para el análisis y el almacenamiento.

Se enfatiza que los sensores son por pares, si se requiere compatibilizar los programas no se debe olvidar esta aclaración, ya que este sistema está conformado por cuatro pares de sensores

Ejemplo del archivo Parsonde.dat:

U2	DEC1	DEC2	DEC3	DEC4	DECT	BT1	BT2	BT3	BT4	SD0
G1	G2	G3	G4	GText						
sonde	No	3	05-13	1998						
2.4844	1.00	124.88	0.79	1257.38	2.6	4.63	0.00	3.70	0.00	2179
10214	510	10296	516	10.87						

Ejemplo del archivo config.mat:

```
*****
sur COM1 :Sonde No 3
VOIE : A1 B1 A2 B2
```

Hsol : 27.00 15 20
 Ecart : 0.95 0 90
 Geometrie: H H
 Moy R Cap: 226.4 226.2
 sur COM2 :Sonde No 63
 VOIE : A1 B1 A2 B2
 Hsol : 8.00 4.20
 Ecart : 0.90 0 90
 Geometrie: H H
 Moy R Cap: 225.1 227.2

Ejemplo del encabezado de ACQDMAT.BAS:

MATE003.rwl commentaires
 PARANAL 11-29-98 21:44 PC SONDE No: 3
 H sol= 31.00 31.00 21.00 21.00
 0.95 0.95 0.95 0.95 H H H H Type= 2 N CTA1 SDA1 CTB1 SDB1
 2.4844 1.0 1248.9 0.8 1257.4 2.6 4.6 0.0 3.7 0.0 10214 510 10296 516
 237.94 237.94 235.23 235.23
 pression sol = 743.0 temperature sol = 21.0

En donde se encuentran:

- Nombre del archivo y comentarios adicionales
- Lugar, fecha, hora, y número de sistema
- Altura de cada sensor
- Distancia entre sensores, posiciones relativas (H significa pareja sobre una misma horizontal), Tipo de medida realizada (N sin medida del viento), códigos de cantidades medidas.
- Parámetros del sistema
- Resistencias promedio de los sensores a 20 °C dentro de config mat
- Presión y temperatura. Estos datos los debe introducir el experimentador.

DEPMAI.FOR

Está destinado al análisis de los archivos: BRUT, matxxx.rwl y matxxx.rw2, así como de su almacenamiento.

Localiza en el encabezado de los archivos anteriores los parámetros necesarios para efectuar el análisis.

ADJUST.BAS

ADJUST.BAS es una utileria que facilita la calibración inicial de las parejas de sensores. Localiza dentro del archivo Parsonde.dat las consignas de equilibrio y aporta una ayuda al experimentador al visualizar el desequilibrio.

Resumen de las variables

- α_{20} Coeficiente de resistividad térmica.
- ρ Distancia de separación entre los sensores.
- $R_{S_{20}}$ Valor de la resistencia del sensor a una temperatura de 20°C.
- $R_{S_{1T}}$ Valor de la resistencia del sensor uno a temperatura T.
- $R_{S_{2T}}$ Valor de la resistencia del sensor dos a temperatura T.
- R_{P_1} Valor de la resistencia uno que conforma uno de los brazos del puente.
- R_{P_2} Valor de la resistencia dos que conforma uno de los brazos del puente.
- $\overline{R_p}$ Valor promedio de las resistencias R_{P_1} y R_{P_2} .
- $\overline{R_{S_T}}$ Valor promedio de las resistencias $R_{S_{1T}}$ y $R_{S_{2T}}$.
- v Voltaje en los extremos de cada sensor
- dv Variaciones en el voltaje v correspondientes a una fluctuación en la temperatura entre los sensores.

AZX-SOL : Sistema que recibe la información de dos parejas de sensores.

- G_s Ganancia de amplificación de las señales \tilde{v} y \tilde{v} .
- $T_{ambiente}$ Temperatura ambiente.
- DEC1 o DEC3 Corrimiento de la señal con respecto al cero (Offset)
- DEC2 Valor analógico de la señal no polarizada \tilde{v}
- DEC4 Valor analógico de la señal no polarizada \tilde{v}
- SD_{0A} Valor digital que entrega de la señal \tilde{v} , para el sensor 1 o A.
- SD_{0B} Valor digital que entrega de la señal \tilde{v} , para el sensor 2 o B.
- br Ruido RMS.
- BT1 o BI3 Valor de la señal si \tilde{v} es nula
- ACQDMAI Programa de adquisición de datos

$$(CT_A, CT_B, SD_A, SD_B, I_{ext}),$$

$$I_{int}, CT_A, SD_A, I_{ext}, U_2, CT_B, SD_B, U_0$$

Apéndice B Programas para análisis de datos de los sensores de temperatura microdiferenciales y el DIMM

Los programas fueron implementados en el lenguaje de desarrollo Interactive Data Lenguaje (IDL) versión 5.4 win32.

B.1 Sensores de temperatura microdiferenciales

MasCrDatTimeM: Calcula el tiempo en segundos y lo almacena junto con el valor de $C_n^2(h,t)$, para cada noche de observación.

MastGphCn2M y MtGpCn2Dec: Obtiene las gráficas de los valores de $C_n^2(h,t)$ y temperatura para cada altura de los microsensores para cada noche de observación de los meses de Mayo y Diciembre respectivamente.

Cn2Hdic y Cn2MPromH: Obtiene el valor promedio de $\langle C_n^2(h) \rangle$ para cada altura y para cada noche de observación de las noches de Diciembre y Mayo respectivamente.

Cn2DecIntDecr: Obtiene los valores de la integración $\int_{h_1}^{h_2} \langle C_n^2(h) \rangle dh$, $h_2 > h_1$ metro a metro a partir de la mayor altura a la menor.

Cn2DintMetro: Obtiene los valores de la integración $\int_{h_1}^{h_2} \langle C_n^2(h) \rangle dh$, $h_1 > h_2$ metro a metro a partir de la menor altura a la mayor.

Cn2DecIntMetro: Obtiene el valor de la integración completa del $\int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \langle C_n^2(h) \rangle dh$ para cada mes y para la campaña completa.

B.2 DIMM

convTimeDimm.pro: Convierte la escala de tiempo en segundos, homologándola cada 30s. efectuando un promedio lineal para aquellos datos que presentan un intervalo menor, corrige los valores de seeing para una altura de 2 m para los datos de Diciembre. Almacena en archivo.

SeeingTU: Obtiene la tendencia promedio del seeing a lo largo de la noche, para la campaña completa. Grafica y almacena los datos.

CdfMayDic: Obtiene la función de distribución acumulativa para la campaña completa, con valor promedio de seeing, primer y tercer cuartil.

HistDimDicM: Obtiene el histograma de los valores logarítmicos de seeing ajustándole una función gaussiana, obteniendo la varianza, desviación estándar y media. Grafica y almacena resultados.

CdfMDHist: Obtiene la función de distribución acumulativa y la función de distribución de probabilidades en una sola gráfica. Almacena resultados.

Para implementar el método de Autocorrelación:

AterNordim: Calcula, grafica y almacena las funciones de autocorrelación normalizada para las noches totales de cada mes.

AterNorTot: Calcula, grafica y almacena la función de autocorrelación para la campaña completa, Mayo y Diciembre del 2000.

Para implementar el método de la determinación de la función fraccionaria (Racine):

FunRazAllNight: Calcula, grafica y almacena la función fraccionaria para todas las noches de observación, variando la ventana de análisis.

GraphExpRaz: Ajusta una exponencial creciente a la función fraccionaria obtenida a través del programa FunRazAllNight, determinando el valor del tiempo característico. Almacena los resultados.

FunXi: Calcula, grafica y almacena la función X para la campaña completa, variando la ventana de análisis.

Para implementar el método de la determinación de la función de estructura:

DimFnEstGraph: Calcula, grafica y almacena la función de estructura para la campaña completa, variando la ventana de análisis.

GraphExpfEst: Ajusta una exponencial creciente a la función de estructura obtenida a través del programa FunRazAllNight, determinando el valor del tiempo característico. Almacena los resultados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Apéndice C Ecuación de onda que viaja a través de una capa turbulenta

Una onda electromagnética monocromática presenta una dependencia exponencial en el tiempo, $\exp(-j\omega t)$, al propagarse a través de la atmósfera terrestre. Al considerar las inhomogeneidades atmosféricas el índice de refracción queda descrito por [12]:

$$n(\vec{r}) = n_0(\vec{r}) + n_1(\vec{r}). \quad (\text{C.1})$$

Con $n_0(\vec{r})$ el índice de refracción para atmósfera homogénea y $n_1(\vec{r})$ las contribuciones debidas a las inhomogeneidades atmosféricas. Debido a que $n_0(\vec{r})$ es determinado para atmósfera homogénea es independiente de \vec{r} , por lo tanto [12]:

$$n(\vec{r}) = n_0 + n_1(\vec{r}) \quad (\text{C.2})$$

Consideramos que la atmósfera tiene una permeabilidad magnética constante μ y una constante dieléctrica ε variable en el espacio, por lo tanto las ecuaciones de Maxwell son:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= j\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= -j\omega\varepsilon\vec{E} \\ \nabla \cdot (\varepsilon\vec{E}) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico, \vec{H} es el campo magnético y ∇ tiene componentes de vector $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ [12].

De las ecuaciones de Maxwell (C.3) se obtiene:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E}, \quad (\text{C.4})$$

considerando las relaciones:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla^2 \vec{E} + \nabla (\nabla \cdot \vec{E}), \quad (\text{C.5})$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \varepsilon (\nabla \cdot \vec{E}) + \vec{E} \cdot \nabla \varepsilon = 0, \quad (\text{C.6})$$

las cuales al combinarlas con las ecuaciones de Maxwell obtenemos [12]:

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\vec{E} \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} = -\vec{E} \cdot \nabla \ln(\varepsilon) \quad (\text{C.7})$$

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \vec{E} + 2\nabla (\vec{E} \cdot \nabla \ln(n)) = 0 \quad (\text{C.8})$$

En donde (C.8) es la ecuación de onda. La velocidad local de propagación de la onda es $(\mu\varepsilon)^{-1/2} = c/n$, en donde c es la velocidad en el espacio libre y n es el índice de refracción local, entonces:

$$\mu\varepsilon = \frac{n^2}{c^2} \quad (C.9)$$

por la constancia de μ y c

$$\nabla \ln(\varepsilon) = 2\nabla \ln(n) \quad (C.10)$$

Al sustituir (C.10) y (C.9) en (C.8) se obtiene:

$$\nabla^2 \bar{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \bar{E} + 2\nabla(\bar{E} \cdot \nabla \ln(n)) = 0 \quad (C.11)$$

válida en cualquier región libre.

El último término de la ecuación introduce un acoplamiento en los componentes \bar{E} llamado , el cual corresponde a un término de depolarización. El término de depolarización es completamente despreciable para la región visible del espectro por lo tanto es cero [12].

Físicamente este término es despreciable porque la escala interna de la turbulencia $l_0 \gg \lambda$, entonces la ecuación de onda se reduce a [12]:

$$\nabla^2 \bar{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \bar{E} = 0 \quad (C.12)$$

La única diferencia que presenta la ecuación (C.12) con respecto a la ecuación de onda convencional es a través del segundo término del factor n^2 el cual es una función de la posición \bar{r} . Debido a que los tres componentes del campo eléctrico \bar{E} obedecen la misma ecuación de onda, se puede reemplazar la ecuación vectorial por la ecuación escalar:

$$\nabla^2 U + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} U = 0 \quad (C.13)$$

en donde U puede representar a cada componente del campo eléctrico.

La solución de la ecuación escalar de onda (C.13) es acoplada por el uso del método de pequeñas perturbaciones [12]. Dado que $|n_1| \ll n_0$ es razonable expresar $U = U_0 + U_1$, en donde U_0 es obtenida si la atmósfera tiene un índice de refracción n_0 uniforme y en el término U_1 se consideran los efectos de perturbación del índice de refracción n_1 . Por lo tanto la ecuación de onda se encuentra descrita por:

$$\nabla^2 (U_0 + U_1) + \frac{\omega^2}{c^2} (n_0 + n_1)^2 (U_0 + U_1) = 0 \quad (C.14)$$

Como U_0 representa la solución no perturbada, debe satisfacer la ecuación:

$$\nabla^2 U_0 + k_0^2 U_0 = 0 \quad (C.15)$$

con $k_0^2 = \frac{\omega^2 n_0^2}{c^2}$. La retención de estos términos que son de primer orden en U_1 y n_1 implican que U_1 debe satisfacer:

$$\nabla^2 U_1 + k_0^2 U_1 = \frac{-2k_0^2 n_1 U_0}{n_0} \quad (C.16)$$

A partir de este punto asumimos que el índice de refracción promedio es n_0 es uno, el cual es una muy buena aproximación para el caso de propagación óptica [12].

La ecuación (C.16) es una ecuación de onda inhomogénea para U_1 con un término fuente dado por $-2k_0^2 n_1 U_0$, en donde su solución puede ser expresada en términos de una convolución dada por una función de Green en el espacio libre (función impulso) $\frac{\exp(jk_0|\vec{r}|)}{|\vec{r}|}$ y el término fuente.

$$U_1(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{e^{jk_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} [2k_0^2 n_1(\vec{r}') U_0(\vec{r}')] d^3\vec{r}' \quad (C.17)$$

en donde V es el volumen de dispersión [12].

En la ecuación (C.17) para U_1 estados del campo perturbado U_1 puede ser determinado por la suma de diversas ondas esféricas generadas a diversos puntos \vec{r}' que se encuentra dentro del volumen V. La intensidad de la onda esférica generada a \vec{r}' es proporcional al producto de la radiación incidente no perturbada y la perturbación del índice de refracción en este punto.

Los factores de corrección a la ecuación de onda debidos a los ángulos de dispersión son muy pequeños, aún comparándolos con el tamaño de la escala interna l_0 , por ejemplo si $l_0 \sim 2$ mm de tamaño y $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ entonces los ángulos de dispersión son $\leq \lambda/l_0 \sim 2.5 \times 10^{-4}$ radianes. Sin embargo el máximo desplazamiento lateral de un dispersor que contribuye con una porción de luz para un receptor a un punto dado es mucho más pequeño que la distancia axial desde el dispersor hasta el receptor. Por lo tanto la llamada aproximación de Fresnel puede ser aplicada a la ecuación (C.17) obteniendo [12]:

$$U_1(\vec{r}') = \frac{k_0^2}{2\pi} \iiint_V \frac{\exp\left\{jk_0 \left[(z-z') + \frac{|\bar{\rho}-\bar{\rho}'|^2}{2(z-z')} \right]\right\}}{z-z'} n_1(\vec{r}') U_0(\vec{r}') d^3\vec{r}' \quad (C.18)$$

en donde $\bar{\rho}$ y $\bar{\rho}'$ representan el desplazamiento transversal de \vec{r} y \vec{r}' desde el eje z.

Aplicando la siguiente transformación introducida por Tatarski y conocida como la transformación de Rytov, se define la cantidad compleja Ψ como el logaritmo natural del campo U [12]:

$$\Psi = \ln(U) \quad (C.19)$$

La solución para el campo fue obtenida para observar al campo U como la suma de contribuciones cada vez más pequeñas:

$$U = U_0 + U_1 + U_2 + \dots \quad (C.20)$$

Este tipo de solución es referida como aproximación de Born , el cual desprecia dispersión múltiple. Por supuesto existen un conjunto de condiciones experimentales bajo las cuales esta solución puede ser adecuada.

Aplicando la transformación (C.19) obtenemos que la ecuación de onda es ahora la ecuación de Riccati

$$\nabla^2\Psi(\vec{r}) + \nabla\Psi(\vec{r}) \cdot \nabla\Psi(\vec{r}) + \frac{\omega^2}{c^2}n^2(\vec{r}) = 0 \quad (C.21)$$

Por lo tanto la ecuación de Riccati puede ser resuelta asumiendo que

$$\Psi = \Psi_0 + \Psi_1 + \Psi_2 + \dots \quad (C.22)$$

en donde todos los términos son más altos que Ψ_1 .

Se observa que el tipo de soluciones de (C.22) y (C.20) es el mismo, sin embargo el método de Rytov presenta una gran ventaja estadística: las fluctuaciones de la amplitud han sido determinadas para obedecer la estadística log-normal.

En ambos casos en la aproximación de Born (C.20) y en la aproximación de Ritov (C.22) la única cantidad aleatoria son las perturbaciones en el índice de refracción.

Con la definición apropiada, ahora es posible determinar las expresiones para la amplitud logarítmica y la fase de las perturbaciones de onda.

Sea la amplitud A y la fase S de la onda U , mientras la amplitud y la fase de la solución en el espacio libre son A_0 y S_0 :

$$U = A \exp(jS) \quad (C.23)$$

$$U_0 = A_0 \exp(jS_0) \quad (C.24)$$

entonces:

$$\Psi_1 = \Psi - \Psi_0 = \ln \frac{A}{A_0} + j(S - S_0) \quad (C.25)$$

y definiendo

$$\chi \triangleq \ln \frac{A}{A_0} \quad (C.26)$$

$$S_\delta \triangleq S - S_0$$

por lo tanto

$$\Psi_1 = \chi + jS_\delta \quad (C.27)$$

La amplitud de la intensidad de la onda, presenta una estadística log normal y por lo tanto el seeing también presenta una estadística log normal [12].



Apéndice D Autocorrelación de una función

La autocorrelación de una función se determina a través de la relación:

$$C_\varepsilon(\Delta t) = \langle \varepsilon(t) \varepsilon(t + \Delta t) \rangle \quad (D.1)$$

Si se desea obtener la autocorrelación de la función $\varepsilon(t)$ centrada con respecto a su valor promedio de la función $\langle \varepsilon(t) \rangle = \bar{\varepsilon}$, se aplica la relación:

$$C_\varepsilon(\Delta t) = \langle (\varepsilon(t) - \langle \varepsilon \rangle) (\varepsilon(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle) \rangle \quad (D.2)$$

y la autocorrelación centrada y normalizada:

$$C_\varepsilon(\Delta t) = \frac{\langle (\varepsilon(t) - \langle \varepsilon \rangle) (\varepsilon(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle) \rangle}{\langle (\varepsilon(t) - \langle \varepsilon \rangle)^2 \rangle} \quad (D.3)$$

Para tener la autocorrelación promedio de una serie de funciones, se obtiene la autocorrelación para cada función y posteriormente se promedian:

$$\langle C_\varepsilon(\Delta t) \rangle = \left\langle \frac{\langle (\varepsilon_i(t) - \langle \varepsilon \rangle_i) (\varepsilon_i(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle_i) \rangle}{\langle (\varepsilon_i(t) - \langle \varepsilon \rangle_i)^2 \rangle} \right\rangle \quad (D.4)$$

desarrollando la ecuación (D.4) obtenemos:

$$\langle C_\varepsilon(\Delta t) \rangle = \left\langle \frac{\langle \varepsilon_i(t) \varepsilon_i(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle_i \varepsilon_i(t + \Delta t) - \langle \varepsilon \rangle_i \varepsilon_i(t) + \langle \varepsilon \rangle_i^2 \rangle}{\varepsilon_i(t)^2 - 2\varepsilon_i(t) \langle \varepsilon \rangle_i + \langle \varepsilon \rangle_i^2} \right\rangle \quad (D.5)$$

Muñoz – Vernin – Varela [25] proponen que la autocorrelación promedio de autocorrelaciones normalizadas se determine a través de la siguiente ecuación:

$$\langle C_\varepsilon(\Delta t) \rangle = \frac{\langle \varepsilon(t) \varepsilon(t + \Delta t) \rangle_i - \langle \varepsilon \rangle_i^2}{\langle \varepsilon \rangle_i^2} \quad (D.6)$$

Al realizar la comparación entre las autocorrelaciones obtenidas en las ecuaciones (D.5) y (D.6) observamos que la ecuación (D.6) se encuentra parcialmente determinada.