



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO ASTROCLIMATOLÓGICO DEL
SITIO DEL OBSERVATORIO
ASTRONÓMICO NACIONAL EN SAN PEDRO
MÁRTIR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE

F Í S I C O
P R E S E N T A

ÁNGEL MANUEL GARCÍA REYES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LEONARDO JAVIER
SÁNCHEZ PENICHE



2013



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.

1. Datos del alumno

García

Reyes

Ángel Manuel

56590063

**Universidad Nacional Autónoma de
México**

Facultad de Ciencias

Física

4050778-3

2. Datos del tutor

Dr.

Leonardo Javier

Sánchez

Peniche

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Roberto

Ortega

Martínez

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Irene

Cruz-González

Espinosa

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Remy Fernand

Ávila

Foucat

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Susana

Biro

McNichol

7. Datos del trabajo escrito.

**Estudio Astro Climatológico del Sitio
del Observatorio Astronómico
Nacional en San Pedro Mártir**

87 p.

2013

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y a todos los que me acompañaron en este camino.

A mis sinodales por su lectura cuidadosa y comentarios a este trabajo.

Investigación realizada con el apoyo del Instituto de Astronomía de la UNAM y del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM, PAPIIT-IN109809 y PAPIIT-IN103913 “Estudios astroclimatológicos y de óptica atmosférica en el Observatorio Astronómico Nacional”, responsable Dr. Leonardo Javier Sánchez Peniche.

Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Esta tesis hace uso de la base de datos del proyecto de selección del sitio del Thirty Meter Telescope (TMT) disponible en: <http://sitedata.tmt.org/>.

Índice General

Introducción

Capítulo I: Conceptos básicos de Óptica Atmosférica y Astroclimatología

- 1.1. Atmósfera Estándar
- 1.2. Turbulencia Atmosférica
- 1.3. Turbulencia Óptica
- 1.4. Astroclimatología

Capítulo II: Campaña de Estudio Astroclimatológico del OAN-SPM (TMT 2004-2008)

- 2.1. El Proyecto TMT y la búsqueda del sitio adecuado
- 2.2. Sitios Candidatos al TMT: Localización y Descripción Física
- 2.3. Antecedentes de Estudios Astroclimatológicos del sitio del OAN-SPM
- 2.4. Instrumentación utilizada durante la Campaña del TMT

Capítulo III: Datos Astroclimatológicos del OAN-SPM obtenidos durante la Campaña TMT

- 3.1. Cobertura de Datos (DIMM, MASS y Simultáneos)

Capítulo IV: Análisis de la Calidad Astroclimatológica del OAN-SPM

- 4.1. Descripción del Análisis Estadístico Realizado
- 4.2. Resultados del Análisis Detallado de los Datos
- 4.3. Análisis de Tendencias Temporales Globales
- 4.4. Comparación con Estudios previos realizados en el OAN-SPM
- 4.5. Comparación con otros Sitios Astronómicos

Resumen de Resultados y Conclusiones

Referencias Bibliográficas

Apéndices

- A 1. Artículo publicado en la revista arbitrada *MNRAS*

Introducción

Haciendo uso de los datos públicos obtenidos durante la campaña de estudio de sitios realizada por el consorcio del Telescopio de Treinta Metros (TMT), en este trabajo se expone un estudio estadístico de la calidad de imagen (*seeing*) en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (OAN-SPM). Previo a la realización de dicho estudio, se realizó una investigación de la bibliografía existente, lo que permitió la comparación con datos documentados para el OAN-SPM y para otros observatorios. Asimismo, para llevar a cabo el estudio, se desarrollaron herramientas computacionales.

En el **primer Capítulo** se introducen los conceptos básicos, realizando una breve descripción de las variables que afectan la calidad de la imagen astronómica. Se continúa en el **segundo Capítulo**, con la descripción del proyecto del TMT y de los sitios astronómicos estudiados, de los resultados anteriores obtenidos para el sitio del OAN-SPM, del proceso de obtención de los datos usados, del equipo instalado y un resumen de valores característicos del *seeing* obtenidos.

Posteriormente en el **tercer Capítulo** se muestra un análisis detallado de la cobertura de los datos de *seeing* obtenidos en la campaña del TMT, se detalla la frecuencia con que fueron realizadas las mediciones de *seeing* con los dos instrumentos usados (DIMM y MASS). También se realizó un análisis en el **cuarto Capítulo**, incluyendo tablas comparativas y estadísticas, que permite a su vez describir las tendencias o comportamiento temporal de la variable astroclimatológica medida.

Así, el trabajo que se va a exponer en esta tesis nos permite describir el comportamiento del *seeing* en el OAN-SPM y comparar su competitividad respecto a otros sitios astronómicos de calidad y a nivel mundial.

CAPÍTULO I: Conceptos básicos de Óptica Atmosférica y Astroclimatología

Para obtener información astronómica, se requiere coleccionar ondas electromagnéticas emitidas por los objetos celestes. Éstas son capturadas por los telescopios, pero en el camino óptico que recorren interactúan con el medio y sufren modificaciones. Esto último tiene una gran importancia, ya que la atmósfera terrestre altera la calidad de las imágenes astronómicas.

La resolución de un telescopio está limitada por la difracción del espejo colector, por ejemplo para un telescopio teórico perfecto de diámetro D y sin atmósfera, el tamaño de la imagen R_t a una longitud de onda λ , está dado por

$$R_t = 1.22 \frac{\lambda}{D}. \quad (1.1)$$

Sin embargo, las limitaciones que tienen origen en los efectos de las fluctuaciones en el índice de refracción son causadas por la atmósfera turbulenta. Estas fluctuaciones aleatorias tanto en el espacio como en el tiempo, provocan las perturbaciones en fase y amplitud de una onda que llega a la pupila del telescopio. La resolución es inferior al límite de difracción, por lo que el tamaño de la imagen R_a será mayor y está dada por:

$$R_a = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}. \quad (1.2)$$

Donde r_0 es equivalente a un diámetro de un telescopio de menor tamaño. En la mayoría de los casos $r_0 \ll D$. Por ejemplo, en el visible, r_0 es del orden de centímetros mientras que D puede ser del orden de metros.

Para estudiar con detalle cómo la resolución de las imágenes astronómicas es afectada, intentaremos describir brevemente cómo está estructurada la atmósfera y cómo podemos caracterizar la atmósfera turbulenta.

1.1. Atmósfera Estándar

La atmósfera terrestre es poco densa y gaseosa en comparación a las demás capas terrestres, la mayor cantidad de masa se encuentra en los primeros kilómetros de altura. Se puede dividir en dos regiones debido a su composición: Homósfera y Heterósfera.

La Homósfera ocupa aproximadamente los primeros 80 km a partir de la superficie terrestre, tiene composición constante y uniforme: Nitrógeno (78%), Oxígeno (20%), Argón, Dióxido de Carbono, Neón, Helio, Metano, Kriptón, Hidrógeno, Oxido Nitroso, Xenón, Ozono, Bióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y vapor de agua (mayormente a nivel de la superficie).

La Heterósfera se extiende aproximadamente desde los 80 km hasta ~10,000 km, está estratificada de la siguiente manera: Nitrógeno molecular (100-400 km), Oxígeno atómico (400-1100 km), Helio (1100-3500 km) e Hidrógeno (3500 km-en adelante) (Avilés 2004).

Para una primera descripción del comportamiento de la atmósfera terrestre se toma el promedio de las variaciones temporales y espaciales de ciertos parámetros como: temperatura, presión, humedad y densidad. En particular nos interesa la variación de estos parámetros con respecto a la altura. De esta manera se puede describir la estructura atmosférica y tener información del comportamiento de estas propiedades a distintas elevaciones.

Al encontrarse estratificada, la atmósfera terrestre presenta cambios de temperatura (T), densidad (ρ) y presión (P), que a su vez son dependientes de la altura respecto al suelo. En la atmósfera estándar, se definen cinco regiones: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termosfera y Exosfera (ver Figura 1.1).

La atmósfera se puede considerar como un fluido con la característica de generar dos patrones de movimiento: uno laminar y otro turbulento. El laminar se caracteriza por presentar velocidad de flujo uniforme y coherente donde sus cambios se realizan de manera regular y no mezclado. El turbulento se da con velocidades no uniformes debido a que se dan mezclas y flujos locales más aleatorios con el nombre de

remolinos de turbulencia. A continuación describiremos algunos aspectos de la teoría de la turbulencia atmosférica.

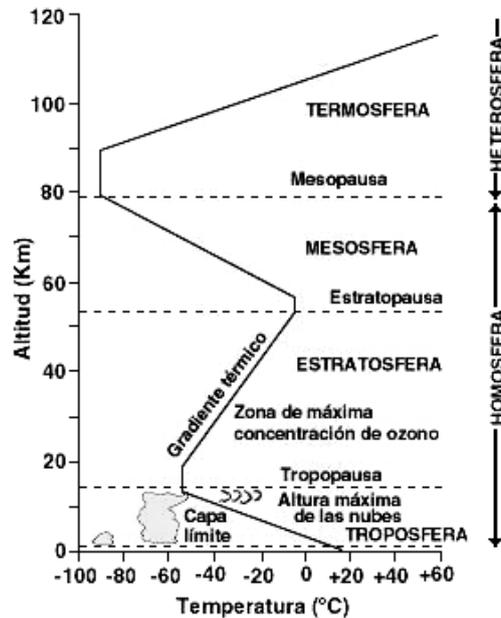


Figura 1.1.- Atmósfera estándar estratificada por altura y gradiente térmico (Avilés 2004).

1.2. Turbulencia Atmosférica

La turbulencia atmosférica puede ser principalmente debida a:

Turbulencia Térmica

La turbulencia térmica se encuentra asociada con la inestabilidad y convección, generada por los efectos del viento a nivel de la superficie, extendiéndose a estratos superiores de la atmósfera. Surge a partir del calentamiento del suelo, la turbulencia térmica genera cambios diurnos, siendo más pronunciada en la tarde cuando se ha calentado la superficie por mayor tiempo, ya que la temperatura es la máxima posible y el aire es más inestable en las capas cercanas a la superficie.

La turbulencia térmica es inducida por la combinación de la convección y el viento horizontal, siendo el principal mecanismo en el cual la energía es distribuida entre la superficie y los vientos a mayor altura. El aire inestable es calentado en la superficie, sube y se mezcla con el viento superior. Este viento, al mezclarse, genera un flujo turbulento, que puede llegar a tener forma de ráfagas. El impulso del flujo turbulento aumenta de velocidad al acercarse a la superficie y disminuye al alejarse de la misma.

Durante la noche y cerca del amanecer se tiene una menor turbulencia térmica, por lo general al mismo tiempo que la turbulencia mecánica.

Turbulencia Mecánica

La turbulencia mecánica se da debido a la fricción del flujo de aire con la topografía del lugar. La fricción es menor en superficies planas como en el agua o planicies y aumenta en terreno montañoso. Siendo el viento más estable a bajas velocidades, tiende a seguir el contorno del paisaje. A mayores velocidades crea remolinos en todas direcciones. Entonces los factores de esta turbulencia son la velocidad del viento y los accidentes topográficos.

La turbulencia mecánica también puede ser generada por “*wind shear*” que son gradientes verticales de velocidad horizontal del viento suficientemente fuertes para romper la estratificación de las capas atmosféricas.

A continuación presentamos los principios de la teoría general de la turbulencia desarrollada por Andréi Nikoláyevich Kolmogorov, para posteriormente enfocarnos en la aplicación de la misma a la turbulencia óptica atmosférica.

Teoría de Kolmogorov

Kolmogorov desarrolló una teoría (1941) en la que describe estadísticamente la turbulencia, suponiendo la homogeneidad e isotropía de las fluctuaciones asociadas con los campos de velocidad, temperatura e índice de refracción. Posteriormente Tatarskii (1961) basado en lo descrito por Kolmogorov desarrolla una teoría descriptiva de la propagación de las ondas electromagnéticas en un medio turbulento, como la atmósfera terrestre, donde la inestabilidad dinámica es la causante de la modificación local de las densidades en el medio, que generan diferencias en los índices de refracción. Así, las perturbaciones de mayor importancia se dan en la Troposfera, a una altura menor a 12 km y una parte de la Estratosfera hasta los 20 km de altura.

Es posible calificar la dinámica de un fluido que se mueve a través de un espacio mediante un parámetro adimensional llamado *Número de Reynolds* R_e . Este parámetro

depende de la viscosidad cinemática ν_0 , de la velocidad del movimiento V_0 y del tamaño de las masas de aire L_0 , y se define como

$$R_e = \frac{V_0 L_0}{\nu_0}. \quad (1.3)$$

Para el caso de la atmósfera terrestre, la viscosidad cinemática del fluido (aire en este caso) es aproximadamente $15 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (a temperatura ambiente) y L_0 puede variar entre 1 m a 100 m. Para números de Reynolds mayores que un valor crítico ($R_e \sim 2000$), el fluido deja de ser laminar y empieza una transición a un flujo turbulento, donde es posible aplicar la teoría de Kolmogorov (véase Figura 1.2).

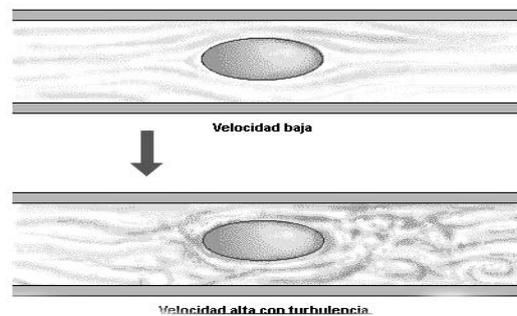


Figura 1.2.- Representa el flujo laminar (arriba) y flujo turbulento (abajo) (Avilés 2004).

Para explicar la noción de cascada de energía de Richardson, Kolmogorov distingue claramente una etapa dentro del proceso de distribución de energía cinética, a la cual pertenece todo un intervalo de escalas de remolinos. Este intervalo de tamaños, definido como $l_0 \ll l \ll L_0$, se distingue entre otras cosas por seguir un régimen de turbulencia estadísticamente isotrópico. Está delimitado por abajo, con la escala interna de turbulencia l_0 en la cual la energía de movimiento se vuelve lo suficientemente pequeña para detener el proceso de transferencia de energía y dar inicio a una etapa de disipación de energía por calor, debido a la fricción viscosa del fluido.

El límite superior L_0 , se conoce como escala externa de la turbulencia. Es el tamaño de los remolinos más grandes, modelado por el ancho del flujo. El proceso dominante en la transferencia de energía se da en las escalas que pertenecen a este intervalo y se debe a fuerzas de inercia, por esta razón se le conoce como intervalo inercial de la turbulencia.

1.3. Turbulencia Óptica

Índice de Refracción

La turbulencia junto con el gradiente térmico se presenta en mayor medida en los estratos bajos de la atmósfera (Troposfera). Ambos inducen cambios en el índice de refracción del aire, afectando directamente la trayectoria de las ondas electromagnéticas desde la fuente de emisión, (objetos astronómicos) a la captura de las mismas por un telescopio.

Así, una onda electromagnética al atravesar la atmósfera terrestre, se ve afectada principalmente en su fase. La luz interactúa con la atmósfera, cuyo índice de refracción atmosférico η está definido por la variación espacio-temporal de la temperatura (T), la presión (p) del medio y por la concentración de vapor de agua (Q) disipada en el aire. Estos son factores que determinan la refractividad y la absorción del medio.

La refractividad N es función de la longitud de onda de la radiación y depende de la composición y la altura de la atmósfera. Se mide en partes por millón, empleando η como la parte real del índice de refracción,

$$N = (\eta - 1)10^6. \quad (1.4)$$

N tiene un valor aproximado de 280 a nivel del mar y aproximadamente 95 para una altura de 10 km. N tiene una contribución por la refractividad en el continuo y otra por la dispersión anómala de resonancias en el infrarrojo.

Por lo general en la ventana óptica se considera sólo el continuo de refractividad, que a su vez se representa como la contribución del aire seco a la refractividad del medio, que depende de la densidad ρ y la temperatura T . También se puede considerar un término dependiente de la concentración de moléculas de vapor de agua (Hill et al. 1980).

La refractividad en el aire seco y en el aire que contiene vapor de agua, son dependientes de la altura. Dado que las concentraciones de moléculas son distintas

para cada estrato atmosférico, la presencia de moléculas se incrementa en los estratos inferiores debido a la gravedad. Cada estrato de la atmósfera tiene un índice de refracción diferente, dependiendo de la longitud de onda λ de la luz y de la refractividad N_0 del medio, representado como:

$$N = 0.378N_0(\lambda)\frac{\rho}{T}. \quad (1.5)$$

La turbulencia óptica se produce mayormente en la Troposfera y la Estratosfera, ya que son los estratos donde existe mayor densidad de partículas en la atmósfera. En su conjunto las condiciones pueden ser estudiadas y analizadas con el fin de encontrar relaciones que sean útiles para la astronomía como lo veremos a continuación (Hill et al. 1980).

1.4. Astroclimatología

La Astroclimatología se puede entender como el estudio de las condiciones climatológicas en relación a un sitio en el que se realizan observaciones astronómicas. Surge a partir de la necesidad de explicar y caracterizar las condiciones de mejor obtención de imágenes astronómicas, tomando en cuenta las variantes climatológicas involucradas y propias a la localización de un telescopio. Para realizar estudios astroclimatológicos se han desarrollado herramientas e instrumentación que buscan encontrar las relaciones de la calidad de las imágenes astronómicas (“*Seeing*”) con respecto a parámetros climatológicos.

Algunos de los parámetros más relevantes para los estudios astroclimatológicos son:

Velocidad del viento. Su estudio permite entender el flujo de las distintas capas atmosféricas ya sean laminares o turbulentas. De esta manera es posible determinar en qué condiciones se puede suscitar mayor flujo turbulento, y establecer la velocidad de cambio para las imágenes astronómicas.

Dirección del viento. Este parámetro indica la procedencia de las ráfagas de viento preponderantes. Existe una relación a la topografía del lugar, dado que los accidentes topográficos son distintos de sitio a sitio. Esto permite definir y estudiar la localización óptima de un telescopio.

Radiación solar. Se refiere a la incidencia de rayos lumínicos provenientes del Sol, que alteran las condiciones del sitio debido al calentamiento del aire generando convección. También permite estudiar las condiciones preponderantes de nubosidad y transparencia del cielo en un sitio astronómico.

Humedad del ambiente. Indica la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Este parámetro es importante sobretodo en la región del infrarrojo y milimétrica del espectro. El índice de refracción se ve afectado en estas regiones dependiendo de la humedad presente. Para realizar observaciones en el infrarrojo o milimétrico se busca minimizar el contenido de humedad ambiente y la columna integrada de vapor de agua.

Temperatura del ambiente. Su estudio permite comprender de qué forma las variaciones de temperatura pueden suscitar cambios en parámetros importantes de los telescopios (domo, espejo, etc.), en relación a la calidad de las imágenes astronómicas.

Seeing. Para el estudio de la calidad de las imágenes astronómicas, se define el *Seeing* atmosférico como la referencia principal para cuantificar la resolución espacial que puede obtenerse en un sitio astronómico. Así, a menor *Seeing*, menor degradación de las imágenes astronómicas y por lo tanto mejor resolución angular y mejores resultados astronómicos.

A continuación explicaremos con más detalle el último parámetro mencionado cuyo análisis constituye la base de este trabajo de investigación.

***Seeing* Atmosférico (calidad de imágenes astronómicas)**

El significado que se le da a la palabra *seeing* se refiere a la descripción cuantitativa del diámetro angular de una observación astronómica (imagen estelar), realizada a través de la turbulencia atmosférica en un tiempo de exposición prolongado. Su duración puede llegar a ser de de varios segundos, minutos o hasta horas. Las unidades de medición del *seeing* están dadas en segundos de arco (arcsec).

Cada telescopio tiene un diámetro definido D y por lo mismo tiene un patrón de difracción de Airy teórico asociado. Al observar a través de la atmósfera una fuente puntual (estrella muy lejana), ésta tiene un diámetro mayor que el definido por el patrón

de difracción, por lo que se observa un patrón de luz difuminado en una distribución gaussiana. Así, la información espacial del objeto en cuestión se ve degradada (ensanchando la gaussiana), por lo que se dice que hay pérdida de resolución espacial.

La medida del *seeing* caracteriza el deterioro de la resolución de una imagen astronómica debido a las perturbaciones atmosféricas. Por lo tanto para conocer el desempeño de un telescopio en la superficie terrestre se establece la necesidad de estudiar y caracterizar el *seeing* del sitio en el que se encuentra el telescopio (Sarazin & Roddier 1990).

Como ya se mencionó, el paso de la luz emitida por una estrella a través de las capas de turbulencia atmosférica interfiere con la propagación luminosa, debido a los cambios locales del índice de refracción del aire. En consecuencia, se perturba el frente de onda emitido originalmente por los objetos astronómicos que al final de su camino es colectado por un telescopio terrestre.

Para exposiciones de tiempo mayores se incrementa este efecto de difuminado de las imágenes obtenidas. Para imágenes instantáneas se obtendría un patrón de “motas” o puntos luminosos, a éstos también se les conoce como *speckles*. Éstos fluctúan en intensidad en tiempos de milisegundos debido a las variaciones introducidas por la turbulencia atmosférica. El tamaño característico de estas motas lo da el límite de difracción:

$$\varepsilon \approx \frac{\lambda}{D}. \quad (1.6)$$

En las imágenes astronómicas de largo tiempo de exposición se da la superposición de múltiples imágenes de corto tiempo de exposición. Como consecuencia se observan discos gaussianos difusos formados por la integración espacio-temporal de cientos o miles de imágenes *speckle*.

Estas imágenes difuminadas “borran” la información espacial de los *speckles* por lo que no permiten precisar, por ejemplo, el diámetro de la fuente estelar. Tampoco se podrían estudiar detalles característicos de la fuente astronómica a escalas menores a las del disco de *seeing*.

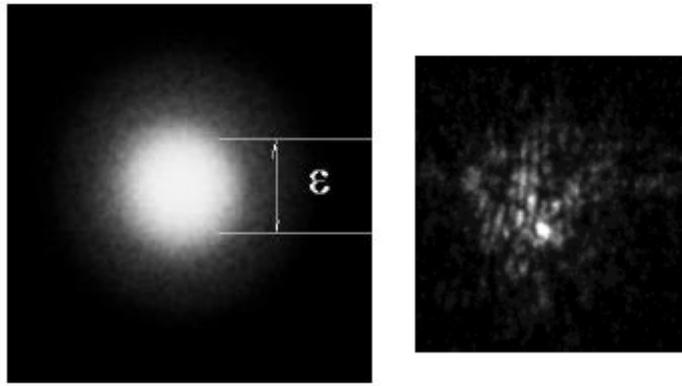


Figura 1.3.- Muestra del *seeing* \mathcal{E} (izquierda) y de una imagen *speckle* (derecha) (Avilés 2004)

Se puede cuantificar el *seeing* a través de la medición del Ancho Total a Media Altura (*FWHM*) de la distribución radial de la intensidad de la imagen. Éste se mide en segundos de arco (arcsec o ") y puede ser variable en el tiempo. El tamaño de la imagen o disco de *seeing* se puede expresar en función de un diámetro de telescopio equivalente a:

$$\mathcal{E}_{FWHM} = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}. \quad (1.7)$$

Donde \mathcal{E}_{FWHM} es conocido como el ángulo de *seeing* observado y se determina con métodos estadísticos, ya que intentar medirlo directamente en la imagen de un objeto puntual puede introducir efectos tanto de las aberraciones del telescopio como de efectos de guiado, produciendo una medición sobrestimada. El parámetro r_0 es el radio de coherencia o parámetro de Fried.

Radio de Coherencia de Fried (r_0)

El radio o longitud de coherencia de Fried (Fried y Mevers 1974) se define como el diámetro de un telescopio con el que se observaría en ausencia de turbulencia y tiene la misma resolución que un telescopio de tamaño infinito en presencia de turbulencia. Otra definición posible es la del diámetro de una región del frente de onda para el cual la variación de fase es de 1 radian. También se le ha llamado área de coherencia espacial r_0 , y éste es proporcional a la longitud de onda (Avilés 2004).

En otras palabras, este llamado parámetro de Fried define el diámetro crítico r_0 de la abertura de un telescopio inmerso en turbulencia óptica. En otras palabras, es la

longitud o el tamaño de la sección transversal del frente de onda degradado para la cual todavía existe cierto grado de coherencia. El poder de resolución asociado a la geometría de la abertura del telescopio (D) es el mismo. Si $D > r_0$ el poder de resolución del sistema atmósfera-telescopio está limitado por r_0 y no por el diámetro de la abertura.

La relación funcional que guardan los parámetros atmosféricos y el parámetro de Fried es:

$$r_0 = \left[0.423k^2 (\cos z)^{-1} \int_{h_0}^{h_1} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}. \quad (1.8)$$

En donde $k=2\pi/\lambda$ representa al número de onda, z es igual a la distancia cenital del objeto observado en radianes, h_0 y h_1 son las alturas inferior y superior respectivamente que definen el espesor de la capa atmosférica que afecta a las observaciones y $C_n^2(h)$ es la constante de estructura que representa una estimación de la intensidad de las fluctuaciones turbulentas del índice de refracción y se mide a una altura h sobre la superficie del suelo.

Puede verse también que el efecto de la atmósfera sobre la calidad de las imágenes de exposición larga, dependerá de la longitud de onda λ en la que se observa la imagen (Rodier 1981) ya que:

$$r_0 \propto (\lambda^{-2})^{-3/5} = \lambda^{6/5}. \quad (1.9)$$

La calidad de imagen o *seeing* está relacionada con la integral J del parámetro $C_n^2(h)$ calculada para todo el camino óptico d de propagación de la onda electromagnética:

$$J = \int_d C_n^2(h) dh. \quad (1.10)$$

Es evidente que el conocimiento de la distribución vertical de la turbulencia óptica resulta de suma importancia para la comprensión del comportamiento del *seeing*. El *seeing* integrado es un parámetro que nos permite la caracterización de un sitio astronómico, y es de suma importancia para el diseño y construcción de nuevos

telescopios. En el siguiente capítulo se explica la campaña de caracterización que fue realizada en varios sitios astronómicos por el consorcio del TMT.

CAPÍTULO II: Campaña de Estudio Astroclimatológico del OAN-SPM (TMT 2004-2008)

2.1. El Proyecto del Thirty Meter Telescope (TMT) y la búsqueda del sitio adecuado

El TMT será un gran telescopio de treinta metros de diámetro que cuando sea completado hacia 2018, permitirá a los astrónomos detectar y estudiar la luz proveniente de las estrellas y galaxias más tempranas, analizar la formación de los planetas en órbita alrededor de estrellas cercanas, y poner a prueba muchas de las leyes fundamentales de la física. Comprende una sociedad internacional que incluye al Instituto Tecnológico de California (Caltech), a la Universidad de California, y ACURA una organización de universidades canadiense. También se ha unido para colaborar con el TMT, el Observatorio Nacional Óptico de Japón (NAOJ).

Este gran telescopio será construido para operar en alguno de los mejores sitios astronómicos en el planeta, por lo que en el año 2003 se inició un estudio astroclimatológico de los posibles sitios astronómicos. Se instalaron una serie de equipos para medir las condiciones que afectan las observaciones astronómicas y realizar una caracterización astroclimatológica en cinco de estos sitios candidatos.

2.2. Sitios Candidatos para el TMT: Localización y Descripción Física

El proceso de selección se inició considerando una lista de sitios óptimos alrededor del mundo, usando estudios anteriores de selección de sitios astronómicos que incluye nuevos y sitios ya establecidos. La lista final de candidatos se apoyó fundamentalmente en los estudios de cobertura de nubes y precipitación pluvial llevados a cabo por el Dr. D. A. Erasmus a partir de imágenes satelitales (Erasmus 2002).

La Tabla 2.1 contiene los sitios candidatos, sus coordenadas y el intervalo de tiempo en el que se llevó a cabo el estudio de cada uno de ellos (Schöck 2009).

Nombre del sitio	Elevación [m]	Latitud [grad N]	Longitud [grad O]	Inicio del estudio	Fin del estudio
Cerro Tolar (Chile)	2290 m	-21.9639	70.0997	Octubre 2003	Marzo 2007
Cerro Armazones (Chile)	3064 m	-24.5893	70.1917	Octubre 2004	Noviembre 2009
Cerro Tolonchar (Chile)	4480 m	-23.9361	67.9766	Octubre 2005	Noviembre 2008
San Pedro Mártir (México)	2830 m	31.0456	115.4691	Octubre 2004	Agosto 2008
Mauna Kea 13-N (USA)	4050 m	19.8330	155.4810	Junio 2005	Junio 2008

Tabla 2.1.- Lista de sitios candidatos, coordenadas, elevación e intervalo de tiempo del estudio.

Cerro Tolar

Con una elevación de 2290 m en el norte de Chile, Cerro Tolar se encuentra en el desierto de Atacama y tiene un clima extremadamente árido. Tolar se encuentra a una distancia de 8 km de la costa y aproximadamente a 18 km del pueblo Tocopilla, con 25 mil habitantes. El puerto más cercano se encuentra en la ciudad de Antofagasta con alrededor de 225 mil habitantes a 190 km al sur de Tolar.

Independientemente de la cercanía al poblado de Tocopilla, la contaminación lumínica no es un problema, ya que el relieve se encuentra a 1000 m que bloquean la mayoría de la luz producida por el pueblo, aunque se nota un poco de brillo, al igual que pequeñas fuentes de luz debido a las minas al sur.

Cerro Armazones

Cerro Armazones, tiene una elevación de 3064 m al norte de Chile. También se encuentra en el desierto de Atacama, a una distancia de 36 km de la costa, con clima árido. Se encuentra a 22 km del VLT (Very Large Telescope, de la ESO) en Cerro Paranal, a 110 km al sur se encuentra Antofagasta, la ciudad más cercana. Armazones es un sitio con un pequeño observatorio operado por la Universidad Católica del Norte

en Antofagasta. Este observatorio no se encuentra en la cima sino en una pendiente a 350 m debajo de la cima.

Un nuevo observatorio se ha comisionado por la Universidad de Bochum en Cerro Murphy, a 1.5 km al sur este de Armazones y a 225 m por debajo. Las únicas fuentes de luz visibles desde Armazones son destellos procedentes desde Antofagasta al norte y de Mina Escondida a 120 km

Cerro Tolonchar

Cerro Tolonchar se encuentra más al este que todos los demás sitios Chilenos, al sur del Salar de Atacama, a una distancia aproximada de 25 a 80 km de varios picos montañosos con altura de 5000 a 6000 m en su punto más alto en los Andes. Debido a su localización al este y a gran altura, Tolonchar experimenta menor precipitación y nubosidad que Tolar y Armazones, especialmente en Diciembre hasta Febrero, Tolonchar es el más alto con 4480 m y el más remoto de todos los sitios candidatos.

El poblado más próximo es Socaire con 300 habitantes, se encuentra a 38 km de San Pedro de Atacama. Un aeropuerto comercial en Calama, ciudad con 120 mil habitantes a 190 km y a 2 horas de recorrido de Socaire, 3 horas de San Pedro de Atacama y 4.5 horas de Calama. Existe un camino desde Paso Sico a la base de Tolonchar, una distancia de 17 km que el proyecto TMT ha construido de la base a la cima.

Existen algunas luces procedentes de las minas alrededor del Salar de Atacama, a unos 50 km de distancia, pero con una vista directa desde Mina Escondida y de los pueblos anteriores que son visibles. A pesar de esto, Tolonchar es un sitio oscuro.

Mauna Kea

El sitio bautizado 13-N en Mauna Kea es un sitio candidato que se encuentra al norte de la gran isla de Hawaii aproximadamente a 150 m de la cima y adyacente al Submillimeter Array (SMA). Con una elevación de 4050 m sobre el nivel del mar, Es el segundo sitio candidato más alto aunque se encuentra por debajo de los telescopios ópticos presentes en el Observatorio. Sus condiciones usuales son las de un viento

estable por el noroeste, pero puede tener grandes precipitaciones sobre todo en Invierno.

Las luces de la mayoría de los poblados del norte y el oeste de la gran isla son visibles desde la localización del sitio, así como el brillo de la ciudad de Hilo. Aunque como para todos los otros sitios la contaminación lumínica se encuentra por debajo de los 65 grados del cenit, límite observacional del TMT.

Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (OAN-SPM)

Dentro del Parque Nacional de San Pedro Mártir en la Península de Baja California se encuentra el Observatorio Astronómico Nacional (OAN-SPM). Tiene una elevación media de 2830 m. Se encuentra a 65 km de la costa del Pacífico, al oeste a 55 km del Mar de Cortés en el Golfo de California. La mayor elevación del estado corresponde a Picacho del Diablo (3095 m), localizado aproximadamente a 6 km al sureste del Observatorio Astronómico.

El área está dentro de un bosque de pinos y recibe más precipitación pluvial que cualquier otro sitio candidato al TMT, aunque sucede en eventos de gran intensidad y con grandes temporadas de cielo claro. La ciudad grande más cercana es Ensenada (300 mil habitantes) a unos 140 km de distancia. El puerto aéreo comercial más cercano está ubicado en Tijuana (a 220 km) y la ciudad de San Diego se encuentra a 250 km.

En el sitio se encuentran tres telescopios astronómicos de: 2.1 m, 1.5 m y 84 cm. El sitio tiene la cualidad de ser muy oscuro de noroeste hasta el suroeste. En la dirección norte las ciudades de San Diego, Tijuana, Mexicali, Yuma, además de Ensenada, producen destellos luminosos visibles, pero debido a su distancia San Pedro Mártir permanece como un sitio muy oscuro.

2.3. Antecedentes de Estudios Astroclimatológicos del Sitio del OAN-SPM

Por más de 30 años la UNAM ha operado y desarrollado el Observatorio Astronómico Nacional (OAN-SPM), durante los cuales se han llevado a cabo diversos estudios astroclimatológicos, los cuales se resumen a continuación:

Varias propiedades climatológicas han sido reportadas, principalmente al inicio de la operación del Observatorio Astronómico Nacional (Mendoza 1971, 1973; Mendoza et al. 1972; Álvarez & Maisterrena 1977; Álvarez & López 1982; Walker 1984) después por Tapia (1992, 2003); Echevarría et al. (1998); Hiriart et al. (2001); Michel et al. (2003); Carrasco & Sarazin (2003); Carrasco et al. (2005); Ávila et al. (2006); Tapia et al. (2007a); Álvarez et al. (2007); Bohigas et al. (2008); Otárola et al. (2009); Bohigas & Núñez (2010); Araiza Quijano & Cruz-González (2011) y Carrasco et al. (2012).

Para el OAN-SPM históricamente se ha tenido un aumento de las noches en las que era posible obtener imágenes fotométricas. La cobertura fue inicialmente de 57% de las noches, después de 1996 aumentó a 74.6% de noches fotométricas. Estos son valores similares a los reportados por Erasmus & Van Staden en 2002, a partir de imágenes obtenidas por satélite para este sitio astronómico. Esto coloca al sitio del OAN-SPM como el sitio con noches más claras de todo el hemisferio norte (Tapia 2003).

La velocidad del viento en el sitio tiene un promedio de 3.9 m/s en el día y de 5.3 m/s en la noche (excediendo a veces 11 m/s), con una dirección predominante proveniente del Suroeste. En la noche rara vez proviene del Este y Noroeste según Michel, Hiriart y Chapala (2003).

Resultados del *seeing* y de la turbulencia óptica sobre el suelo pueden ser encontrados en los artículos de Ávila et al. (1998); Echevarría et al. (1998); Conan et al. (2002); Avila et al. (2007); Sánchez et al. (2007) y Ávila et al. (2011), también respecto al modelaje de la atmosfera por Masciadri & Garfias (2001); Masciadri et al. (2003), Vogiatzis & Hiriart (2004). Han sido realizados estudios de la extinción y opacidad por Schuster y Parrao (2001); Hiriart (2003) y Parrao y Schuster (2003). Se realizaron análisis del sitio SPM por Sohn (2007) y Bohigas et al. (2008). Pueden ser encontradas

revisiones en los artículos de Cruz-González et al. (2003, 2004); Tapia et al. (2007) y Wehinger (2007).

Los primeros trabajos sobre las condiciones locales de *seeing* en el OAN-SPM se llevaron a cabo por Mendoza (1971) y por Walker (1971). Varios estudios recientes se han llevado a cabo por Echevarría et al. (1998), Conan et al. (2002) y Michel et al. (2003). Estudios de turbulencia óptica han sido realizados por Ávila et al. (1998), Ávila et al. (2004), Ávila et al. (2006), Ávila et al. (2007) y Ávila et al. (2011). Una revisión completa de algunos de estos estudios se puede encontrar en Echevarría (2003).

Estudios del *Seeing* en el OAN-SPM

Las observaciones de Echevarría et al. (1998) se obtuvieron con dos monitores de *seeing* y una torre con un arreglo que mide micro-variaciones de temperatura: “Micro Temperature Array” (MTA); el Telescopio de estudios de sitio (STT) del Steward Observatory fue diseñado para observar la estrella Polar, mientras que el monitor de Carnegie (CM) podía observar y rastrear cualquier estrella.

El MTA consistía en detectores de platino, que miden las diferencias de temperatura y están ubicados en diferentes alturas, de 4 a 28 m. Echevarría et al. (1998) reportó una mediana del *seeing* de 0.61 segundos de arco con un primer cuartil de 0.50 segundos de arco y una disminución de 0.1 segundos de arco a una altura de 15 m. Las observaciones del STT cubrieron 386 noches, mientras que las observaciones del CM cubrieron 114 noches, durante un período de tres años. Un resumen de estos resultados se muestra en la Tabla 2.2.

Conan et al. (2002) midieron la escala externa de frente de onda e incluyeron datos con mediciones de un Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen (DIMM); obtuvieron observaciones durante 31 noches. El telescopio se localizó en dos lugares: en la torre del CM y en una ubicación baja altitud. Ellos encontraron una distribución bimodal durante su campaña de diciembre del 2000, con picos centrados en 0.50 y 0.75 segundos de arco, y una media total de 0.77 segundos de arco, incluyendo todas las observaciones realizadas durante el período de 31 noches.

Michel et al. (2003) realizaron un estudio con el mismo dispositivo DIMM durante 123 noches en un período de casi tres años. El monitor se encontraba en la torre del CM a una altura de 8.3 m. Se informó de una mediana de 0.62 segundos de arco y un primer cuartil de 0.49 segundos de arco.

Sánchez L. J. et al. (2003) realizaron un estudio de la turbulencia de la capa superficial usando siete pares de sondas micro-termales, ubicadas en diferentes niveles de un mástil de 15 m. Las mediciones fueron realizadas en 9 noches de Mayo y 4 noches de Agosto del año 2000. Se incorporaron las mediciones del DIMM simultáneamente con las obtenidas por el mástil instrumentado. Encontraron que la turbulencia localizada entre 2.3 y 15 m representa alrededor del 16% de la turbulencia óptica de la atmósfera completa (de 2.3 m en adelante).

Skidmore et al. (2009) han analizado los datos recabados por el proyecto de selección de sitio del TMT de cinco sitios diferentes. Para el OAN-SPM obtuvieron una cobertura parcial (octubre de 2004 a febrero de 2008). Los valores del *seeing* fueron de 0.58 segundos de arco para la Capa Superficial (desde el suelo hasta 500 metros), 0.37 segundos de arco por la atmósfera libre (>500 m en adelante) y 0.79 segundos de arco para toda la atmósfera.

En cuanto a perfiles de turbulencia óptica, Ávila et al. (1998, 2004) han analizado la distribución vertical de la turbulencia óptica utilizando un equipo SCIDAR Generalizado (SG). Se han llevado a cabo dos campañas de observación en el OAN-SPM en 1997 y 2000. En 1997, el SG fue instalado en los telescopios de 1.5 m y 2.1 m (SPM1.5 y SPM2.1) durante ocho noches de marzo y tres noches de abril, mientras que en 2000 el instrumento fue instalado nueve y siete noches (mayo) en el SPM1.5 y SPM2.1, respectivamente. Se obtuvieron velocidades medias para el viento en diferentes estratos; 2 – 5 km (2.3 m/s), 5 – 10 km (11.3 m/s), 10 – 17 km (24.4 m/s), 17 – 25 km (9.2 m/s). Aunque la velocidad media reportada puede ser considerada como el límite inferior.

Ávila et al. (2011) realizaron una recalibración del perfil de $C_n^2(h)$ obtenido en el OAN-SPM, para la reducción de datos obtenidos por el método del SG (Ávila & Cuevas 2009). De un análisis estadístico, Ávila et al. (2011) han encontrado que la turbulencia

óptica es sistemáticamente mayor en los primeros dos kilómetros que en el resto de la atmósfera. La Tabla 2.2 muestra una síntesis de los resultados con monitores no diferenciales (STT y CM), diferencial (DIMM) y monitoreo SCIDAR.

Método	Referencia	1 ^{er} Cuartil (arcsec)	Mediana (arcsec)	3 ^{er} Cuartil (arcsec)	Noches
STT	Echevarría et al. (1995)	0.5	0.61	-	386
CM	Echevarría et al. (1995)	0.48	0.63	-	99
CM/STT	Echevarría et al. (1995) Simultáneos	0.46	0.58	-	57
DIMM	Conan et al. (2002) Distribución Bimodal	-	0.50; 0.75	-	14
DIMM	Conan et al. (2002)	0.61	0.77	0.99	31
DIMM	Michael et al. (2003)	0.48	0.6	0.81	123
MASS-DIMM	Skidmore et al. (2009) (Campaña 2004 oct - 2008 feb)	0.61	0.79	1.12	-
SciDAR	Ávila et al. (2011)	0.5	0.68	0.97	27

Tabla 2.2.- Resultados de monitoreo de *seeing* en el OAN-SPM

2.4. Instrumentación utilizada durante la Campaña Astroclimatológica del TMT

Monitor Diferencial de Movimiento de Imagen (DIMM)

El Monitor Diferencial de Movimiento de Imagen (DIMM por sus siglas en inglés: Differential Image Motion Monitor), es usado para el análisis de un par de imágenes de una misma estrella, obtenidas al mismo tiempo, tomando series de fotos rápidas (integrando fracciones de segundo) en las cuales se mide la diferencia en las posiciones de las imágenes y se calcula la varianza de las mismas.

Un instrumento DIMM clásico consta de un telescopio de unos 35 cm de abertura en cuya pupila se instala una máscara con 2 subpupilas de unos 10 cm de diámetro (ver Figura 2.1). Una de las subpupilas tiene un prisma que desvía la imagen dando como resultado la formación de 2 imágenes del mismo objeto en el detector. El interés de medir la diferencia del movimiento de las dos imágenes radica en el hecho de que de

esta manera se eliminan los movimientos comunes provenientes por vibraciones o del telescopio.

Los equipos DIMM fueron encargados a la compañía Teleskoptechnik Halfmann y colocados sobre torres a 7 m de altura del suelo. Comparten montura con el Detector de Centelleo de Apertura Múltiple (MASS), construido en colaboración entre el Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo y el Grupo MASS en el Instituto Astronómico Sternberg de la Universidad de Moscú en Rusia.

El equipo DIMM se usa mayormente para medir el *seeing* atmosférico, pero también puede medir otros parámetros astroclimatológicos como el ángulo isoplanático, el tiempo de coherencia de la turbulencia óptica y la transparencia atmosférica. En la Tabla 2.3 se enlistan todos los parámetros obtenidos para el estudio del TMT con el instrumento DIMM, con sus unidades y explicaciones (Tokovinin et al. 2002).

Descripción del método usado por el DIMM

El método DIMM infiere la longitud de coherencia atmosférica, r_0 a partir de la determinación estadística (n = número de mediciones) de la varianza (σ^2) de la distancia entre los centroides del sistema binario de imágenes, generadas por la misma estrella.

El cálculo de la varianza de los fotocentros surge de la separación de centroides y la diferencia de inclinación en los frentes de onda, que pasan por dos entradas circulares de mismo diámetro S (Sarazin & Roddier, 1990), separados por una distancia d entre sí, a modo de una máscara Hartmann, ubicada en el plano de la pupila de entrada de un telescopio con diámetro de apertura D .

En el DIMM, el frente de onda que alcanza la máscara se divide por medio de una cuña óptica colocada en uno de los orificios. Es la responsable de la formación de la imagen doble que se proyecta en el plano focal del telescopio. Cada disco de la estrella que se observa en una exposición corresponde a la porción del frente de onda que alcanza cada uno de los orificios de la máscara.

Las fluctuaciones de la distancia de separación de centroides de los discos se asocian únicamente con la diferencia del ángulo de inclinación local del frente de onda. Dado que el prisma introduce una inclinación constante en el frente de onda en la dirección X

que separa ambas subaperturas, el instrumento calcula la varianza de las diferencias de inclinación del frente de onda de las distancias en los ejes X y Y (longitudinal y transversal respectivamente) introducida por las fluctuaciones atmosféricas.

Descripción	Unidades	Comentario
<i>Seeing</i> (6-pts).	arcsec	<i>Seeing</i> corregido al zenit para la longitud de onda de 500 nm y extrapolada a 0 ms para 6 diferentes tiempos de exposición, [-6, 12, 18, 24, 30, 36 ms] usando una función exponencial. Esta es la medida preferida para el DIMM.
<i>Seeing</i> (2-pts).	arcsec	<i>Seeing</i> corregido al zenit para la longitud de onda de 500 nm y extrapolada a 0 ms para 6 diferentes tiempos de exposición, [-6, 12 ms] usando la extrapolación de Tokovinin (2002).
Índice de Strehl.	n/a	Índice de Strehl promedio entre dos estrellas en el CCD DIMM. Nótese que debido a un error en el código, el valor del índice de Strehl tiene errores por un factor multiplicativo.
Masa de aire	n/a	Masa de aire en la observación del DIMM.
ID de la estrella.	n/a	Identificador (ID) de la estrella seguida en el formato 'XXX XXX', por ejemplo, 'Alp Eri'.
Tiempo de exposición.	ms	Tiempo de exposición de las imágenes individuales por el DIMM. El valor de este parámetro es de 5 ms para todos los datos de la base de datos. Esto sin embargo es una exposición definida por los archivos de configuración. La exposición real es de ~6 ms.
Número de exposiciones válidas.	n/a	Número de exposiciones de una dimensión (1d) del DIMM usadas para la medida. Las exposiciones son verificadas con el flujo de la estrella, su posición, etc. antes de ser usadas en el cálculo del <i>seeing</i> .
Número de todas las exposiciones.	n/a	Número de exposiciones de una dimensión (1D) del DIMM tomadas, 6000 para todo resultado en esta base de datos.
Flujo estelar medido.	Cuentas	Flujo integrado para las dos imágenes estelares, promediado para todas las exposiciones (1D) válidas del DIMM.
Flujo de fondo medido.	Cuentas por píxel	Promedio del nivel de fondo para las exposiciones validas (1D) del DIMM.
Flujo máximo.	CCD cuentas	Flujo de los píxeles más luminosos en las imágenes estelares, promediado para todas las imágenes (1D) validas del DIMM.
Índice de centelleo.	n/a	Índice de centelleo para el flujo integrado para todas las exposiciones (1D) válidas del DIMM.
Posición promedio.	píxel	Promedio de la posición estelar del centroide de la imagen (1D) de las exposiciones del DIMM.
Promedio separación estrella	píxel	Promedio de separación entre las dos imágenes.
Inicio/Final posición estrella	píxel	Posiciones iniciales y finales de las dos estrellas en el CCD. Es usado para verificar el desempeño del telescopio.

Tabla 2.3.- Parámetros obtenidos por el instrumento DIMM (Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen), descripción, unidades y comentarios (http://sitedata.tmt.org/Available_data/data_fields.html).

Las varianzas longitudinal σ_l^2 y transversal σ_t^2 del movimiento de las imágenes se relacionan con el parámetro de Fried r_0 .

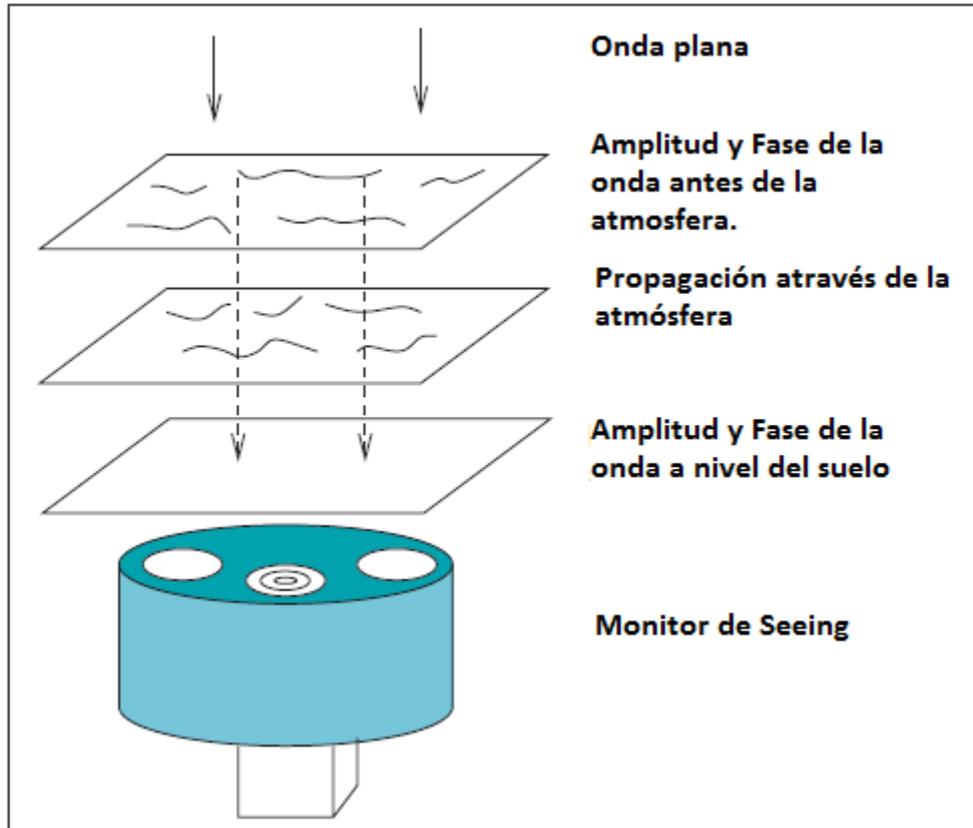


Figura 2.1.- Diagrama del Monitor de Seeing (DIMM-MASS), con explicación de su funcionamiento aproximado.

Detector de Centelleo de Apertura Múltiple (MASS)

En el caso de la instrumentación utilizada para las campañas de estudio de sitio del TMT, el Multi-Aperture Scintillation Sensor (MASS) o Detector de Centelleo de Apertura Múltiple, se encuentra integrado en el mismo instrumento que el DIMM. El MASS se construyó por la colaboración del Observatorio Inter Americano de Cerro Tololo (CTIO) y el Grupo "MASS" del Instituto Astronómico Sternberg de la Universidad Estatal de Moscú Rusia.

El MASS produce medidas del perfil de turbulencia óptica en seis capas atmosféricas, excluyendo los primeros cientos de metros. Las capas están centradas alrededor de

0.5, 1, 2, 4, 8 y 16 km de elevación. Integrando sobre los perfiles se obtiene el “*seeing*” y el ángulo isoplanático.

La intensidad de la turbulencia cercana al suelo (Capa Superficial) se puede calcular por la diferencia entre el *seeing* medido con el DIMM y el determinado por el MASS. Para la selección del sitio del TMT, el MASS también fue usado para determinar el tiempo de coherencia de la turbulencia y la presencia de nubes.

Descripción	Unidades	Comentario
Intensidad de la capa	m ^{1/3}	Intensidad de las capas en el MASS (nótese que es Cn2*dh, no Cn2) cuando se usa un perfil de 6 capas con diferentes altitudes.
<i>Seeing</i> del perfil Cn2.	arcsec	<i>Seeing</i> de atmósfera libre, calculado con los valores de fixed_cn2. Ésta es la medida más confiable del MASS.
Momentos de turbulencia a atmósfera libre.	arcsec	<i>Seeing</i> de atmósfera libre, calculado directamente de los momentos de turbulencia. Esto sirve cuando la restauración del perfil Cn2 falla (o si su error de estimación es muy alto), pero usualmente es menos confiable que fixed_seecn.
Ángulo Isoplanático	arcsec	Ángulo Isoplanático calculado por los momentos de turbulencia. Es recomendado que no se use.
Tiempo de coherencia para momentos de turbulencia.	ms	Tiempo de coherencia de turbulencia es calculado por los momentos de turbulencia. Esta es la mejor estimación para tau0 disponible para el MASS, pero requiere más procesamiento.
Altitud de capa.	km	Alturas de las capas observadas por el MASS usando el perfil de 6 capas, con diferentes alturas, usando siempre 0.5, 1, 2, 4, 8 y 16 km.
Modelo flotante para intensidad de la capa.	m ^{1/3}	Intensidad de las capas observadas por MASS (nótese que es Cn2*dh, no Cn2) cuando se usa el perfil de 3 capas a altitudes variables.
Modelo flotante para altura de capa.	km	Alturas de las capas del MASS, al usar un perfil de 3 capas, a alturas variables.

Tabla 2.4.- Parámetros obtenidos por el instrumento MASS (Sensor de Centelleo de Apertura Múltiple), descripción, unidades y comentarios (http://sitedata.tmt.org/Available_data/data_fields.html).

Los datos obtenidos de la base de datos del MASS, fueron procesados tomando en cuenta el efecto del centelleo y se corrigieron los parámetros de análisis. En la Tabla 2.4 se enlistan todos los parámetros obtenidos para el estudio del TMT con el instrumento MASS. Se dan unidades y explicaciones, extraídos de http://sitedata.tmt.org/Available_data/data_fields.html.

Descripción del método del MASS

El MASS se basa en el análisis espacial de la intensidad de las fluctuaciones al nivel del suelo para realizar mediciones. La escala espacial del centelleo “speckle” producido por la turbulencia a distancia z cenital es del orden del radio de Fresnel $r_f = \sqrt{\lambda z}$ y es de alrededor de 10 cm para una propagación de 10 km (Roddier 1981). El espectro alcanza el máximo espacial de la frecuencia $|f| \approx r_f^{-1}$.

El MASS consta de cuatro aperturas anulares concéntricas con diámetros que van desde los 2 cm a un diámetro externo de 8 cm, en las cuales la luz de una estrella brillante es detectada. El tamaño de las aperturas es del orden de r_f y pueden actuar en conjunto como un filtro espacio-temporal, permitiendo resolver el centelleo originado a diferentes altitudes.

La adquisición de las cuentas de fotones tiene un tiempo de exposición de ~ 1 ms y es procesado calculando 10 índices de centelleo S^2_A para cada apertura A y 6 índices diferenciales S^2_{AB} por pares de apertura, A y B. La fórmula para calcular los índices y sustraer el sesgo causado por el ruido de los fotones está dada por Tokovinin et al. (2003). Los índices S^2_A y S^2_{AB} son iguales a la variancia de los logaritmos naturales $\log I_A$ y $\log(I_A / I_B)$ en el límite de las fluctuaciones pequeñas de la intensidad de la luz, I_A y I_B , $s^2 \approx 1$.

La teoría de turbulencia por lo general opera con un logaritmo de la variancia. Aunque, se midieron las cuentas de fotones, que pueden ser cero y fluctuar aun con luz constante, los índices deben ser calculados de las varianzas normales (no logarítmicas).

A partir de la teoría de pequeñas perturbaciones, se obtiene una relación lineal entre los índices observables y el perfil de turbulencia,

$$s^2_k = \int W_k(z) C_n^2(z) dz \quad (2.1)$$

donde la función “peso” o “Weighting function” (W_k), describe la respuesta de una apertura o combinación k de apertura a una altura dada. Para una turbulencia de la forma descrita por Kolmogorov, la W_k depende sólo de la abertura geométrica y del espectro detectado de la radiación (Tokovinin 2002b, 2003). Un índice del diámetro D_A de apertura normal corresponde al filtrado de bajo nivel del centelleo, $|f| < 1/D_A$ donde un índice diferencial corresponde al filtro espacial con $1/D_B < |f| < 1/D_A$. El dispositivo MASS con sus aberturas anulares y concéntricas, es sensible a la turbulencia en escalas centimétricas donde el modelo de Kolmogorov es el adecuado.

Se ha mostrado que el índice diferencial en dos aberturas anulares concéntricas es casi independiente de la propagación a distancia z para $z > z_{AB} = D_{AB}^2 / \lambda$ donde $D_{AB} = (D_A + D_B) / 2$ es el promedio de abertura del diámetro (Tokovinin 2002, 2003).

Esto significa que el índice de centelleo da una medida directa de la turbulencia integrada proporcional al *seeing* producido a distancias mayores a z_{AB} . Por otro lado, los índices normales de centelleo aumentan como z^β , con $\beta = 5/6$ para distancias cenitales pequeñas como $z \ll D^2 / \lambda$ y $\beta = 2$ para $z \gg D^2 / \lambda$ (Roddiér 1981). De acuerdo con un mayor centelleo producido por capas superiores de la atmósfera.

El siguiente paso usa las funciones WF conocidas, los 10 índices ajustados al modelo de 6 capas turbulentas con alturas h_i de 0.5, 1, 2, 4, 8 y 16 km, y parámetros J_i dados por las integrales de turbulencia en cada capa (Tokovinin et al. 2003). La turbulencia es distribuida de manera continua en la altura expresada por un perfil $C_n^2(h)$. Las integrales J_i dadas por el dispositivo MASS son aproximadamente iguales a $\int C_n^2(h) R_i(h) dh$, donde las funciones de respuesta $R_i(h)$, asemejan triángulos en el cartesiano $\log h$ centrado en h_i (Tokovinin et al. 2003). La suma de todas las funciones de respuesta $R_i(h)$ es cercana a 1 para $h > 0.5$ km.

Seeing de la Capa Superficial “Ground Layer”

El instrumento DIMM es sensible a la turbulencia óptica integrada desde la altura del telescopio y hasta el infinito (normalmente capas a más de 20 km tienen una contribución cercana a cero). Así, todas las capas de turbulencia a las diferentes alturas y en un momento dado se suman (integran) para dar el valor de *seeing* determinado por el DIMM.

El *seeing* determinado por el instrumento MASS, proviene de una combinación pesada con el algoritmo de análisis donde el perfil de sensibilidad y el camino óptico da una sensibilidad nula hasta los 250 m arriba del telescopio, y aumenta linealmente hasta un máximo de sensibilidad que se mantiene después de los 500 m (Skidmore et. al., 2009).

De la diferencia del *seeing* medido por el DIMM y aquel medido por el MASS se puede determinar la contribución al *seeing* de los primeros 500 m a partir del suelo (Els et. al., 2009), siendo llamado este: *seeing* de la capa superficial, *seeing* de la capa límite o Ground Layer *seeing*, ε_{GL} :

$$\varepsilon_{GL} = (\varepsilon_{DIMM}^{5/3} - \varepsilon_{MASS}^{5/3})^{3/5}. \quad (2.2)$$

Cabe notar que puede suceder que se obtengan valores donde el *seeing* del MASS resulta mayor al medido por el DIMM, lo que no tiene sentido físico por lo que no se toman en cuenta para la estadística.

La determinación del *seeing* de la capa superficial es posible si los datos de los dos instrumentos (DIMM-MASS) son tomados aproximadamente de manera simultánea. En el caso de la campaña del TMT, el DIMM realizó integraciones de luz de aproximadamente de 36 segundos, mientras que el MASS tomó mediciones de 60 segundos. Incluyendo el tiempo de procesamiento se tienen medidas simultáneas aproximadamente cada 70 a 90 segundos. Debido a que el CCD del DIMM fue usado para adquirir la estrella de guiado, para 95% de las medidas del MASS, las medidas Simultáneas se realizaron aproximadamente cada 60 segundos.

El conocimiento del *seeing* para la capa superficial nos da una estimación de la contribución de las capas inferiores de la atmósfera a la de turbulencia óptica, y su estudio puede ser fundamental para comprender y mejorar la calidad de las imágenes astronómicas utilizando técnicas como la llamada Óptica Adaptativa.

En el siguiente capítulo detallaremos la cobertura temporal de datos de “*seeing*” obtenidos recientemente en el OAN-SPM y compilados en una base de datos por el proyecto TMT. Dichos datos incluyen medidas del DIMM y del MASS.

CAPÍTULO III: Datos Astroclimatológicos del OAN-SPM obtenidos durante la Campaña de selección del sitio del TMT

Todos los datos obtenidos por el consorcio TMT están disponibles en la base de datos pública, que se encuentra en <http://sitedata.tmt.org/>. En particular nos interesamos por los datos de *seeing* obtenidos con los instrumentos DIMM y MASS. Estos datos fueron descargados y analizados mediante una serie de programas desarrollados por nosotros usando la herramienta de programación y visualización de datos IDL (Interactive Data Lenguaje).

Se programaron diversos algoritmos que permitieron la clasificación, análisis estadístico y presentación gráfica de los resultados. Inicialmente se hizo un análisis de la cobertura temporal en cantidad de datos y en porcentaje (día, mes, año, estación y de manera global). Posteriormente se realizaron análisis estadísticos entre los que se incluyen mediana, promedio, dato mínimo, dato máximo, primer y tercer cuartil y desviación estándar de la muestra.

Para el análisis de datos, la graficación se hizo tanto para los datos individuales, como para los datos por día, mes, año y estación. Al graficar se incluyeron barras de error y éstas fueron tomadas por el 1^{er} y 3^{er} cuartiles de las Funciones de Distribución de Acumulación o CDFs. Recordemos que el 2^{do} cuartil representa la mediana de la medida.

3.1 Cobertura de Datos (DIMM, MASS y Simultáneos)

Para saber qué tan significativos son los datos de *seeing* presentados en este estudio y para conocer su verdadero peso estadístico, procedimos a determinar el porcentaje de cobertura de datos obtenidos con los instrumentos DIMM y MASS. Fue necesario calcular la duración de la noche total respecto a cada día del año. Recordemos que la duración del día-noche está dada por las variaciones de insolación intrínsecas, que se presentan durante las distintas estaciones del año y para un sitio geográfico particular.

Para calcular la duración de la “noche útil” se descontaron dos horas a la cantidad total calculada a partir de la puesta del Sol y de la salida de éste. Las horas descontadas

corresponden, más o menos, al atardecer y al amanecer astronómicos, en los que la contaminación lumínica proveniente del Sol no permite obtener mediciones con los instrumentos utilizados para determinar el *seeing*.

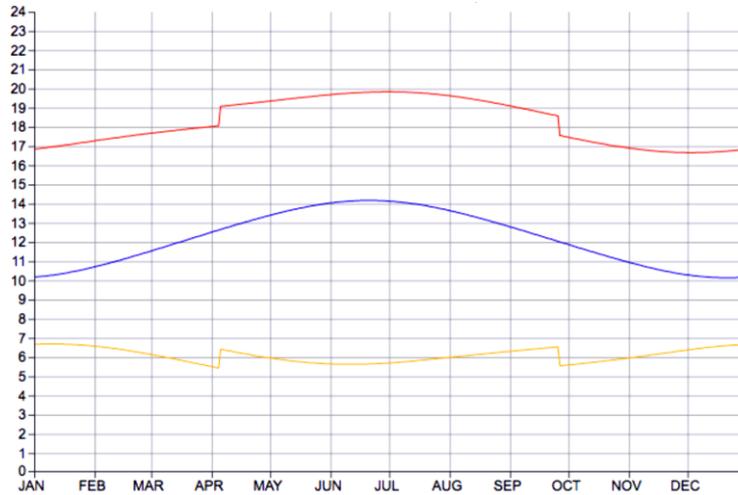


Figura 3.1.- Hora del Amanecer (arriba, rojo), Atardecer (abajo, amarillo) y duración de del día en horas (centro, azul) calculados para cada día del año, en el sitio de San Pedro Mártir, México. Nótese los cambios a horario de verano.

De esta manera pudimos calcular la duración efectiva de cualquier noche con un error de algunos segundos y mediante el uso de un algoritmo se puede estimar la cantidad de mediciones posibles durante una “noche útil” (Figura 3.1).

A continuación procedimos a comparar la cobertura de los datos experimentales obtenidos con la que llamamos “cobertura ideal” calculando un porcentaje de cobertura. Recordemos que la frecuencia con la que se obtiene cada dato (DIMM) es de aproximadamente 90 segundos.

Para fines prácticos, fue necesario redefinir las estaciones del año. Se tomaron meses completos iniciando para cada estación como: Invierno (Enero, Febrero, Marzo), Primavera (Abril, Mayo, Junio), Verano (Julio, Agosto, Septiembre) y Otoño (Octubre, Noviembre y Diciembre).

Datos obtenidos con el DIMM

Con el instrumento DIMM se obtuvo una gran cantidad de medidas de *seeing*. Durante los casi 5 años que permaneció activo el instrumento se tomaron datos de *seeing*

durante 798 noches, abarcando unos 40 meses. La cantidad total de medidas válidas obtenidas fue de 223424. Cabe destacar que esta cantidad corresponde a una cobertura total del 40.18% desde el inicio de las mediciones en Octubre 2004 hasta el final, en Agosto de 2008. En la Tabla 3.1 se muestra la cobertura (por cantidad de datos y por porcentaje) para cada mes, año y estación.

DIMM	2004		2005		2006		2007		2008		Total	
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Enero	-	-	129	0.89	3371	23.06	6263	43.11	0	0.00	9763	16.77
Febrero	-	-	0	0.00	3082	23.48	7767	60.89	4449	35.53	15298	29.97
Marzo	-	-	0	0.00	5740	46.28	5992	46.95	4794	38.88	16526	33.03
Invierno											41587	26.59
Abril	-	-	2846	25.45	8185	74.40	3901	36.39	9557	86.67	24489	55.73
Mayo	-	-	6755	64.87	7640	73.49	8472	81.45	7657	73.57	30524	73.35
Junio	-	-	5740	59.92	6609	68.95	3959	41.38	6233	65.06	22541	58.83
Primavera											77554	62.63
Julio	-	-	628	6.26	5064	50.32	5792	57.66	4155	41.19	15639	38.86
Agosto	-	-	0	0.00	6578	60.26	6174	56.10	642	6.09	13394	30.61
Septiembre	-	-	0	0.00	8361	71.24	0	0.00	-	-	8361	23.75
Verano											37394	31.07
Octubre	6081	45.47	445	3.23	8712	66.12	8612	63.67	-	-	23850	44.62
Noviembre	3887	27.95	10134	73.56	9916	72.05	8004	57.72	-	-	31941	57.82
Diciembre	0	0.00	5165	35.08	5933	40.26	0	0.00	-	-	11098	18.84
Otoño											66889	40.43
Anual	9968	36.71	31842	22.44	79191	55.83	64936	45.44	37487	43.37	223424	40.18

Tabla 3.1.- Cobertura de datos medidos con el DIMM. Cantidad de datos (#) y porcentaje de cobertura (%), para un análisis: mensual, anual, estacional y global.

La Tabla 3.1 indica que el mes de menor cobertura corresponde a Enero de 2005 con solo 129 datos y un porcentaje de 0.89%. El mes de mayor cobertura fue Mayo de 2007 con 8472 datos y 81.45% de cobertura.

Notamos que para el año de 2004 se tienen solo 3 meses de estudio, y el cálculo de la cobertura porcentual se realiza sólo dentro de los meses del estudio, entendiendo los meses anteriores a Octubre de 2004 como de no interés para el porcentaje. Para 2008 el estudio finaliza en el mes de Agosto del mismo, por lo que no existen resultados para fechas posteriores.

El año con menor cobertura corresponde a 2005 con 31842 datos y un porcentaje de 22.44%. El de mayor cobertura fue 2006 con 79191 medidas y una cobertura en porcentaje de 55.83%.

La estación de menor cobertura fue el Invierno con 41587 datos y un porcentaje de 26.59%. La de mayor cobertura fue la Primavera con 77554 datos y 62.63% de porcentaje.

Datos obtenidos con el MASS

Los datos de *seeing* del instrumento MASS, fueron obtenidos en menor cantidad en comparación a los del DIMM. Así las noches con datos corresponden a 616, comprendidos en 35 meses, para un total de 152609 datos.

Recordemos que las mediciones realizadas con el MASS corresponden a la calidad de imagen o *seeing*, debido a la turbulencia atmosférica por arriba de los 500 metros de altura del telescopio hasta las capas atmosféricas más altas (por convención se utiliza altura infinita). Entonces se podría decir que la cobertura de datos medidos para las capas superiores (500 m a infinito) es menor a la del DIMM, que mide la contribución en cuanto a turbulencia óptica de la atmosférica completa.

En la Tabla 3.2 se resume la cobertura temporal de los datos obtenidos con el MASS y se puede apreciar que el mes de menor cobertura corresponde a Enero de 2005 con solo 241 datos y un porcentaje de cobertura del 1.66%. Asimismo el mes de mayor cobertura fue Mayo de 2007 con 7366 datos y 70.86% de cobertura.

El año con menor cobertura corresponde a 2008 con 12270 datos y un porcentaje de 14.49%. El de mayor cobertura fue 2006 con 66087 y un porcentaje de 46.94%.

MASS	2004		2005		2006		2007		2008		Total	
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Enero	-	-	241	1.66	2663	18.22	5768	39.69	0	0.00	8672	14.89
Febrero	-	-	0	0.00	2448	18.65	6451	50.59	2536	20.33	11435	22.39
Marzo	-	-	0	0.00	4669	37.68	4890	38.41	354	2.69	9913	19.69
Invierno											30020	18.99
Abril	-	-	2414	21.64	7283	66.26	3562	33.23	0	0.00	13259	30.28
Mayo	-	-	6164	59.05	6846	65.85	7366	70.86	6106	58.73	26482	63.62
Junio	-	-	5006	52.26	5516	57.54	3266	34.17	3274	34.16	17062	44.53
Primavera											56803	46.14
Julio	-	-	463	4.62	4509	44.80	2294	22.81	0	0.00	7266	18.06
Agosto	-	-	0	0.00	5816	53.28	5837	53.57	0	0.00	11653	26.71
Septiembre	-	-	0	0.00	7641	65.18	0	0.00	-	-	7641	21.73
Verano											26560	22.16
Octubre	5159	38.91	336	2.45	7223	54.69	0	0.00	-	-	12718	24.01
Noviembre	3436	25.52	7428	53.66	6786	49.32	263	1.87	-	-	17913	32.59
Diciembre	0	0.00	3908	26.55	4687	31.80	0	0.00	-	-	8595	14.59
Otoño											39226	23.73
Anual	8595	21.48	25960	18.49	66087	46.94	39697	28.77	12270	14.49	152609	27.89

Tabla 3.2.- Cobertura de datos medidos con el MASS. Cantidad de datos (#) y porcentaje de cobertura (%), para un análisis: mensual, anual, estacional y global.

Datos Simultáneos (usados para la determinación de la Capa Superficial)

Para efectos de este trabajo consideramos que los llamados datos “Simultáneos” corresponden a mediciones del DIMM y MASS que ocurrieron con una separación máxima aproximada de 90 segundos. La obtención de datos simultáneos es muy importante ya que como veremos más adelante, estos datos simultáneos son utilizados para la obtención del *seeing* de la Capa Superficial (*Ground Layer Seeing*).

La cobertura en noches con alguna medición fue de 600, y se extienden durante 32 meses con una cantidad de datos medidos de 145703. Evidentemente la cobertura efectiva es menor a la total de los datos obtenidos por el DIMM o al MASS, esto es

debido a que no siempre funcionaron al mismo tiempo los dos instrumentos, por lo que no fue posible obtener datos de manera simultánea.

Simultáneos	2004		2005		2006		2007		2008		Total	
	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%
Enero	-	-	63	0.44	2613	17.87	5451	37.52	0	0.00	8127	13.96
Febrero	-	-	0	0.00	2394	18.24	6152	48.25	2490	19.97	11036	21.62
Marzo	-	-	0	0.00	4521	36.50	4713	37.02	352	2.68	9586	19.05
Invierno											28749	18.21
Abril	-	-	2399	21.50	7129	64.87	3422	31.92	0	0.00	12950	29.57
Mayo	-	-	5779	55.44	6707	64.52	7156	68.86	5946	57.20	25588	61.51
Junio	-	-	4857	50.70	5331	55.61	3088	32.31	3117	32.52	16393	42.79
Primavera											54931	44.62
Julio	-	-	340	3.42	4134	41.04	1751	17.56	0	0.00	6225	15.51
Agosto	-	-	0	0.00	5625	51.52	4511	41.10	0	0.00	10136	23.16
Septiembre	-	-	0	0.00	7360	62.75	0	0.00	-	-	7360	20.92
Verano											23721	19.86
Octubre	4033	30.45	337	2.45	6941	52.57	0	0.00	-	-	11311	21.37
Noviembre	3259	24.20	7274	52.55	6607	48.02	241	1.72	-	-	17381	31.62
Diciembre	0	0.00	3819	25.94	4451	30.20	0	0.00	-	-	8270	14.04
Otoño											36962	22.34
Anual	7292	18.22	24868	17.70	63813	45.31	36485	26.36	11905	14.05	144363	26.37

Tabla 3.3.- Cobertura de datos Simultáneos medidos con los instrumentos DIMM y MASS. Cantidad de datos (#) y porcentaje de cobertura (%), para un análisis: mensual, anual,

La Tabla 3.3 muestra en resumen la cobertura de datos Simultáneos. Se puede apreciar que el mes de menor cobertura corresponde a Enero de 2005 con solo 63 datos y un porcentaje de 0.44%, así mismo el mes de mayor cobertura fue Mayo de 2007 con 7156 datos y 68.86% de cobertura total.

El año con menor cobertura corresponde a 2008 con 11905 datos y un porcentaje 14.05%. El de mayor cobertura fue 2006 con 63813 mediciones y un porcentaje de 45.31%.

Así mismo la estación de menor cobertura fue Invierno con 28749 datos y un porcentaje de 18.21%. La de mayor cobertura fue Primavera con 54931 datos y 44.62% de porcentaje.

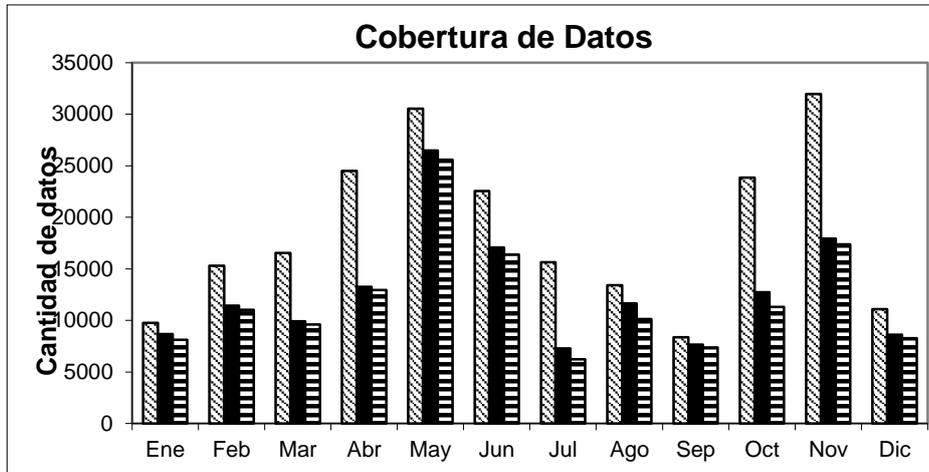


Figura 3.2.- Comparación de la cantidad de mediciones globales realizadas con el DIMM (rayas inclinadas), con el MASS (relleno negro) y medidas Simultáneas (rayas horizontales), correspondientes a la integración para cada mes del estudio.

En la Figura 3.2 se muestra de manera resumida la cantidad de datos obtenidos por los dos instrumentos: DIMM y MASS, así como la cantidad de datos adquiridos de manera simultánea por estos mismos instrumentos. Esta comparación se hace integrada para cada mes del año y para la duración total del estudio del sitio del OAN-SPM llevada a cabo por el TMT. Esta gráfica muestra claramente la “modulación temporal” en la cadencia temporal de obtención de datos debida fundamentalmente a la variación estacional del clima local.

CAPÍTULO IV: Análisis de la Calidad Astroclimatológica del OAN-SPM

4.1. Descripción del Análisis Estadístico Realizado

En este Capítulo se presentan los resultados de la calidad de imagen o *seeing* por medio de estadísticas diarias, mensuales, estacionales, anuales y globales, a partir de los datos recabados por el Proyecto TMT en el OAN-SPM.

En este trabajo se maneja la mediana como principal indicador estadístico para entender el comportamiento del *seeing*. La mediana para un conjunto de valores ordenados, representa la posición central que corresponde al percentil 50 o el segundo cuartil de los datos. Se calcula ordenando de manera ascendente todo el conjunto de datos, o sea construyendo la Función de Distribución de la Acumulación (CDF) de todos los datos y viendo el valor que toma el *seeing* cuando se llega a la mitad de los datos.

La CDF, y por la tanto la mediana, son cantidades que dependen de la muestra. Hay que tener cuidado en la estimación de la mediana ya que si se estima la mediana de cada mes de datos por separado y luego se desea obtener la mediana de las medianas por mes, el valor calculado será distinto, que al tener todos los datos de todos los meses en conjunto y obtener la mediana del total.

Debido a esta característica matemática, el análisis estadístico fue realizado de manera independiente o sea el valor de la mediana de un mes en específico fue tomado por los datos que componen a dicho mes, al igual que para estimar la mediana por estaciones, ésta fue calculada para todos los datos correspondientes a los meses estudiados.

Así, con las mediciones del *seeing* obtenidas por el DIMM y por el MASS se realizó un análisis temporal para tener información estadística completa por Días, Meses, Estaciones, Años y estadísticas globales. En las secciones posteriores se mostrarán ejemplos significativos de cada uno de estos casos.

Para proceder con una muestra comparativa las siguientes gráficas corresponden a los datos del DIMM, MASS y los datos Simultáneos que sirven para calcular el *seeing* de la Capa Superficial. Recordemos que para esto último se calcula la diferencia entre el *seeing* del DIMM y el MASS como fue explicado en el capítulo anterior.

Estadísticas Diarias

Se hizo un análisis detallado de los datos obtenidos día a día. Estas mediciones del *seeing* nocturno se realizaron iniciando normalmente entre las 2 y las 4 hrs (UT) e integrando hasta las 11 y las 14 hrs (TU) – debido a la correspondiente variación de la duración de las noches en el OAN-SPM. Se obtuvieron gráficas para cada noche y para cada instrumento, primero por separado para el DIMM y el MASS y posteriormente se procesaron los datos Simultáneos para obtener el *seeing* de la Capa Superficial. Un ejemplo del tipo de resultados obtenidos se da en la Figura 4.1. En ésta se grafica el valor medio del *seeing* medido por el DIMM, el MASS y calculado para la Capa Superficial en la noche del 27 de Mayo de 2008. Nótese que el eje X corresponde al eje temporal en Tiempo Universal (TU). Recordemos que la hora local para San Pedro Mártir OAN está dada por UT – 8hrs.

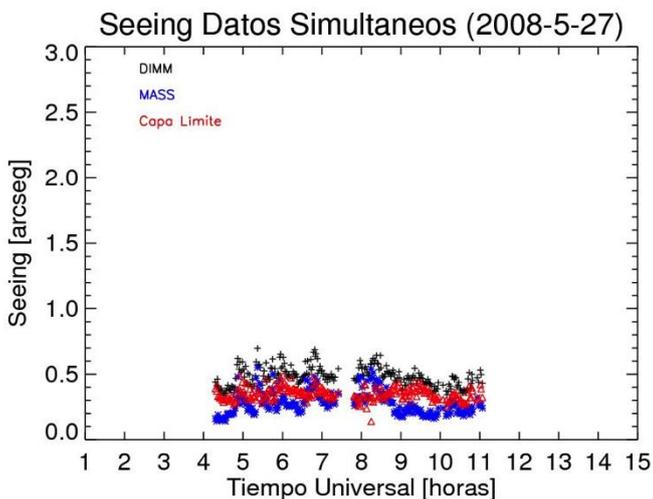


Figura 4.1.- Valor del *seeing* medido con los instrumentos DIMM y MASS y *seeing* calculado con los datos Simultáneos para la Capa Superficial. Datos para la Noche del 27 de Mayo del 2008.

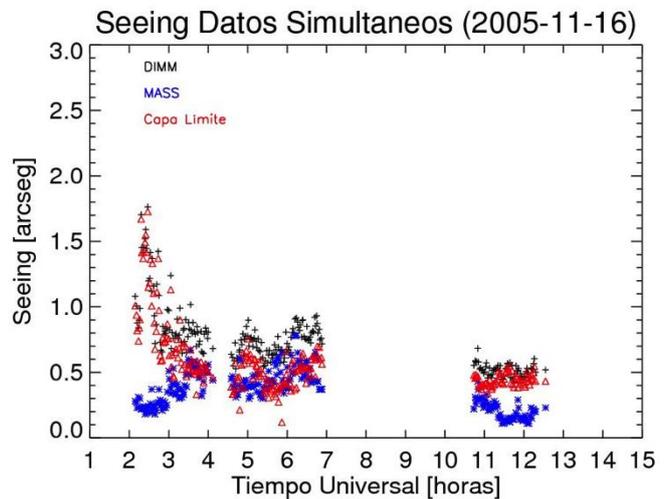


Figura 4.2.- Valor del *seeing* medido con los instrumentos DIMM y MASS y *seeing* calculado con los datos Simultáneos para la Capa Superficial. Datos para la Noche del 16 de Noviembre del 2005.

Se puede notar en este ejemplo (Figura 4.1) que las mediciones del DIMM y del MASS están estrechamente correlacionadas, así como la determinación del *seeing* de la Capa

Superficial, además durante toda la noche se mantiene un muy buen *seeing*. También notamos que entre las 7 y 8 hrs (TU) hay un hueco en el que no hay datos medidos. Esto sucede en muchas de las noches medidas y puede deberse a distintas situaciones: pérdida del guiado estelar, paso de nubes a la hora de la adquisición, o por fallas instrumentales.

Otro ejemplo muestra en la Figura 4.2 que las mediciones del DIMM y del MASS no están correlacionadas y se nota una degradación de la Capa Superficial al inicio de las mediciones (2 a 4 hrs). La continuidad se encuentra interrumpida debido a una ausencia de datos entre las 4 y 5 hrs, posteriormente entre las 7 y casi las 11 hrs.

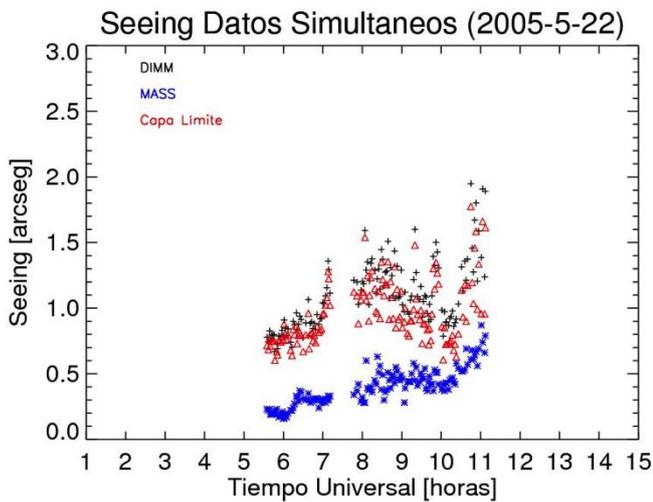


Figura 4.3.- Valor del *seeing* medido con los instrumentos DIMM y MASS y *seeing* calculado con los datos Simultáneos para la Capa Superficial. Datos para la Noche del 22 de Mayo del 2005.

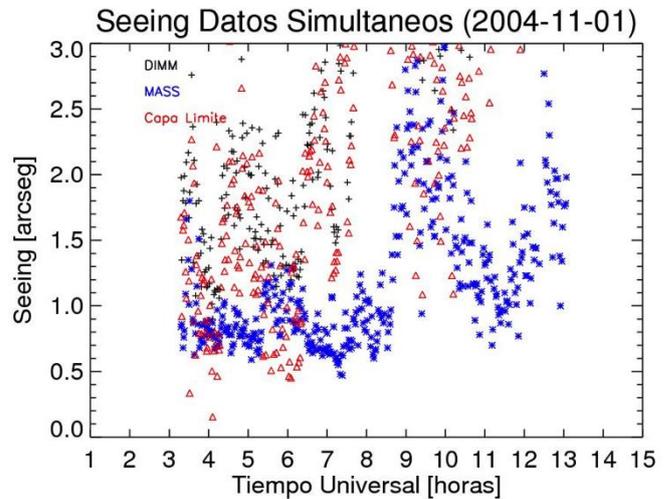


Figura 4.4.- Valor del *seeing* medido con los instrumentos DIMM y MASS y *seeing* calculado con los datos Simultáneos para la Capa Superficial. Datos para la Noche del 1 de Noviembre del 2004.

En la Figura 4.3 se detallan los datos para una noche de verano con pocas mediciones y con una aparente disminución en la correlación de éstos (desde las 9 a 11 horas). Es de notar que al inicio de la noche se presentan buenas condiciones de *seeing*, mientras que hacia el final de la noche hay una degradación importante de éste. En contraste, la Figura 4.4 es de una noche de Invierno en la cual la duración de la noche es mayor, por lo tanto se obtuvieron más mediciones, el *seeing* es malo y se encuentra poco correlacionado. Éste es un ejemplo de una noche de mala calidad de *seeing*.

Estadísticas Mensuales

El estudio mensual se llevó a cabo determinando la mediana del *seeing* medido por el DIMM, el MASS y el calculado para la Capa Superficial. Esto se hizo para cada una de las noches pertenecientes a cada mes del estudio. En las gráficas presentadas a continuación, cada punto representa la mediana de todos los datos que corresponden a una noche de observación y las barras de errores corresponden al primer cuartil y al tercer cuartil de cada estadística del *seeing* nocturno y para cada instrumento.

Podemos notar que si faltan datos en las gráficas mensuales noche a noche es porque no se realizaron mediciones en esas noches particulares. En las figuras también se muestra la cantidad de noches medidas (noches de observación) y el número total de mediciones con el que se realizó la estadística mensual (c.f. Capítulo III para los detalles de cobertura temporal).

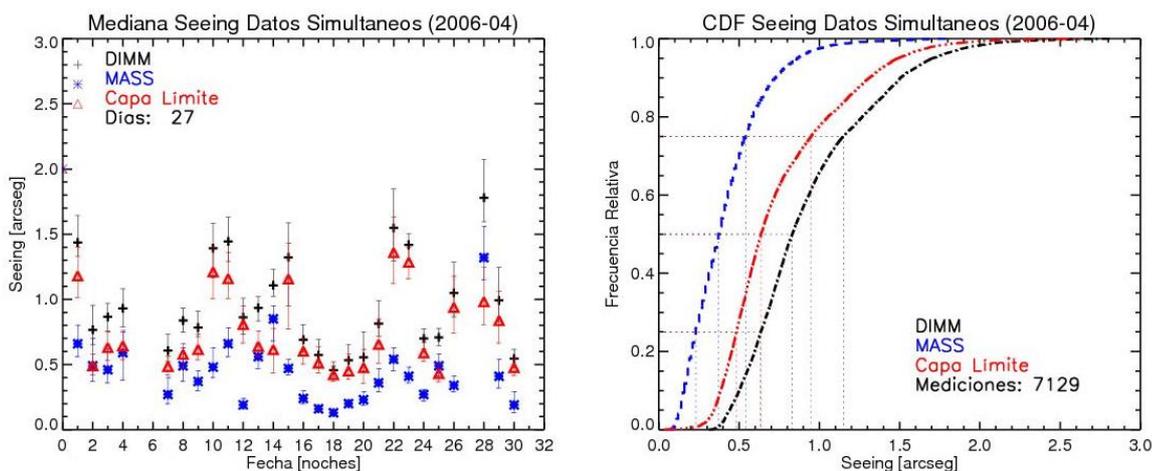


Figura 4.5.- Ejemplo de mediciones obtenidas para el mes de Abril del 2006, Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra Tiempo Universal. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

En la Figura 4.5 se presenta una muestra mensual de muy buena calidad en la cual hubo mediciones en la mayoría de los días del mes, para un total de 7129 mediciones durante 27 noches. En general se tiene una buena correlación de los datos y se puede notar en la gráfica de la CDF una pendiente que asciende rápido, donde las medianas para los tres parámetros analizados (DIMM, MASS, Capa Superficial) se encuentran por debajo del 0.8 arcsec.

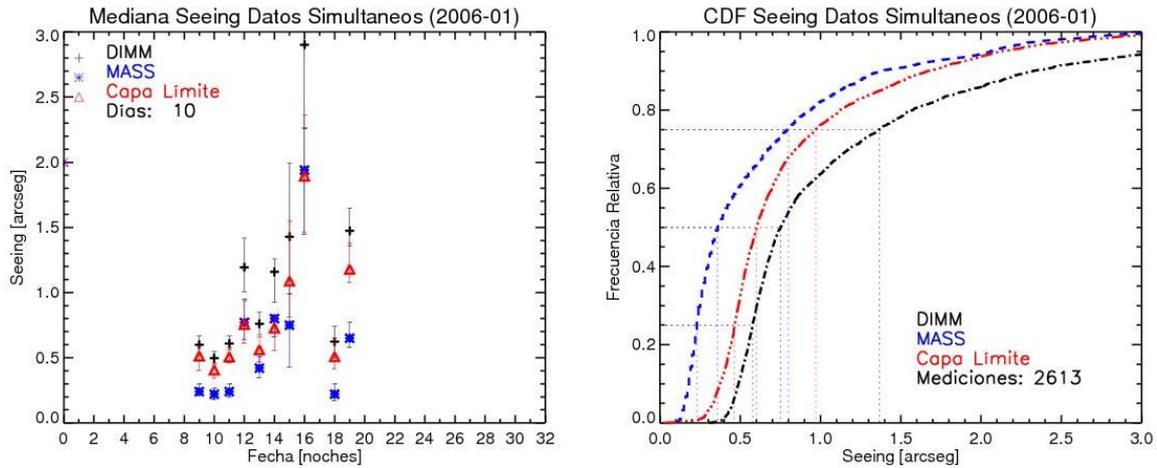


Figura 4.6.- Ejemplo de mediciones obtenidas para el mes de Enero del 2006, Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra Tiempo Universal. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

En la Figura 4.6 se muestra un ejemplo con pocas mediciones para un mes dado. Corresponde al mes de Enero de 2006, con sólo 2613 mediciones durante 10 noches, éstas además presentan una mala correlación. En la CDF se tiene una pendiente que tarda en ascender y cuyas medianas se encuentran muy desplazadas, donde tarda también en llegar a la frecuencia relativa de 1, mucho más que las otras mediciones.

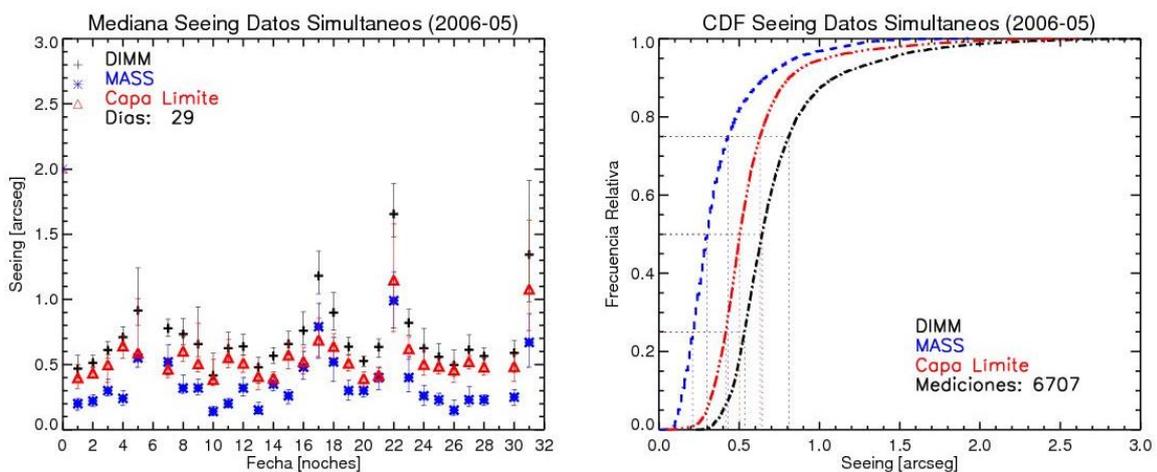


Figura 4.7.- Ejemplo de mediciones obtenidas para el mes de Mayo del 2006, Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra Tiempo Universal. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Otro ejemplo se muestra en la Figura 4.7, con una muy buena muestra ya que tiene mediciones casi todos las noches del mes (27 noches) y con buena calidad de *seeing* para los tres parámetros analizados (DIMM, MASS, Capa Superficial). En la gráfica de la CDF se tiene una pendiente ascendente muy pronunciada, eso quiere decir que las medianas de los parámetros oscilan alrededor de los 0.5 arcsec, siendo un ejemplo de un mes completo con excelente calidad de imagen astronómica.

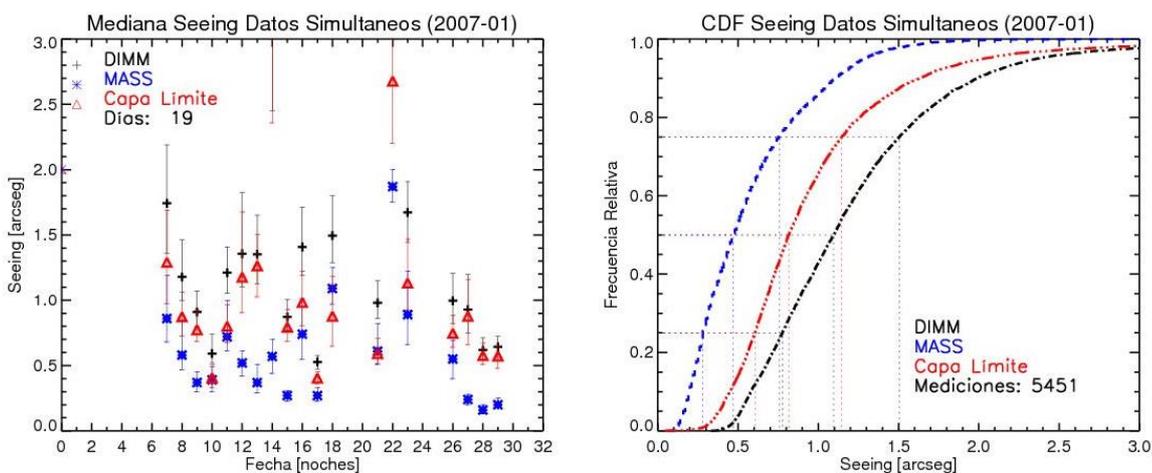


Figura 4.8.- Ejemplo de mediciones obtenidas para el mes de Enero del 2007, Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra Tiempo Universal. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Como muestra de un mes con mal *seeing* (Figura 4.8) el mes de Enero de 2007 presenta una mala correlación y los valores se disparan en algunos casos arriba de los 3 arcsec. La gráfica de la CDF tiene una pendiente de muy lenta ascensión con medianas poco correlacionadas, donde para el MASS se tienen medidas por debajo de 0.5 arcsec y la Capa Superficial por arriba de 1 arcsec.

Estadísticas Estacionales

Las estadísticas estacionales se llevaron a cabo con los datos de *seeing* acumulados de cada mes. Por ejemplo para obtener la estadística de un mes en particular digamos el mes de Abril, se utilizan los datos estadísticos de todos los meses de Abril que se cubrieron durante la campaña: 4 Meses para DIMM y 3 Meses para MASS y Capa Superficial (ver Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 del Capítulo III).

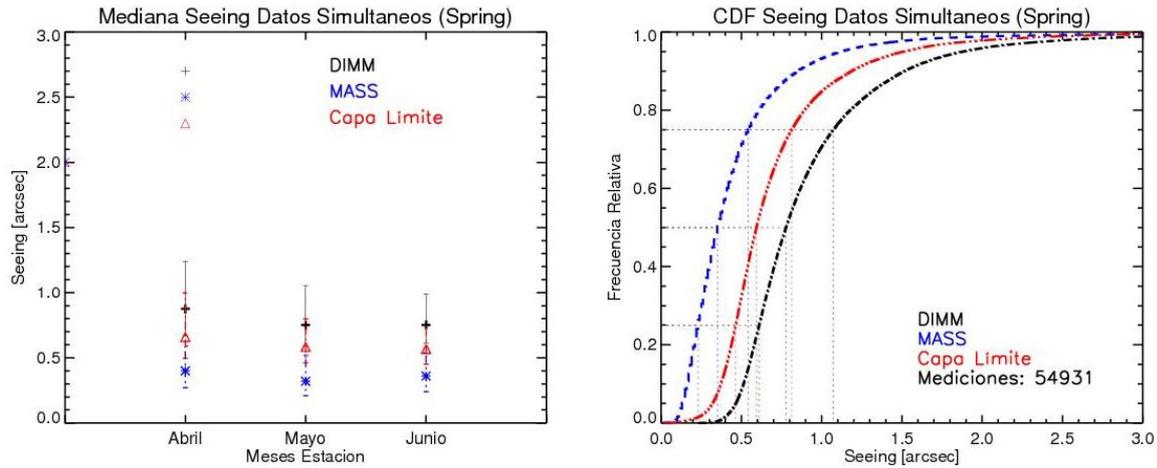


Figura 4.9.- Estación de Primavera (Abril, Mayo, Junio). Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes de la estación. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

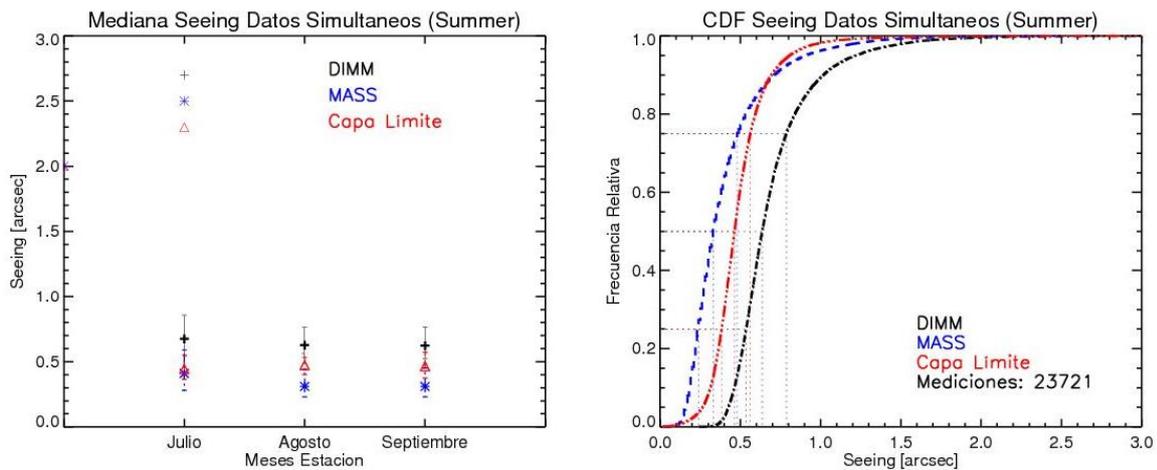


Figura 4.10.- Estación de Verano (Julio, Agosto, Septiembre). Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes de la estación. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Una vez calculadas las estadísticas integradas mes a mes, se obtuvo la estadística para las estaciones (definidas anteriormente). Asimismo, se tienen barras de error definidas por la estadística como el primer y tercer cuartiles. En las siguientes gráficas se puede notar la tendencia del *seeing* para cada mes y estación por estación.

En la Figura 4.9 se muestra el compendio de meses que corresponden a la Estación de Primavera. Se puede notar que el *seeing* fue mejorando ligeramente hacia el mes de Mayo, este puede ser un ejemplo de un estación con buen *seeing* pues presenta una tendencia regular con medianas cercanas a los 0.5 arcsec.

En la Figura 4.10 que corresponde a la Estación de Verano podemos notar que en general se tiene una muy buena calidad de *seeing*, siendo el mes de Agosto el que presenta la mejor calidad de imagen.

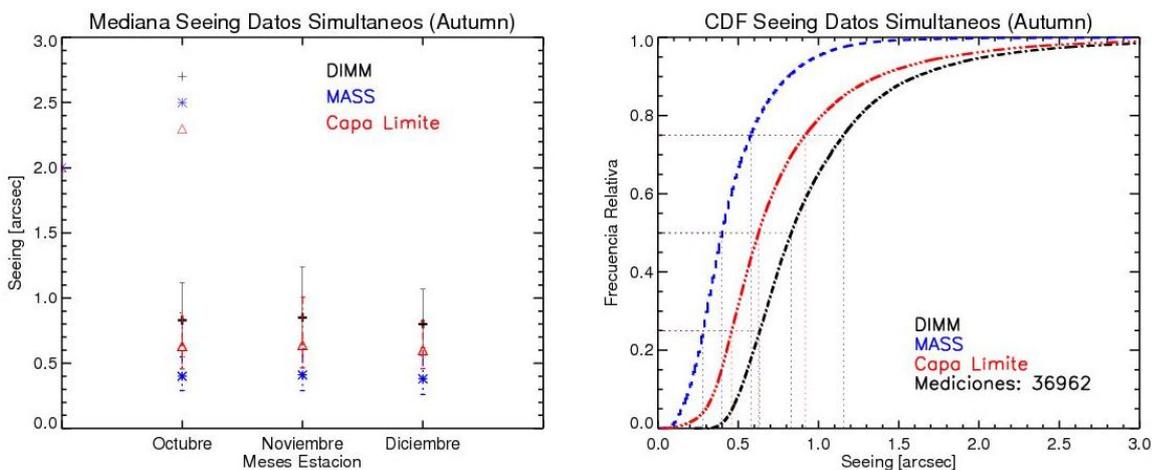


Figura 4.11.- Estación de Otoño (Octubre, Noviembre, Diciembre). Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes de la estación. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Para la Estación de Otoño (Figura 4.11) podemos notar que hay una ligera degradación del *seeing*, donde el mes de Noviembre es el que aumentó más en comparación de los otros meses de la estación. La pendiente de la gráfica de la CDF muestra un incremento lento con lo que podemos notar que las medianas sobrepasan aproximadamente los 0.5 arcsec.

En Invierno (Figura 4.12) aumenta la degradación del *seeing* donde es hasta el mes de Marzo que empieza a mejorar. Aun así, la pendiente de la CDF es lenta y muestra valores de la mediana altos, muy por arriba de 0.7 arcsec en promedio para todos los parámetros.

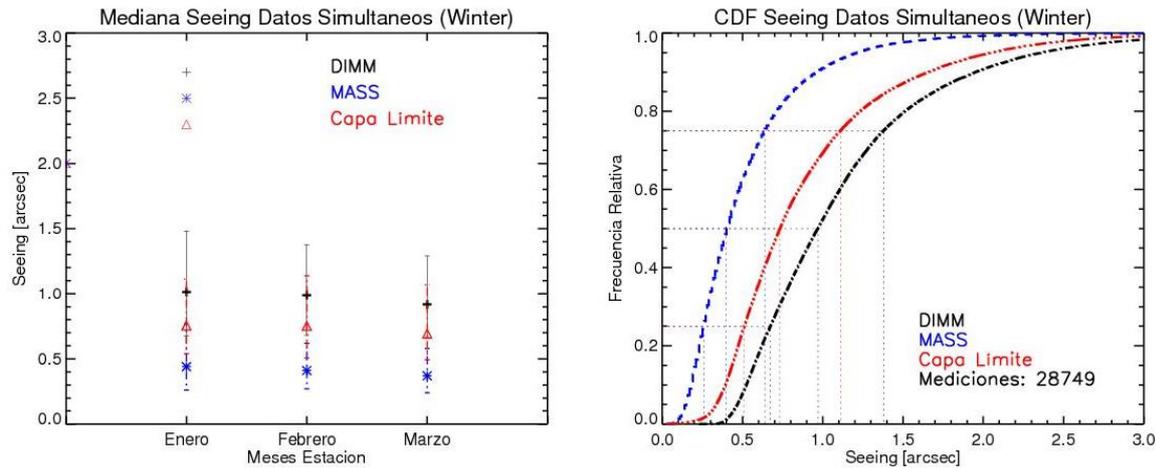


Figura 4.12.- Estación de Invierno (Enero, Febrero, Marzo). Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes de la estación. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Se puede notar que la Estación de Verano es la que tiene mejor *seeing* en contraste con la de Invierno que presenta el peor *seeing*. Por lo general podemos notar que los valores de MASS no sobrepasan los 0.5 arcsec de *seeing* mientras que la Capa Superficial es la más afectada por la climatología estacional.

Estadísticas Anuales

Las estadísticas anuales están representadas por la mediana de todos los valores mensuales. Así, para cada año se calcularon mes a mes las estadísticas (mediana mensual) con sus respectivas barras de error que corresponden a su vez con el primer y tercer cuartil.

El año 2004 (Figura 4.13) es el peor de la muestra ya que sólo comprende 2 meses de estudio aproximadamente con muy pocas mediciones, no se puede ver correctamente una tendencia debido a lo mismo. Evidentemente fue el año con menor cantidad de mediciones (7292).

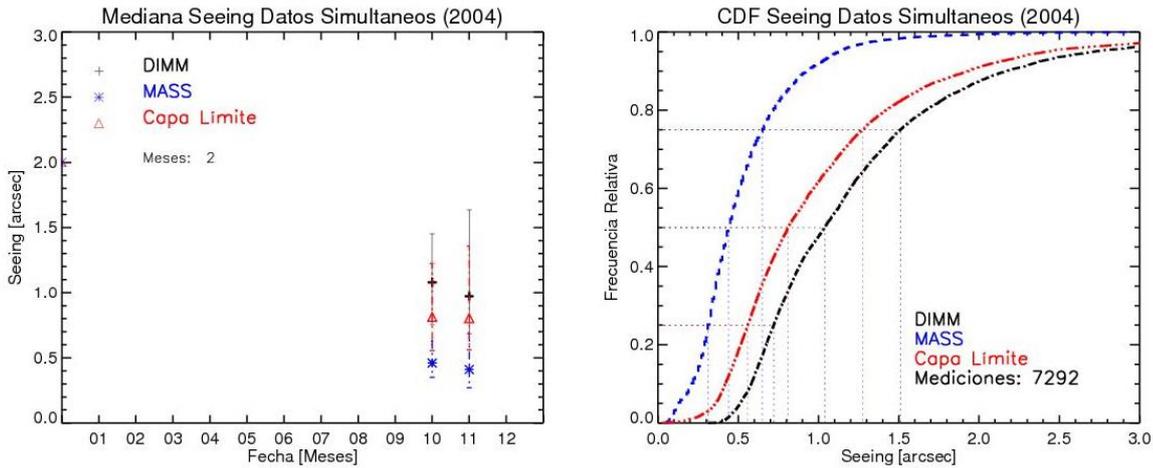


Figura 4.13.- Estadísticas para el año 2004. Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes del año. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

Para las estadísticas obtenidas del año 2005 (Figura 4.15) se tienen sólo ocho meses de estudio, sin embargo permiten visualizar una tendencia del *seeing*. Aunque no tiene una buena correlación ya que en al iniciar el año (Enero) el *seeing* es mayor en las capas superiores repitiéndose esta tendencia a la mitad del año (Julio). En el resto del año se normaliza el *seeing* de las capas superiores y afecta más la Capa Superficial al *seeing* total.

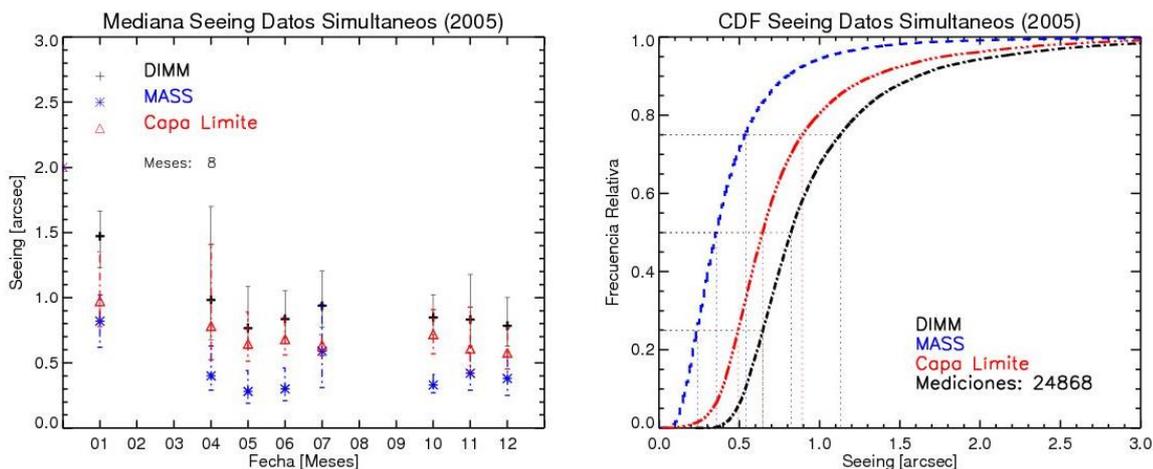


Figura 4.14.- Estadísticas para el año 2005. Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes del año. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

La Figura 4.15, que representa el año 2006, es un ejemplo de un buen año, ya que tiene mediciones en los 12 meses del año. Claramente podemos notar que el mes de Marzo es el que tiene el peor *seeing* más que nada por la contribución de la Capa Superficial. En general presenta una buena correlación todo el año ya que no tiene meses faltantes. Los primeros meses también muestran una muy buena temporada de mediciones desde Mayo (buen *seeing*) y presentan una degradación hacia los meses Noviembre y Diciembre. Fue el año con más mediciones de toda la muestra (63813).

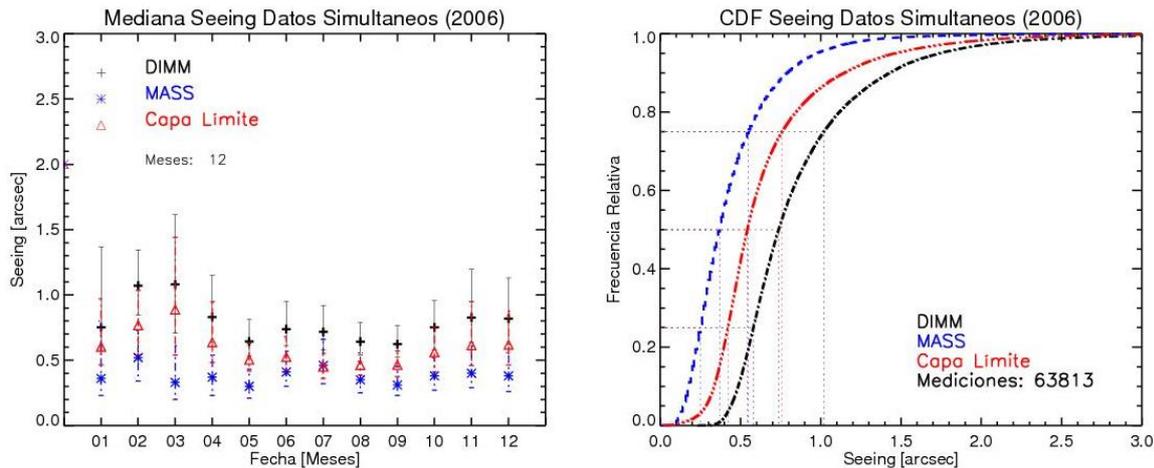


Figura 4.15.- Estadísticas para el año 2006. Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes del año. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

En el año 2007 se tiene una buena correlación, que se pierde hacia el final del año, pues sólo se tienen datos para el mes de Noviembre, por lo que nueve meses de mediciones conforman la muestra. Fue un año que inicia con *seeing* malo y fue mejorando mes con mes hasta un excelente mes de Julio.

En el último año de la campaña (2008) sólo se tuvieron cuatro meses de mediciones (con sólo 11905 datos), por lo mismo no presenta una buena correlación. Se puede notar que al iniciar el año las capas inferiores fueron las que más afectaron el *seeing*, los meses posteriores se equilibran en cuanto a la degradación del *seeing* siendo ésta en toda la atmósfera en general.

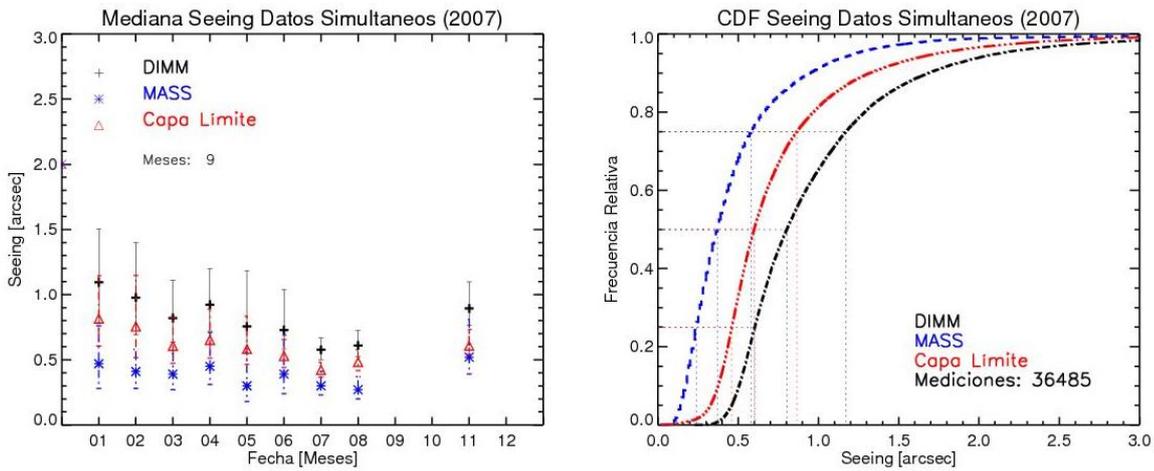


Figura 4.16.- Estadísticas para el año 2007. Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes del año. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

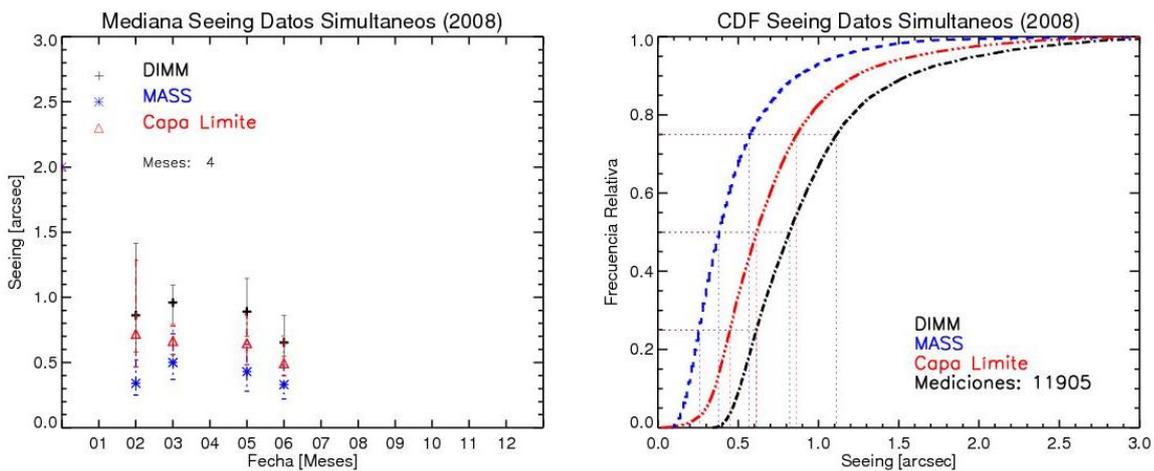


Figura 4.17.- Estadísticas para el año 2008. Medidas de *seeing* Simultáneas obtenidas con el DIMM, con el MASS y determinación del *seeing* para la Capa Superficial. Izquierda: *seeing* contra mes del año. Derecha: Gráficas de la Función de Distribución de Acumulación (CDF) con frecuencia relativa contra *seeing* para cada caso.

4.2 Resultados del Análisis Detallado de los Datos

Seeing medido por el DIMM y el MASS

Se calcularon los valores de la mediana del *seeing* obtenidos por los instrumentos DIMM y MASS para cada mes y a su vez el valor total para todos los meses en cada uno de los años que duró el estudio.

DIMM	2004	2005	2006	2007	2008	Total
	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Enero	-	1.46	0.77	1.1	-	0.99
Febrero	-	-	1.1	1.03	0.77	0.98
Marzo	-	-	1.05	0.87	0.65	0.87
Abril	-	1.01	0.84	0.93	0.84	0.87
Mayo	-	0.78	0.65	0.76	0.92	0.77
Junio	-	0.84	0.76	0.73	0.66	0.75
Julio	-	0.97	0.75	0.62	0.61	0.66
Agosto	-	-	0.66	0.62	0.7	0.64
Septiembre	-	-	0.63	-	-	0.63
Octubre	1.05	0.87	0.74	0.93	-	0.86
Noviembre	0.93	0.81	0.79	0.75	-	0.8
Diciembre	-	0.81	0.85	-	-	0.83

Tabla 4.1.- Mediana mensual del *seeing* [arcsec] y total mensual medidas por el instrumento DIMM durante el lapso que duró el estudio.

En las Tablas 4.1 y 4.2, se presentan los resultados por mes y por año de todas las mediciones de *seeing* (DIMM y MASS) del estudio del sitio llevado por el equipo del TMT en el OAN-SPM.

De acuerdo a las mediciones obtenidas con el DIMM (c.f. Tabla 4.1), el mes que tuvo el mayor valor del *seeing* medido fue Enero de 2005, con una mediana de 1.46 arcsec y corresponde al mes que tuvo una cobertura de sólo 0.89%, siendo el mes de menor cobertura de todo el estudio. Igualmente, podemos notar que corresponde a un mes de Invierno (que recordamos hemos definido para este estudio como los meses completos de Enero, Febrero y Marzo).

El *seeing* mensual más bajo obtenido fue en Julio de 2008, con 0.61 arcsec. En ese mes se tuvo una cobertura de 41.19%. No fue la mejor cobertura ya que ésta fue de 86.67% en Abril de 2008. Así, el mejor *seeing* medido se presentó en un mes perteneciente a la Estación de Verano (definida en este estudio como los meses de Julio, Agosto y Septiembre).

Para el cálculo estadístico total integrado por mes para el DIMM, obtuvimos que el mes de mayor *seeing* fue Enero con 0.99 arcsec con una cantidad total de 9763 datos y

16.77% de cobertura. El de menor *seeing* fue Septiembre con 0.63 arcsec con 8361 datos y una cobertura de 23.75%.

Para las mediciones obtenidas con el MASS (c.f. Tabla 4.2) se obtuvo el valor más grande de *seeing* en el mismo mes de Enero de 2005 con 0.73 arcsec con tan sólo 241 datos y una cobertura de 1.66%, que también corresponde al mes con menor cobertura de todo el estudio y a la estación de Invierno. De igual manera, el menor valor de la mediana del *seeing* para el MASS corresponde a 0.25 arcsec medidos en Agosto de 2007 con una cobertura de 53.57% y un total de 5827 datos, esto comprendido dentro de la Estación de Verano.

Para el cálculo estadístico total integrado por mes para el MASS, la mayor medición de *seeing* fue de 0.46 arcsec en el mes de Enero con 8672 datos y 14.89% de cobertura porcentual. Y el menor valor se dio en Agosto con 0.3 arcsec con un total de 11653 datos y una cobertura de 26.71%.

MASS	2004	2005	2006	2007	2008	Total
	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Enero	-	0.73	0.37	0.48	-	0.46
Febrero	-	-	0.52	0.41	0.35	0.42
Marzo	-	-	0.34	0.39	0.49	0.38
Abril	-	0.41	0.38	0.46	-	0.4
Mayo	-	0.27	0.3	0.31	0.43	0.32
Junio	-	0.3	0.42	0.41	0.34	0.37
Julio	-	0.38	0.48	0.3	-	0.41
Agosto	-	-	0.35	0.25	-	0.3
Septiembre	-	-	0.32	-	-	0.32
Octubre	0.47	0.33	0.38	-	-	0.41
Noviembre	0.42	0.42	0.4	0.52	-	0.41
Diciembre	-	0.38	0.38	-	-	0.38

Tabla 4.2.- Mediana mensual [arcsec] y total mensual medidas por el instrumento MASS durante el lapso que duró el estudio.

Seeing de la Capa Superficial

Es importante recordar que para poder realizar los cálculos del *seeing* de la Capa Superficial es necesario contar con datos Simultáneos tanto del DIMM como del MASS.

Capa Superficial	2004	2005	2006	2007	2008	Total
	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Enero	-	0.97	0.6	0.82	-	0.76
Febrero	-	-	0.77	0.76	0.72	0.75
Marzo	-	-	0.89	0.61	0.67	0.69
Abril	-	0.78	0.64	0.65	-	0.66
Mayo	-	0.65	0.5	0.58	0.65	0.58
Junio	-	0.68	0.53	0.53	0.49	0.57
Julio	-	0.64	0.45	0.42	-	0.45
Agosto	-	-	0.46	0.48	-	0.47
Septiembre	-	-	0.47	-	-	0.47
Octubre	0.81	0.72	0.56	-	-	0.63
Noviembre	0.8	0.61	0.62	0.61	-	0.64
Diciembre	-	0.58	0.62	-	-	0.6

Tabla 4.3.- Mediana mensual [arcsec] y total mensual calculadas para la Capa Superficial durante el lapso que duró el estudio.

Calculamos los valores de la mediana del *seeing* de la Capa Superficial para cada mes y a su vez el total para los meses en todos los años. Este cálculo se realiza a partir de las determinaciones simultáneas obtenidas por los instrumentos DIMM y MASS aplicando la Ecuación 2.2 del Capítulo II.

En la Tabla 4.3 las mediciones mayores del *seeing* corresponden a una mediana de 0.76 arcsec en el mes de Enero de 2005, con cobertura de 0.44% con solo 63 datos siendo parte de la Estación de Invierno. Las mediciones menores para el *seeing* fueron de 0.45 arcsec el mes de Julio de 2007 con un 17.56% de cobertura y 1751 datos capturados durante la Estación de Verano.

Para los datos totales mensuales la medición mayor del *seeing* corresponde al mes de Enero con 0.76 arcsec con una cobertura de 13.96% y 8127 datos. La medición menor

del *seeing* corresponde al mes de Julio con una medición del *seeing* de 0.45 arcsec, una cobertura de 15.51% y 6225 datos capturados.

Seeing Estacional y Anual

A continuación presentamos tres Tablas (Tablas 4.4 DIMM, 4.5 MASS y 4.6 Capa Superficial) con estadísticas por años y estaciones, dando a conocer la mediana, el primer y tercer cuartil que corresponden a las barras de errores para cada mediana.

Podemos notar que la estadística del año 2004 fue el año de peor *seeing* observado para todas las capas en general. Con *seeing* del DIMM (1.04 arcsec) y del MASS (0.44 arcsec) siendo un año de mayor afectación por turbulencia atmosférica para las capas superiores (> 500 m).

De la misma forma para las mediciones de la Capa Superficial (< 500 m) se tiene que el peor año de medición para el *seeing* es 2004 con 0.81 arcsec. Todo esto es debido a que sólo se tuvieron datos de la Estación de Otoño.

DIMM	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Estación	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
Invierno	0.67	0.97	1.38
Primavera	0.61	0.78	1.07
Verano	0.54	0.64	0.79
Otoño	0.64	0.83	1.16
Año	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
2004	0.72	1.04	1.51
2005	0.65	0.82	1.13
2006	0.58	0.74	1.02
2007	0.6	0.8	1.17
2008	0.61	0.82	1.11

Tabla 4.4.- Mediana, 1^{er} y 3^{er} cuartil. Anual y Estacional [arcsec] para el DIMM.

El mejor año en cuanto a resultados estadísticos para el dispositivo DIMM corresponde al 2006 (0.74 arcsec), para el MASS corresponde al 2005 (0.36 arcsec) y para la Capa Superficial fue el 2006 (0.76 arcsec). Éstos fueron los años con menor nubosidad y

menor turbulencia atmosférica. Cabe destacar que el año 2005 fue el que tuvo una tendencia a menor turbulencia óptica que afectó el *seeing* en las capas superiores a 500 m.

MASS	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Estación	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
Invierno	0.26	0.4	0.64
Primavera	0.23	0.35	0.54
Verano	0.24	0.33	0.48
Otoño	0.28	0.4	0.58
Año	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
2004	0.31	0.44	0.65
2005	0.24	0.36	0.54
2006	0.25	0.37	0.55
2007	0.24	0.37	0.58
2008	0.26	0.38	0.57

Tabla 4.5.- Mediana, 1^{er} y 3^{er} cuartil. Anual y Estacional [arcsec] para el MASS.

Capa Superficial	[arcsec]	[arcsec]	[arcsec]
Estación	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
Invierno	0.51	0.73	1.11
Primavera	0.46	0.59	0.81
Verano	0.38	0.46	0.56
Otoño	0.46	0.63	0.92
Año	1^{er} Cuartil	Mediana	3^{er} Cuartil
2004	0.56	0.81	1.27
2005	0.49	0.65	0.89
2006	0.42	0.54	0.76
2007	0.46	0.6	0.87
2008	0.45	0.62	0.86

Tabla 4.6.- Mediana, 1^{er} y 3^{er} cuartil. Anual y Estacional [arcsec] para Capa Superficial.

El análisis estadístico del *seeing* por estaciones nos dice que para el DIMM, en Invierno (0.97 arcsec) hubo una mayor afectación por parte de la turbulencia atmosférica en todas las capas a toda altura. Para el MASS las estaciones de menor calidad del

seeing fueron Invierno y Otoño (0.4 arcsec). Similarmente para la Capa Superficial también la peor estación fue Invierno (0.73 arcsec).

Es claro que la Estación de Invierno es la peor estación para realizar observaciones astronómicas en el OAN-SPM dado que hay contadas noches de cielo despejado y en general el *seeing* es malo.

Las estadísticas para las Estaciones de Verano, tanto para el DIMM como para el MASS presentan las mejores condiciones de *seeing*. Para el DIMM 0.64 arcsec y para el MASS 0.33 arcsec. De igual forma para la Capa Superficial la mejor Estación fue el Verano con 0.46 arcsec.

Cabe destacar que durante la Estación de Verano se tiene menor nubosidad y menor turbulencia atmosférica que afecte el *seeing* del sitio del OAN-SPM.

Estadísticas Globales del *Seeing*

Estas estadísticas contienen todas las mediciones obtenidas de manera simultánea en todo el tiempo del estudio, se tiene una mediana para cada instrumento con sus errores (1^{er} y 3^{er} cuartil), su promedio, la desviación estándar, el máximo y el mínimo. El tener estas estadísticas completas es muy útil para poder comparar con resultados estadísticos de otros estudios realizados en el OAN-SPM o en otros sitios astronómicos.

Global	DIMM [arcsec]	MASS [arcsec]	Capa Superficial [arcsec]
Mediana	0.78	0.37	0.58
1^{er} Cuartil	0.61	0.25	0.45
3^{er} Cuartil	1.11	0.56	0.84
Promedio	0.95	0.46	0.73
Desv. Stand.	0.55	0.35	0.48
Mínimo	0.23	0.01	0.02
Máximo	8.98	4.47	8.94

Tabla 4.7.- Mediana datos globales para DIMM, MASS y Capa Superficial.

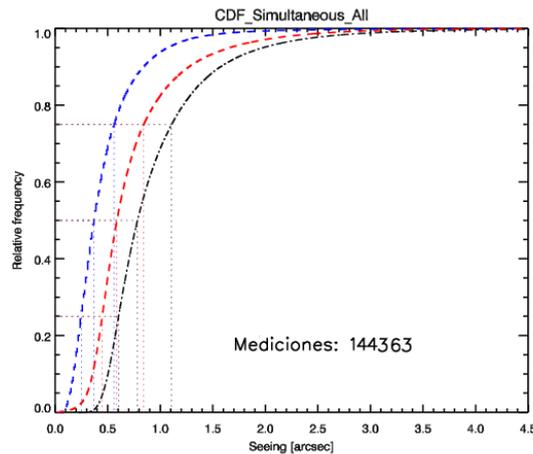


Figura 4.18.- CDF de los resultados Globales. Con Mediana 1^{er} Cuartil y 3^{er} Cuartil y número de mediciones. (DIMM: negro, MASS: azul, Capa Superficial: rojo).

La Tabla 4.7 muestra que el *seeing* para todas las capas (DIMM) es aproximadamente de 0.78 arcsec. El *seeing* asociado para niveles superiores a 500 m (MASS) es de 0.37 arcsec. Y finalmente las capas inferiores aportaron un *seeing* de 0.59 arcsec. De estos datos podemos notar que para el sitio astronómico del Observatorio en San Pedro Mártir, la turbulencia en capas inferiores (0 a 500 m) es la que más afecta a las observaciones.

En la Figura 4.1 se tiene la CDF de los datos Globales y la cantidad de datos que la componen.

4.3. Análisis de Tendencias Temporales Globales

Con la totalidad de los datos se realizó un análisis “horario”, que corresponde al de todos los datos por hora, lo que da de manera representativa el *seeing* para cada hora de la noche. De esta forma se buscó determinar la existencia de tendencias.

A partir de las mediciones de DIMM, MASS y Capa Superficial, se llevó acabo la organización de los datos respecto a las horas efectivas de una noche. Para esto, se dividen los datos en “bins” o “compartimentos”. Se tomó un máximo de 15 horas para el análisis, siendo que la duración máxima de una noche, la cual ocurre en el solsticio de Verano, es de aproximadamente 13 horas. Se definieron 168 compartimentos correspondientes a intervalos de 5 minutos cada uno. De esta manera se incluyen las

mediciones en esos intervalos para la duración de todas las noches del estudio. Se realizó un ajuste lineal en un intervalo mínimo en referencia a la noche más corta del año, este incluía una corrección con una función de peso en referencia a la cantidad de datos que se tuvo en cada intervalo. De igual forma se realizó la graficación de la cantidad de datos para cada intervalo para entender la disponibilidad de datos obtenidos por cada instrumento y para cada momento de la noche; a la vez que se compara la cobertura para observaciones en diferentes estaciones.

Para entender mejor el comportamiento del *seeing* en el transcurso de una noche se propuso ajustar los datos de distintas maneras.

Las gráficas (Figuras 4.18, 4.19, 4.20) contienen la muestra de las medianas por compartimentos de horas. Cada medición está ajustada a un intervalo de 5 minutos para cada una de las medidas. De esta manera podemos realizar una comparación de las medidas del seeing obtenidas con el DIMM, el MASS y la calculada para la Capa Superficial. Se analizó cada uno de los casos en relación al Tiempo Universal, empezando al atardecer, durante la noche y terminando al amanecer. Lo calculado representa la cantidad de datos por intervalo.

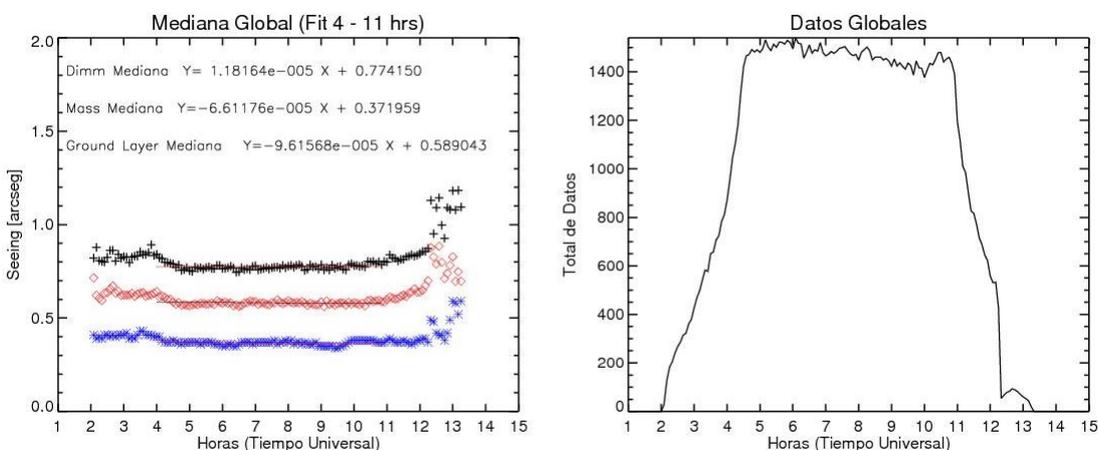


Figura 4.18.- Mediana Global del *seeing* por Horas de Tiempo Universal (izquierda), con ajustes lineales y ecuaciones representativas de cada ajuste lineal (DIMM: negro, MASS: azul, Capa Superficial: rojo). Cantidad Total de datos por Hora (en Tiempo Universal), para los datos Simultáneos (derecha).

La unidad de tiempo está dada, como es costumbre, en **Tiempo Universal** y corresponde al momento en que fueron adquiridos los datos. Podemos notar que la parte central del intervalo integra datos tanto de las noches más cortas (Invierno) como

de las noches de Verano. Sin embargo, los extremos corresponden a datos únicamente para las noches más largas (Verano).

La gráfica de la Mediana Global en la Figura 4.18 (izquierda) presenta tendencias lineales en la parte central, las cuales se pueden ajustar por rectas para la duración aproximada de la noche más corta del año. Las pendientes son muy cercanas a cero ya que son del orden de 10^{-5} .

La gráfica del Total de Datos por Hora presentada en la Figura 4.18 (derecha), nos muestra que en la parte central (4 – 11hrs) se tiene una gran cantidad de datos y por lo tanto una muy buena estadística, y en los extremos decrece significativamente la cantidad de mediciones realizadas y por lo tanto la estadística es menos confiable. Esto se explica por la limitación en la obtención de datos debida a la variación estacional de la duración de las noches.

Análisis a partir del crepúsculo astronómico: se ajustaron todas las mediciones a partir del crepúsculo astronómico para poder entender el comportamiento del *seeing* para todas las estaciones desde el momento en que las condiciones de visibilidad permiten una correcta observación astronómica dado que el Sol se ha ocultado y no afecta con contaminación lumínica.

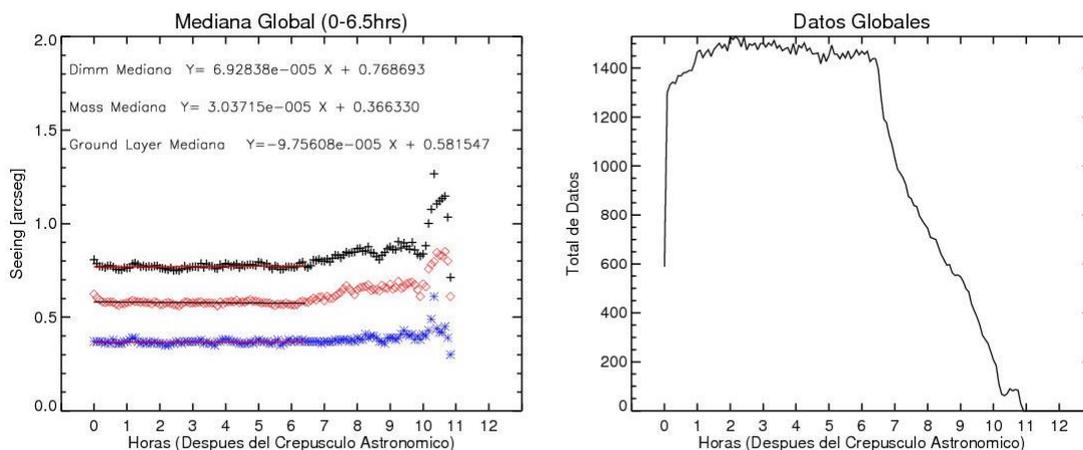


Figura 4.19.- Mediana Global del *seeing* para Horas después del crepúsculo astronómico (izquierda), con ajustes lineales y ecuaciones representativas de cada ajuste lineal (DIMM: negro, MASS: azul, Capa Superficial: rojo). Cantidad Total de datos por Horas después del crepúsculo astronómico, para datos Simultáneos (derecha).

La gráfica de la Mediana Global de la Figura 4.19 (izquierda) tiene una tendencia recta al inicio de la noche y muestra que es constante para la duración de las noches. La pendiente del ajuste lineal es muy cercana a cero ya que es del orden de 10^{-5} . La gráfica de la Cantidad de Datos por Hora (a la derecha de la Figura 4.19), nos muestra que en la parte inicial predomina con una gran cantidad de datos las noche más cortas del año, y en los extremos decrece significativamente la cantidad de mediciones realizadas con datos para las estaciones de noche de más larga duración.

Análisis precediendo al amanecer astronómico; se realizó un análisis que corresponde a las horas que preceden el amanecer astronómico para de esta manera conocer el comportamiento y tendencias del *seeing* antes de finalizar las noches de observación.

La gráfica de la Mediana Global a la izquierda de la Figura 4.20 tiene una tendencia recta hacia el final de las noches donde la muestra estadística es significativa. La pendiente es muy cercana a cero (del orden de 10^{-5}). La gráfica de la Cantidad Total de Datos por hora (a la derecha de la Figura 4.20), nos muestra que en los extremos decrece significativamente la cantidad de mediciones por lo que los datos tienen un peso significativo entre 7 horas y 1 hora antes del amanecer.

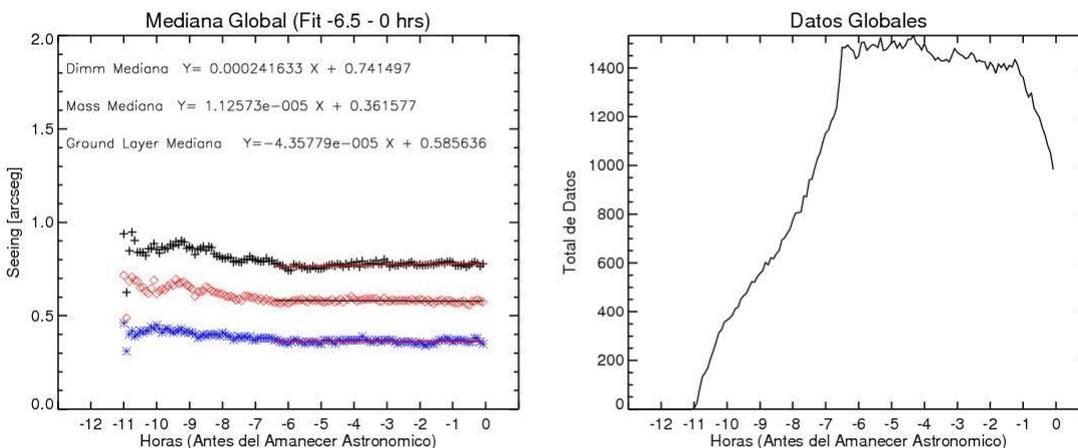


Figura 4.20.- Mediana Global del *seeing* por Horas antes del amanecer astronómico (izquierda), con ajustes lineales y ecuaciones representativas de cada ajuste lineal (DIMM: negro, MASS: azul, Capa Superficial: rojo). Cantidad Total de datos por Hora antes del amanecer astronómico, para datos Simultáneos (derecha).

4.4. Comparación con Estudios previos realizados en el OAN-SPM

Los resultados estacionales pueden ser comparados con los obtenidos por Echevarría et al. (1998) con el monitor CTT y CM, así mismo por Michael et al. (2003) con el monitor DIMM. El primero muestra que en el Verano la mediana es de 0.58 arcsec, mientras que el segundo encuentra una mediana de 0.55 arcsec, en comparación con el 0.64 arcsec obtenido en el presente trabajo. Así, el Verano se presenta como la mejor estación del año en cuanto a *seeing* para todos los estudios. Por otro lado, la cobertura porcentual para las estaciones de Verano, Otoño e Invierno es particularmente baja (< 23%).

Aun el valor de la mediana para la Primavera resulta mucho mayor en comparación a trabajos anteriores; 0.60 arcsec para Echeverría et al. (1998) y 0.61 arcsec para Michel et al. (2003), para el trabajo aquí expuesto es de 0.78 arcsec. Los resultados para el Otoño son 0.68 arcsec, 0.63 arcsec y 0.93 arcsec respectivamente, mientras que para el Invierno son 0.69 arcsec, 0.77 arcsec y 0.97 arcsec respectivamente. Evidentemente, estos resultados son consistentes, no en sus valores absolutos, sino en el hecho de que el Verano es la mejor estación y el Invierno la peor estación en cuanto a calidad de imagen.

El promedio de estos valores estacionales para las tres campañas completas corresponde a 0.79 arcsec, 0.68 arcsec, 0.61 arcsec y 0.70 arcsec para Invierno, Primavera, Verano y Otoño respectivamente, donde la mediana global es de 0.70 arcsec. Este valor es mayor para los resultados de las primeras dos campañas y menor a los resultados del presente trabajo. Las diferencias muestran la existencia de una asimetría debido a la dispereja cobertura anual para las tres campañas.

Nuestros resultados globales del *seeing* están en acuerdo con los reportados por Skidmore et al. (2009). Se encuentran pequeñas diferencias que pueden ser causadas por una mayor cobertura temporal en los datos, desde Octubre 2004 a Agosto 2008.

Comparando los resultados de este trabajo con los de trabajos previos se muestra que el *seeing* de la atmósfera completa (medido por el DIMM) es mayor que todos valores reportados anteriormente. Esto se puede deber a una ligera y continua degradación del *seeing* en años recientes.

Basado en los resultados de degradación del *seeing* obtenidos en los sitios astronómicos de Paranal y La Silla (Sarazin et al. 2008; Sarazin 2009) podría ser que la aparente degradación presente en el sitio del OAN-SPM puede corresponder a un cambio climático global. Consultando la Base de Datos Climática del Noroeste de México (<http://peac-bc.cicese.mx/datosclim>) que contiene datos climatológicos para numerosos análisis realizados por estaciones cerca del observatorio de SPM para los años 1981 a 2008; para este periodo se encuentra que la temperatura tiende a incrementarse 0.05 grados Centígrados por año mientras que la precipitación de agua tiende a decrecer 5 mm por año. Estas variaciones claramente muestran un cambio climático que produce a su vez efectos locales. Si la degradación del *seeing* es causada por esos sucesos es algo que está aún por ser determinado. Un estudio global de la dependencia del *seeing* con el cambio climatológico en el OAN-SPM puede ser muy interesante y queda pendiente para realizarse en un futuro.

Desde un punto de vista estadístico se encuentra que el *seeing* en el OAN-SPM no sufre degradación al acercarse el amanecer en contraste con los resultados reportados por Skidmore et al. (2009). Aunque el aumento del *seeing* al final de las noches sugiere que éste se degrada un poco al amanecer. Para establecer este hecho sería necesario la recolección de muchas observaciones al amanecer para que este resultado sea establecido con un mayor grado de significancia estadística.

Carrasco et al. (2012) realizaron un estudio en el OAN-SPM de la radiación solar (cobertura de nubes) usando los datos del estudio TMT para el mismo periodo que este trabajo. Este estudio muestra que los cielos se encuentran más despejados en Primavera, relativamente nublados en Verano y someramente despejados en Invierno. Es interesante destacar que aparece una correlación entre la cobertura de nubes de día y el valor nocturno del *seeing*, en el sentido de que para días nublados se tiene mejor *seeing* nocturno y viceversa. Esto puede indicar que el proceso que ocurre cuando la cobertura de nubes se disipa contribuye también a una menor turbulencia atmosférica.

4.5. Comparación con otros Sitios Astronómicos

El sitio astronómico del OAN-SPM es competitivo en calidad con respecto a los mejores sitios astronómicos del mundo, por lo mismo ha sido considerado en el estudio de sitios

para la ubicación del Telescopio de Treinta Metros (TMT). En este mismo estudio participaron cuatro sitios más, y a continuación destacamos las mediciones de *seeing* para cada uno de éstos. Esto se realizó para el caso de medidas del DIMM, del MASS y la medición del *seeing* de la Capa Superficial.

Seeing	Tolar (arcsec)	Armazones (arcsec)	Tolanchar (arcsec)	SPM (arcsec)	Mauna Kea (arcsec)
DIMM	0.63	0.64	0.64	0.78	0.75
MASS	0.44	0.43	0.48	0.37	0.33
Capa Superficial	0.34	0.35	0.32	0.59	0.54

Tabla 4.8.- Comparación de datos de todos los sitios considerados por el proyecto del TMT. Mediana del *seeing* para datos con DIMM, MASS y calculados para la Capa Superficial.

Globalmente se puede notar que para el OAN-SPM el *seeing* de toda la atmósfera (DIMM), presenta una estadística con datos de mayor valor. Estos puede deberse a que el sitio se ve afectado por sus condiciones climatológicas locales y por sus accidentes geográficos propios. Para las capa superiores (MASS) se tienen de las mejores estadísticas siendo sólo superadas por Mauna Kea en Hawaii. Finalmente para la Capa Superficial se calculan mayores valores debido principalmente a que esta determinación se ve afectada por la medición total del *seeing* obtenida por el DIMM. Los sitios del hemisferio norte (Mauna Kea y OAN-SPM) son compatibles y muestran resultados de *seeing* bastante parecidos.

RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se usaron los datos obtenidos por el proyecto TMT en el sitio del OAN-SPM en el Estado de Baja California al noroeste de la República Mexicana. Los datos consisten en medidas del *seeing* obtenidas con los instrumentos DIMM y MASS durante un periodo de casi 5 años (Octubre 2004 – Agosto 2008) y aproximadamente 1400 noches.

Para realizar el análisis presentado en este trabajo se construyeron herramientas computacionales (programas en IDL) para hacer un estudio detallado de la cobertura de datos, obteniendo porcentajes del total de tiempo observado por noche respecto a la duración total de la noche. Esta es la primera vez que se realiza un estudio tan completo de esta manera. La cobertura total obtenida con los datos del DIMM, MASS y datos Simultáneos fue de 40.2%, 27.9% y 26.4% respectivamente. Esto significa que, de las 1400 noches disponibles, para el DIMM corresponde a un equivalente de 563 noches observadas en su totalidad (noches con 100% de tiempo de cobertura), para el MASS le corresponden 391 noches, mientras que para los datos Simultáneos le corresponden 370 noches.

De igual manera, se calcularon estadísticas por noche, por mes, estacionales, anuales y de manera global para todas las observaciones. Los resultados a partir de datos de *seeing* Simultáneos de DIMM y MASS indican que el mejor *seeing* fue observado en Septiembre del 2006; 0.62 arcsec (DIMM), 0.31 arcsec (MASS) y en Agosto de 2007; 0.61 arcsec (DIMM), 0.27 arcsec (MASS). Estos meses pertenecen a lo que para nuestra definición es la Estación de Verano, presentando una mediana del *seeing* de 0.64 arcsec, 0.33 arcsec y 0.46 arcsec para el DIMM, MASS y Capa Superficial respectivamente. Esto define al Verano como la mejor Estación respecto al *seeing* en el Observatorio de SPM. El *seeing* obtenido para el año de 2006; 0.74 arcsec (DIMM), 0.37 arcsec (MASS) y 0.54 arcsec (Capa Superficial), corresponde al mejor año respecto al *seeing* y el de mejor cobertura de todo el estudio. Para el *seeing* de la Capa Superficial los mejores meses corresponden a Julio con un promedio de 0.45 arcsec. Los resultados globales contienen una mediana de *seeing* de 0.78 arcsec (DIMM), 0.37 arcsec (MASS) y 0.59 arcsec (Capa Superficial).

Comparando con trabajos anteriores se encuentra que los valores del *seeing* para toda la atmósfera son ligeramente mayores a los valores reportados anteriormente, posiblemente debido a que existe el fenómeno de degradación del *seeing* con el tiempo, que puede ser causado por efectos climatológicos. El análisis por horas claramente muestra que no existe tendencia significativa de degradación del *seeing* hacia el amanecer como lo reporta Skidmore (2009).

Al comparar estos resultados con los otros sitios candidatos al TMT, se muestra que el sitio astronómico del OAN-SPM es muy competitivo a nivel mundial. De esta manera, sugerimos que sería de suma importancia mantener un monitoreo continuo de las principales variables astroclimatológicas para situar al OAN-SPM de manera preferente en el contexto del desarrollo de grandes proyectos e instrumentación astronómica de punta a nivel mundial.

A manera de comentario final cabe mencionar que una buena parte de este trabajo de tesis sirvió de base para la publicación de un artículo arbitrado en la revista astronómica de circulación internacional *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, M. y López, E. 1982, en Simposio de Historia de la Astronomía en México, editado por M. A. M. Corral, 311

Álvarez, M. y Maisterrena, Y. 1977, Rev. Mex. AA, 2, 43

Álvarez, M., Michel, R., Reyes-Coca, S. y Troncoso-Gaytán R. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 31, 113

Araiza Quijano, M. R. y Cruz-González, I. 2011, Rev. Mex. AA, 47, 409

Ávila, R., Carrasco, E., Ibáñez, F., Vernin, J., Prieur, J. L. y Cruz, D. X. 2006, PASP, 118, 503

Ávila, R., Cruz-González, I. y Tapia, M. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 121

Ávila, R. y Cuevas, S. 2009, Optics Express, 17, 10926

Ávila, R., Masciadri, E., Vernin, J. y Sánchez, L. J. 2004, PASP, 116, 682

Ávila, R., Sánchez, L. J., Cruz-González, I., Castaño, V. M. y Carrasco, E. 2011, Rev. Mex. AA, 47, 75

Ávila, R., Sánchez, L. J., Ibáñez, F. et al. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 31, 71

Ávila, R., Vernin, J. y Cuevas, S. 1998, PASP, 110, 1106

Avilés, J. L. 2004, Tesis de Maestría en Ciencias en la Especialidad de Astrofísica, INAOE, Tonantzintla, Puebla

Bohigas, J. y Núñez, J. M. 2010, Rev. Mex. AA, 46, 89

Bohigas, J., Núñez, J. M., Guillén, P. F. et al. 2008, Rev. Mex. AA, 44, 231

Carrasco, E., Ávila, R. y Carramiñana, A. 2005, PASP, 117, 104

Carrasco, E., Carramiñana, A., Sánchez, L. J., Ávila, R. y Cruz-González, I. 2012, MNRAS, 420, 1273

Carrasco, E. y Sarazin, M. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 103

Conan, R., Ávila, R., Sánchez, L. J. et al. 2002, A&A, 396, 723

Cruz, D. X. 2002, Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Cruz-González, I., Ávila, R. y Tapia, M. editores, 2003, Rev. Mex. AA, San Pedro Mártir: Astronomical Site Evaluation, vol. 19

- Cruz-González, I., Ávila R., Tapia M. et al. 2004, in SPIE (SC), editado por A. L. Ardeberg y T. Andersen, vol. 5382, 634
- Echevarría, J. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 41
- Echevarría, J., Tapia M., Costero R. et al. 1998, Rev. Mex. AA, 34, 47
- Erasmus, A. y Van Staden. 2002, A satellite survey of cloud cover and water vapor in the eastern USA and Northern Mexico. A study conducted for the CELT project', internal report
- Els, S. G., Schöck, M., Seguel, J. et al. 2008, Appl. Opt., 47, 2610
- Els, S. G., Travouillon, T., Schöck, M. et al. 2009, PASP, 121, 527
- Fried, D. L. y Mevers, G. E. 1974, Appl. Opt., 13, 2620
- Hill, R., et al. 1980, JOSA, Vol 70, 1192
- Hiriart, D. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 90
- Hiriart, D., Ochoa, J. L. y García, B. 2001, Rev. Mex. AA, 37, 213
- Kornilov, V., Tokovinin, A., Shatsky, N. et al. 2007, MNRAS, 382, 1268
- Kolmogorov, A. 1941, DAN S.S.S.R. 30-4, 229
- Masciadri, E., Ávila, R., Sánchez, L. J. 2002, A&A, 382, 378
- Masciadri, E., Ávila, R., Sánchez, L. J. et al., 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 63
- Masciadri, E., Ávila, R., Sánchez, L.J. 2004, Rev. Mex. AA, 40, 3
- Masciadri, E. y Garfias, T., 2001, A&A, 366, 708
- Mendoza, E. E. 1971, Bol. Obs. Ton. Tacub., 6, 95
- Mendoza, E. E. 1973, Mercury, 2, 9
- Mendoza, E. E., Luna, J. y Gómez, T. 1972, Bol. Obs. Ton. Tacub. 6, 215
- Michel, R., Echevarría, J., Costero, R. y Harris, O. 2003a, Rev. Mex. AA (SC), 19, 37
- Michel, R., Echevarría, J., Costero, R., Harris, O., Magallón, J. y Escalante, K. 2003b, Rev. Mex. AA, 39, 291
- Michel, R., Hiriart, D. y Chapela, A. 2003c, Rev. Mex. AA (SC), 19, 99
- Otárola, A., Hiriart, D. y Pérez-León, J. E. 2009, Rev. Mex. AA, 45, 161
- Parrao, L. y Schuster, W. J. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 81

- Riddle, R. L., Schöck, M. y Skidmore, W. 2006, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) (SC), vol. 6267
- Roddier, F. 1981, Progress in Optics. Volume 19. Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1981, p. 281-376., 19, 281
- Sánchez, L. J., Ávila, R., Agabi, A. et al. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 31, 93
- Sánchez, L. J., Cruz, D. X., Ávila, R. et al. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 23
- Sánchez, L. J., Cruz-González, I., Echevarría, J., Ruelas-Mayorga, A., García, A. M. et al. 2012, MNRAS, 426, 635
- Sarazin, M. 2009, <http://www.eso.org/gen-fac/pubs-/astclim/paranal/seeing/singstory.html>
- Sarazin, M., Melnick, J., Navarrete, J. y Lombardi, G. 2008, The Messenger, 132, 11
- Sarazin, M. y Roddier, F. 1990, A&A, 227, 294
- Schöck, M. et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 70121X.
- Schöck, M., Els S., Otárola, A., Riddle, R., Skidmore, W. y Travouillon, T. 2010, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) (SC), vol. 7736
- Schöck, M., Els, S., Riddle, R. et al. 2009, PASP, 121, 384
- Schuster, W. J. y Parrao, L. 2001, Rev. Mex. AA, 37, 187
- Skidmore, W., Els, S., Travouillon, T. et al. 2009, PASP, 121, 1151
- Sohn, E. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 31, 122
- Tapia, M. 1992, Rev. Mex. AA, 24, 179
- Tapia, M. 2003, Rev. Mex. AA (SC), 19, 75
- Tapia, M., Cruz-González, I. y Ávila, R. 2007a, Rev. Mex. AA (SC), 28, 9
- Tapia, M., Cruz-González, I., Hiriart, D. y Richer, M. 2007b, Rev. Mex. AA (SC), 31, 47
- Tatarski, V. 1961, New-York: McGraw-Hill
- Tokovinin, A. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 31, 61
- Tokovinin, A. y Kornilov, V. 2007, MNRAS, 381, 1179
- Tokovinin A., Kornilov V., Shatsky N. y Voziakova O. 2003, MNRAS, 343, 891
- Tokovinin A., Vernin J., Ziad A. y Chun M. 2005, PASP, 117, 395
- Vogiatzis K. y Hiriart D. 2004, Rev. Mex. AA, 40, 81

Walker M. F. 1971, PASP, 83, 401

Walker M. F. 1984, in ESO Conf. and Workshop Proceedings, edited by A. Ardeberg & L. Woltjer, vol. 18, 3

Wang L., Schöck M., Chanan G. et al. 2007, Appl. Opt., 46, 6460

Wehinger P. 2007, Rev. Mex. AA (SC), 28, 1

APÉNDICE:

Artículo publicado en la revista arbitrada de circulación internacional *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 426, pp 636-646 (2012).

Astroclimate at San Pedro Mártir – I. Seeing statistics between 2004 and 2008 from the Thirty Meter Telescope site-testing data

Astroclimate at San Pedro Mártir – I. Seeing statistics between 2004 and 2008 from the Thirty Meter Telescope site-testing data[★]

L. J. Sánchez,¹† I. Cruz-González,¹ J. Echevarría,¹ A. Ruelas-Mayorga,¹ A. M. García,¹ R. Avila,² E. Carrasco,³ A. Carramiñana³ and A. Nigoche-Netro⁴

¹*Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, México, D.F. 04510, México*

²*Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Santiago de Querétaro, Qro. 76000, México*

³*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Pue. 72840, México*

⁴*Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal. 44130, México*

Accepted 2012 June 14. Received 2012 June 13; in original form 2012 March 16

ABSTRACT

We present comprehensive seeing statistics for the San Pedro Mártir site derived from the Thirty Meter Telescope site-selection data. The observations were obtained between 2004 and 2008 with a Differential Image Motion Monitor (DIMM) and a Multi-Aperture Scintillation Sensor (MASS) combined instrument (MASS–DIMM). The parameters that are statistically analysed here are the whole atmosphere seeing (measured by the DIMM), the free atmosphere seeing (measured by the MASS) and the ground-layer (GL) seeing, which is the difference between the total seeing and the free atmosphere seeing. We have made a careful data coverage study, along with statistical distributions of simultaneous MASS–DIMM seeing measurements, in order to investigate the nightly, monthly, seasonal, annual and global behaviour, as well as possible hourly seeing trends. Although this campaign covers five years, the sampling is uneven, with 2006 and 2007 being the best sampled years in terms of seasonal coverage. The overall results yield a median seeing of 0.78 arcsec (DIMM), 0.37 arcsec (MASS) and 0.59 arcsec (GL). Therefore, the strongest contribution to the whole atmosphere seeing comes from a strong ground layer. We find that the best season is summer, while the worst season is winter, in accordance with previous studies. It is worth noting that the best yearly results are correlated with the best sampled years. The hourly analysis shows that there is no statistically significant tendency for seeing degradation towards dawn. The seeing values are slightly larger than those reported previously, which might be the result of climate changes.

Key words: atmospheric effects – site testing.

1 INTRODUCTION

In the early 1970s, a new observing site began operations at the Sierra de San Pedro Mártir (SPM), Baja California, Mexico. The site was selected using satellite photographs, and it was found to be one of the three best cloud-free areas in the world.

We now know that this site is one of the best astronomical locations in the world and it has been considered by the international astronomical community as a potential place for large telescopes to be built in the near future; it is a candidate site of projects such as

the Large Synoptic Survey Telescope (LSST) and the Thirty Meter Telescope (TMT), as well as other astronomical projects.

Several climatological properties have been reported, mainly during the first years of operation of the Observatorio Astronómico Nacional (OAN) at SPM (Mendoza 1971, 1973; Mendoza et al. 1972; Alvarez & Maisterrena 1977; Alvarez & López 1982; Walker 1984) and later by Tapia (1992), Tapia (2003), Echevarría et al. (1998), Hiriart, Ochoa & García (2001), Michel, Hiriart & Chapela (2003c), Michel et al. (2003a), Carrasco & Sarazin (2003), Carrasco, Avila & Carramiñana (2005), Avila et al. (2006), Tapia, Cruz-González & Avila (2007a), Alvarez et al. (2007), Bohigas et al. (2008), Otárola et al. (2009), Bohigas & Núñez (2010), Araiza Quijano & Cruz-González (2011) and Carrasco et al. (2012).

Results on the seeing and optical turbulence above the ground can be found in Avila, Vernin & Cuevas (1998), Echevarría et al. (1998), Conan et al. (2002), Avila et al. (2007), Sánchez et al. (2007) and Avila et al. (2011), and results on atmosphere modelling

[★] Based on observations obtained at the Observatorio Astronómico Nacional at San Pedro Mártir, Baja California, México, operated by the Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

†E-mail: leonardo@astro.unam.mx

in Masciadri & Garfias (2001), Masciadri, Avila & Sánchez (2002, 2004), Masciadri et al. (2003) and Vogiatzis & Hiriart (2004). Extinction and opacity studies have also been performed by Schuster & Parrao (2001), Hiriart (2003) and Parrao & Schuster (2003). Site prospection studies within the SPM site have been carried out by Sohn (2007) and Bohigas et al. (2008). Comprehensive reviews on the site can be found in Cruz-González et al. (2003), Cruz-González et al. (2004), Tapia et al. (2007a), Tapia et al. (2007b) and Wehinger (2007).

In this paper, we analyse the data collected by the TMT Project Site Survey at the SPM site. We discuss and compare the results of the Differential Image Motion Monitor (DIMM) and a Multi-Aperture Scintillation Sensor (MASS) with previous studies. The observations include data in the time period 2004 October to 2008 February, analysed by Skidmore et al. (2009), plus data taken between 2008 February and 2008 August, the analysis of which has not been presented anywhere in the astronomical literature. Thus, we considerably improve the analysis of the complete TMT MASS–DIMM seeing survey at SPM and we supplement the seeing results published previously in the literature.

We also present, in a detailed manner, the number of observations and the percentage of time covered by them. This a novel way of treating seeing data.

With the aim of providing the astronomical community with detailed information of the seeing behaviour in SPM, we present nightly, monthly, seasonal, annual and global statistics. Also, we present an analysis of the hourly seeing trend, which yields different results from those found by Skidmore et al. (2009).

We give a summary of prior SPM seeing studies in Section 2. We present the SPM TMT site-testing instrumentation and data coverage in Section 3. We give the results and detailed statistics in Section 4.

2 SPM SITE: SEEING STUDIES

Atmospheric turbulence is usually studied by using a number of parameters, one of which is known as seeing (ε). The relation between ε , the Fried parameter r_o and the turbulence integral is given by

$$\varepsilon = 0.98 \frac{\lambda}{r_o} = 5.25 \lambda^{-1/5} \left[\int_0^\infty C_N^2(h) dh \right]^{3/5}, \quad (1)$$

where λ is the wavelength and $\int_0^\infty C_N^2(h) dh$ is the optical turbulence energy profile (Roddier 1981).

We note that the seeing units are given in arcsec and, because seeing is a wavelength-dependent turbulence parameter, it is usually

calculated for 0.5 μm . The seeing value is also corrected for the direction of observation and is referred to the zero zenith angle.

Early works on local SPM seeing conditions were carried out by Mendoza (1971) and Walker (1971). Several recent studies have been carried out by Echevarría et al. (1998), Conan et al. (2002) and Michel et al. (2003a). Optical turbulence studies have been performed by Avila et al. (1998), Avila et al. (2004), Avila et al. (2006), Avila et al. (2007) and Avila et al. (2011). A comprehensive review of some of these studies can be found in Echevarría (2003).

The observations of Echevarría et al. (1998) were obtained with two seeing monitors and a Micro Temperature Array tower (MTA); the Site-Testing Telescope (STT) from Steward Observatory was designed to observe Polaris, while the Carnegie Monitor (CM) could observe and track any star. The MTA consisted of platinum detectors, which measured temperature differences located at different heights, from 4 to 28 m. Echevarría et al. (1998) have reported a median seeing of 0.61 arcsec with a first quartile of 0.50 arcsec and a decrease of 0.1 arcsec at a height of 15 m. The STT observations covered 386 nights, while the CM observations covered 114 nights, spanning a three-year period. A summary of their results is shown in Table 1.

Conan et al. (2002) measured the wavefront outer scale and included ground-based seeing measurements with a DIMM. They reported observations during 31 nights. The telescope was located at two sites: at the CM tower and at a low-altitude location. They found a bimodal distribution during their 2000 December campaign with peaks centred at 0.50 and 0.75 arcsec, and an overall seeing median of 0.77 arcsec, including all observations during the 31-night period.

Michel et al. (2003a) conducted a study with the same DIMM during 123 nights spanning almost a three-year period. The monitor was located at the CM tower at a height of 8.3 m. They reported a median of 0.62 arcsec and a first quartile of 0.49 arcsec.

Skidmore et al. (2009) have analysed data collected by the TMT Project Site Survey at five different sites, which include SPM. A partial set (2004 October to 2008 February), of combined DIMM and MASS data, yields seeing median values of 0.58 arcsec for the ground layer, 0.37 arcsec for the free atmosphere and 0.79 arcsec for the whole atmosphere.

Concerning optical turbulence profiling, Avila et al. (1998, 2004) have monitored the vertical distribution of the optical turbulence strength using a Generalized SciDAR (GS). Two observation campaigns have been carried out at the OAN–SPM in 1997 and 2000. In 1997, the GS was installed at the 1.5-m and 2.1-m telescopes (SPM1.5 and SPM2.1) for eight and three nights (March and April), respectively, whereas in 2000 the instrument was

Table 1. SPM seeing monitoring results (whole atmosphere seeing).

Method	Reference	First quartile (arcsec)	Median (arcsec)	Third quartile (arcsec)	Nights
STT	Echevarría et al. (1998)	0.50	0.61		386
CM	Echevarría et al. (1998)	0.48	0.63		99
CM/STT ^a	Echevarría et al. (1998)	0.46	0.58		57
DIMM	Conan et al. (2002)		0.50; 0.75 ^b		14
DIMM	Conan et al. (2002)	0.61	0.77	0.99	31
DIMM	Michel et al. (2003a)	0.48	0.60	0.81	123
MASS–DIMM	Skidmore et al. (2009)	0.61	0.79	1.12	^c
SciDAR	Avila et al. (2011)	0.50	0.68	0.97	27

^aCM simultaneous with STT.

^bBimodal distribution.

^cFrom 2004 October to 2008 February.

installed for nine and seven nights (May) at SPM1.5 and SPM2.1, respectively.

Avila et al. (2011) performed a recalibration of the $C_N^2(h)$ profiles obtained at the OAN–SPM, following the results of a theoretical work on the normalization procedure used in the GS data reduction method (Avila & Cuevas 2009). From a statistical analysis of the recalibrated profiles, Avila et al. (2011) have found that the seeing in the first two kilometres, in the free atmosphere and in the whole atmosphere had median values of 0.38, 0.35 and 0.68 arcsec, respectively.

Table 1 shows a synthesis of the non-differential monitors (STT and CM), differential (DIMM) and SciDAR seeing monitoring campaigns.

3 TMT SITE-TESTING DATA

3.1 The 2004–2008 TMT site-testing campaign

SPM was one of the five candidate sites selected by the TMT site-testing team (Schöck et al. 2009). Three Southern hemisphere sites were studied – Cerros Tolar, Armazones and Tolonchar in northern Chile – and two Northern hemisphere sites – the 13 North (13 N) site on Mauna Kea, Hawaii in the United States and SPM in Mexico. During a period of approximately five years, from 2004 to 2008, the TMT group measured the atmospheric properties of each site with the same instrumentation, and at least 2.5 annual cycles of data were acquired at each of the candidate sites. As described in detail by Schöck et al. (2009), a suite of eight instruments were deployed at the candidate sites. The data acquisition methodology has also been presented in their work. The acquired data of all the instruments have kindly been made available to the public at <http://sitedata.tmt.org/> by the TMT organization.

3.2 Seeing instrumentation

The SPM TMT T4 site-testing station was equipped with a 35-cm telescope mounted approximately 7 m above ground. At the Cassegrain focus of the telescope, a combined instrument was deployed, which included a DIMM and a MASS, hereafter called MASS–DIMM, described by Kornilov et al. (2007). Combined MASS–DIMM instruments are extensively used for seeing measurements and optical turbulence profiling (e.g. Tokovinin et al. 2003, 2005).

The DIMM channel measures the wavefront slope differences over two small pupils some distance apart. This yields the whole atmosphere seeing from the telescope level to the top of the atmosphere (Sarazin & Roddier 1990). DIMM seeing measurements $\varepsilon_{\text{DIMM}}$ are affected by different sources of bias, such as image threshold, defocus, exposure time, photon noise and high-frequency vibrations that must be monitored in real time; thus, some of the measurements are rejected. In particular, for the system used here, the precision reported is better than 0.02 arcsec (Wang et al. 2007).

The MASS channel detects rapid variations of light intensity in four concentric apertures using photomultipliers, and it reconstructs a turbulence profile at six different heights above the telescope (Tokovinin & Kornilov 2007). The MASS is not sensitive to turbulence near the ground because this does not produce any scintillation and it can only measure the seeing in the free atmosphere (FA), thus excluding the ground layer. So, we have $\varepsilon_{\text{MASS}} = \varepsilon_{\text{FA}}$. From the turbulence profile, the seeing integrated from 500 m above the telescope to the top of the atmosphere is computed. The MASS seeing accuracy is better than 0.05 arcsec (Els et al. 2008).

3.3 SPM TMT data coverage

The SPM TMT T4 station acquired MASS–DIMM data from 2004 October to 2008 August. The DIMM and MASS nightly operations commenced one hour after sunset and ceased one hour before sunrise. The DIMM and MASS measurements were triggered simultaneously. The DIMM took integrated stellar light measurements during a time interval of 36 s, whereas the MASS sampled light during 60-s periods. Because the DIMM channel was used to acquire the target star, this resulted in simultaneous MASS–DIMM measurements every 70–90 s (Els et al. 2009). Sometimes, computations failed to provide valid results, probably because of cloudy conditions or technical problems, while sometimes the telescope system was shutdown as a result of bad weather conditions.

In Fig. 1, we present the total amount of DIMM, MASS and simultaneous MASS–DIMM data for each month during the acquisition period. By simultaneous MASS–DIMM data, we mean measurements within the same minute interval.

We have also computed the statistics of the data coverage per night and per month. In order to compute the monthly temporal data coverage, we have considered the duration for each night of the year as a result of the diurnal cycle variation. This yields a percentage value of the available data for each night in a given month. A 100 per cent value would indicate data obtained during the whole night for every night of the month.

To the best of our knowledge, this is the first time that a complete data coverage of seeing observations has been presented in the astronomical literature. Whereas, in other papers, the number of nights observed is spoken of, regardless of whether one seeing point or many have been observed per night, we emphasize the effective length of time observed per night, making this a novel way of treating seeing data.

Tables 2, 3 and 4 give the percentage of monthly, seasonal and annual data coverage of DIMM, MASS and simultaneous MASS–DIMM, respectively, during the acquisition period.

In Figs 2, 3 and 4, we present grey-level plots showing only the monthly percentage of data coverage for the 2004–2008 period for DIMM, MASS and simultaneous MASS–DIMM, respectively, extracted from Tables 2, 3 and 4.

These figures are intended to be a visual aid in order to see, at a glance, which months are those with the best coverage. The degree of darkening corresponds to the monthly percentage values presented in Tables 2, 3 and 4.

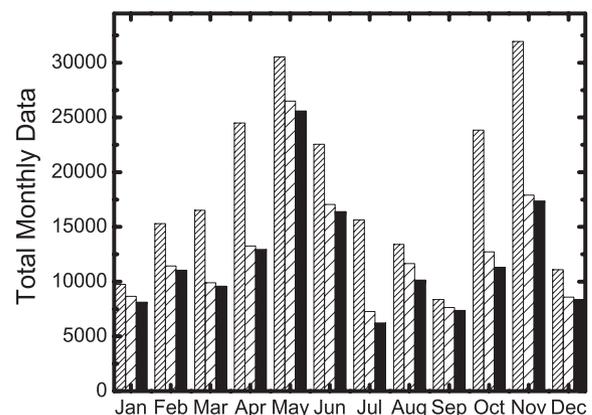


Figure 1. Total monthly data for the 2004–2008 period: DIMM (dense shading), MASS (sparse shading) and simultaneous MASS–DIMM (dark).

Table 2. Amount of data collected and coverage percentage for DIMM.

Month	2004		2005		Year		2007		2008		Total	
January	–	–	129	0.9%	3371	23.1%	6263	43.1%	0	0.0%	9763	16.8%
February	–	–	0	0.0%	3082	23.5%	7767	60.9%	4449	35.5%	15 298	30.0%
March	–	–	0	0.0%	5740	46.3%	5992	47.0%	4794	38.9%	16 526	33.0%
Winter											41 587	26.6%
April	–	–	2846	25.5%	8185	74.4%	3901	36.4%	9557	86.7%	24 489	55.7%
May	–	–	6755	64.9%	7640	73.5%	8472	81.5%	7657	73.6%	30 524	73.4%
June	–	–	5740	59.9%	6609	69.0%	3959	41.4%	6233	65.1%	22 541	58.8%
Spring											77 554	62.6%
July	–	–	628	6.3%	5064	50.3%	5792	57.7%	4155	41.2%	15 639	38.9%
August	–	–	0	0.0%	6578	60.3%	6174	56.1%	642	6.1%	13 394	30.6%
September	–	–	0	0.0%	8361	71.2%	0	0.0%	–	–	8361	23.8%
Summer											37 394	31.1%
October	6081	45.5%	445	3.2%	8712	66.1%	8612	63.7%	–	–	23 850	44.6%
November	3887	28.0%	10 134	73.6%	9916	72.1%	8004	57.7%	–	–	31 941	57.8%
December	0	0.0%	5165	35.1%	5933	40.3%	0	0.0%	–	–	11 098	18.8%
Autumn											66 889	40.4%
Total	9968	36.7%	31 842	22.4%	79 191	55.8%	64 936	45.4%	37 487	43.4%	223 424	40.2%

Table 3. Amount of data collected and coverage percentage for MASS.

Month	2004		2005		Year		2007		2008		Total	
January	–	–	241	1.7%	2663	18.2%	5768	39.7%	0	0.0%	8672	14.9%
February	–	–	0	0.0%	2448	18.7%	6451	50.6%	2536	20.3%	11 435	22.4%
March	–	–	0	0.0%	4669	37.7%	4890	38.4%	354	2.7%	9913	19.7%
Winter											30 020	19.0%
April	–	–	2414	21.6%	7283	66.3%	3562	33.2%	0	0.0%	13 259	30.3%
May	–	–	6164	59.1%	6846	65.9%	7366	70.9%	6106	58.7%	26 482	63.6%
June	–	–	5006	52.3%	5516	57.5%	3266	34.2%	3274	34.2%	17 062	44.5%
Spring											56 803	46.1%
July	–	–	463	4.6%	4509	44.8%	2294	22.8%	0	0.0%	7266	18.1%
August	–	–	0	0.0%	5816	53.3%	5837	53.6%	0	0.0%	11 653	26.7%
September	–	–	0	0.0%	7641	65.2%	0	0.0%	–	–	7641	21.7%
Summer											26 560	22.2%
October	5159	38.9%	336	2.5%	7223	54.7%	0	0.0%	–	–	12 718	24.0%
November	3436	25.5%	7428	53.7%	6786	49.3%	263	1.9%	–	–	17 913	32.6%
December	0	0.0%	3908	26.6%	4687	31.8%	0	0.0%	–	–	8595	14.6%
Autumn											39 226	23.7%
Total	8595	21.5%	25 960	18.5%	66 087	46.9%	39 697	28.8%	12 270	14.5%	152 609	27.9%

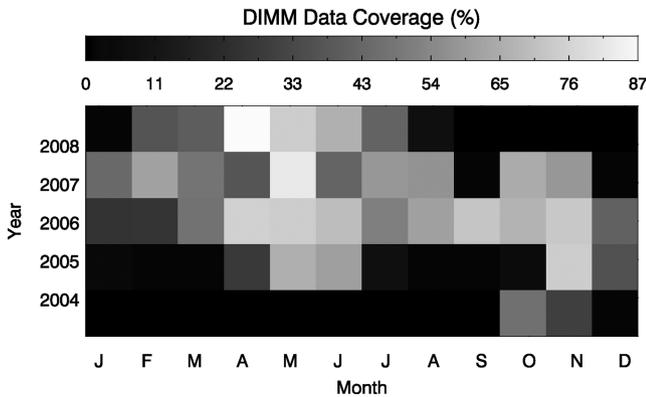
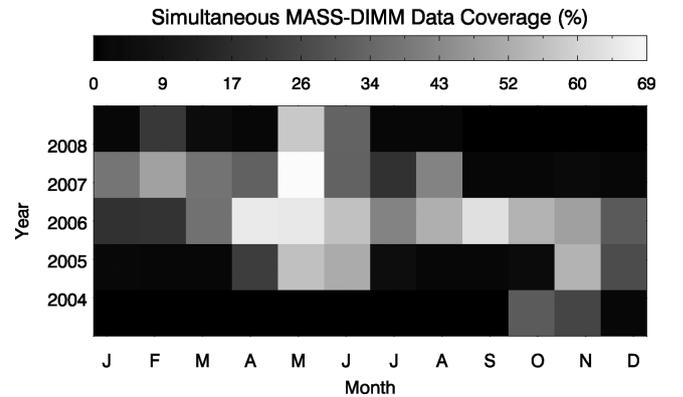
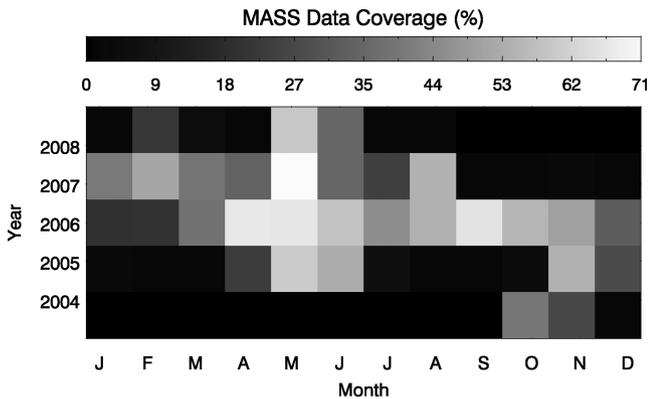
At first glance, we immediately notice two main features: (i) the best coverage was obtained during 2006 and 2007; (ii) April, May and June are the best covered months.

This is further supported by a careful analysis of Tables 2, 3 and 4. For 2006 and 2007, the DIMM data coverage is 55.8 and 45.4 per cent, respectively, while the MASS coverage for these years is 46.9

and 28.8 per cent, respectively. The simultaneous MASS–DIMM coverage is 45.3 and 26.4 per cent, respectively. The overall data coverage for all years is significantly less (DIMM, 40.2 per cent; MASS, 27.9 per cent; simultaneous MASS–DIMM, 26.4 per cent). Although these coverage values are low, they reflect the enormous difficulties in obtaining seeing data, even in experiments designed

Table 4. Amount of data collected and coverage percentage for simultaneous MASS–DIMM.

Month	Year										Total	
	2004		2005		2006		2007		2008			
January	–	–	63	0.4%	2613	17.9%	5451	37.5%	0	0.0%	8127	14.0%
February	–	–	0	0.0%	2394	18.2%	6152	48.3%	2490	20.0%	11036	21.6%
March	–	–	0	0.0%	4521	36.5%	4713	37.0%	352	2.7%	9586	19.1%
Winter											28749	18.2%
April	–	–	2399	21.5%	7129	64.9%	3422	31.9%	0	0.0%	12950	29.6%
May	–	–	5779	55.4%	6707	64.5%	7156	68.9%	5946	57.2%	25588	61.5%
June	–	–	4857	50.7%	5331	55.6%	3088	32.3%	3117	32.5%	16393	42.8%
Spring											54931	44.6%
July	–	–	340	3.4%	4134	41.0%	1751	17.6%	0	0.0%	6225	15.5%
August	–	–	0	0.0%	5625	51.5%	4511	41.1%	0	0.0%	10136	23.2%
September	–	–	0	0.0%	7360	62.8%	0	0.0%	–	–	7360	20.9%
Summer											23721	19.9%
October	4033	30.5%	337	2.5%	6941	52.6%	0	0.0%	–	–	11311	21.4%
November	3259	24.2%	7274	52.6%	6607	48.0%	241	1.7%	–	–	17381	31.6%
December	0	0.0%	3819	25.9%	4451	30.2%	0	0.0%	–	–	8270	14.0%
Autumn											36962	22.3%
Total	7292	18.2%	24868	17.7%	63813	45.3%	36485	26.4%	11905	14.1%	144363	26.4%


Figure 2. Grey-level plot showing the monthly percentage of data coverage for the 2004–2008 period for DIMM. A black square means that no usable data were available.

Figure 4. Grey-level plot showing the monthly percentage of data coverage for the 2004–2008 period for simultaneous MASS–DIMM. A black square means that no usable data were available.

Figure 3. Grey-level plot showing the monthly percentage of data coverage for the 2004–2008 period for MASS. A black square means that no usable data were available.

to ensure high data collection efficiencies, as is the case for the TMT site-testing data (Riddle, Schöck & Skidmore 2006; Schöck et al. 2010). Note that the best sampled year for simultaneous measurements is 2006 (45.3 per cent) and the worst sampled year is 2008 (14.1 per cent).

Seasonal MASS–DIMM coverage in winter is 18.2 per cent, in spring it is 44.6 per cent, in summer it is 19.9 per cent and in autumn it is 22.3 per cent. Seasons have been defined at the beginning of the month: winter (January, February and March), spring (April, May and June), summer (July, August and September) and autumn (October, November and December).

In the monthly case, we can see that the data coverage is worse in January (14.0 per cent), December (14.0 per cent) and July (15.5 per cent), while the best sampled months are May (61.5 per cent), June (42.8 per cent) and November (31.6 per cent).

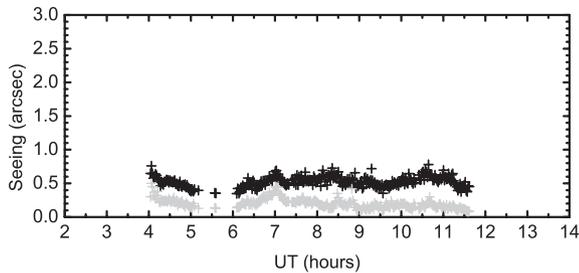


Figure 5. Example of DIMM (upper curve) and MASS (lower curve) seeing median values during a good steady night (2007-08-12).

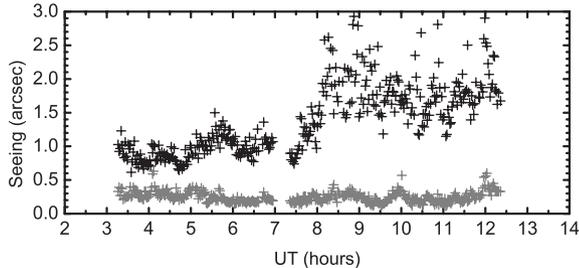


Figure 6. Example of DIMM (upper curve) and MASS (lower curve) seeing median values during a night on which only DIMM seeing degrades during the night (2006-03-21).

4 RESULTS

We have calculated the seeing from MASS, DIMM and simultaneous MASS–DIMM, obtaining nightly, monthly, seasonal, annual and global statistics (first quartile, median and third quartile, via cumulative distributions). The behaviour of the measured seeing expressed as $\log(\varepsilon)$ was verified to follow normal statistics. We obtained an expected correlation between seeing coverage percentage and deviations from a lognormal distribution. The seeing distribution is expected to be lognormal because ε is a random variable that ranges from 0 to infinity. Fried & Mevers (1974) confirmed r_o as a lognormally distributed random variable.

4.1 Nightly statistics

We have made a nightly analysis of all available data (~ 800 nights of DIMM data, ~ 620 nights of MASS data and ~ 600 nights of simultaneous data, out of ~ 1400 nights, which corresponds to the total length of the campaign), which are either partially covered or fully covered nights. We found a great variety for the behaviour of both the DIMM and the MASS: nights with excellent seeing throughout the night; erratic seeing nights; degrading seeing, in which there is a sudden burst of bad seeing, etc. In the following paragraphs, we discuss a couple of examples.

In Fig. 5, we present one night (2007 August 12) with good steady seeing. For both DIMM and MASS, the seeing variations are well correlated. The median seeing measured by DIMM and MASS is 0.53 and 0.19 arcsec, respectively.

In Fig. 6, we present one night (2006 March 21) in which it is clear that there is a strong lack of correlation between the DIMM and MASS seeing. Only the DIMM seeing degraded during the night, while the MASS seeing remained steady with a median of 0.24 arcsec.

The median standard variation of the whole atmosphere seeing within a night is 0.19 arcsec (with first and third quartiles 0.12 and 0.29 arcsec, respectively).

As an example of simultaneous MASS–DIMM nightly statistics, we show in the left panels of Figs 7 and 8, the seeing median values for some of the best sampled months (2006 September with 25 nights and 2007 August with 24 nights).

4.2 Monthly statistics

In Table 5, we present detailed monthly statistics for DIMM and MASS data for the whole campaign.

Apart from the worst median seeing value obtained in 2005 January, which happens to be the month with the poorest coverage (0.4 per cent; see Table 4), DIMM seeing values vary from 0.6 to 1.1 arcsec and MASS seeing values vary from 0.3 to 0.4 arcsec. An example of monthly statistics is shown in the right panels of Figs 7 and 8, which contain the seeing cumulative distribution functions (CDFs) for the same months previously mentioned. For DIMM, we obtain a median seeing of 0.62 and 0.61 arcsec, respectively, while for MASS we obtain 0.31 and 0.27 arcsec, respectively.

4.3 Seasonal statistics

In Fig. 9, we show the seeing seasonal behaviour. For each season, we plot the DIMM and MASS median seeing values for the corresponding months. The DIMM seeing displays a pronounced seasonal variability, and there seems to be a slight correlation between the DIMM and MASS variations. It is clear that the worst whole atmosphere seeing occurs in winter, although at the end of the season there is a tendency towards a better seeing. This tendency continues until the middle part of summer, when the best seeing is achieved, worsening progressively towards autumn.

In the upper part of Table 6, we present the seasonal statistics for the entire observing run. As mentioned above, the worst whole atmosphere seeing occurs in winter (0.97 arcsec) and the best in summer (0.64 arcsec).

The differences in seasonal MASS are smaller, indicating that most of the large DIMM seeing variations are a result of turbulence occurring near the ground (see Section 4.5).

4.4 Annual statistics

In Figs 10 and 11, we present the DIMM and MASS seeing measurements for the years 2006 and 2007, which are the best sampled years in terms of seasonal coverage.

In both figures, we can see a clear seasonal variation of the DIMM seeing, whereas the MASS values tend to remain more stable throughout the year.

The lower part of Table 6 presents the yearly DIMM and MASS statistics. It is interesting to note that the best whole atmosphere seeing occurs for 2006 (0.74 arcsec), which is the best sampled year.

4.5 Ground-layer statistics

We calculated the ground-layer (GL) seeing ε_{GL} (from 7 to 500 m), which is defined as the difference between the DIMM and MASS seeing. As we note from equation (1), the contributions of the different layers to the seeing must be summed as the 5/3 power, which yields

$$\varepsilon_{GL} = \left(\varepsilon_{DIMM}^{5/3} - \varepsilon_{MASS}^{5/3} \right)^{3/5}. \quad (2)$$

In the data acquisition process, it might occur that $\varepsilon_{DIMM} < \varepsilon_{MASS}$. These occurrences correspond to what Tokovinin (2007)

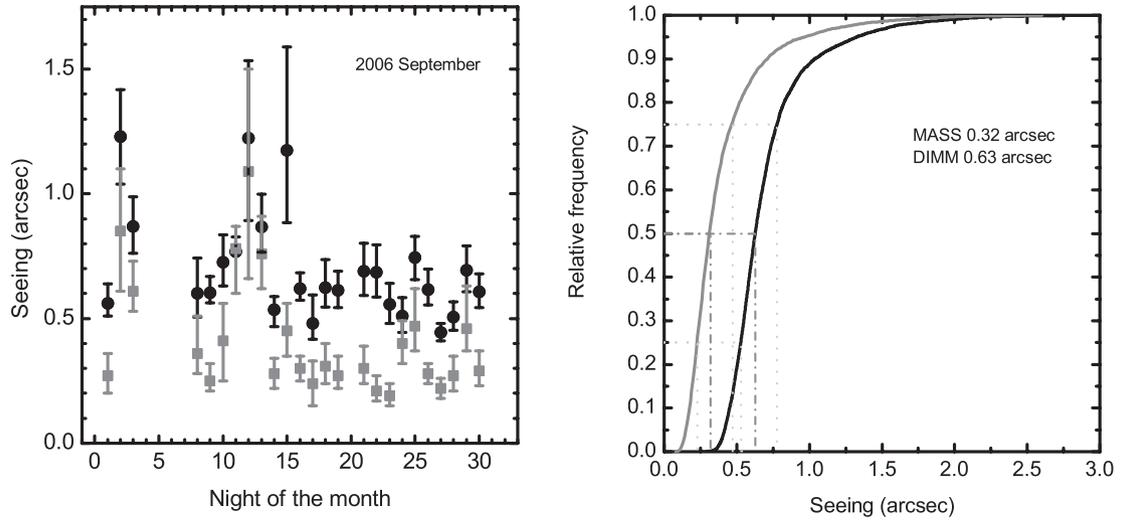


Figure 7. Left panel: DIMM (circles) and MASS (squares) statistics for simultaneously obtained data. Median seeing values (with lower and upper limits represented by first and third quartiles, respectively) for each night of the month in 2006 September. Right panel: seeing CDF for the same month. The left curve represents MASS values with a median of 0.32 arcsec, and the right curve represents DIMM values with a median of 0.63 arcsec.

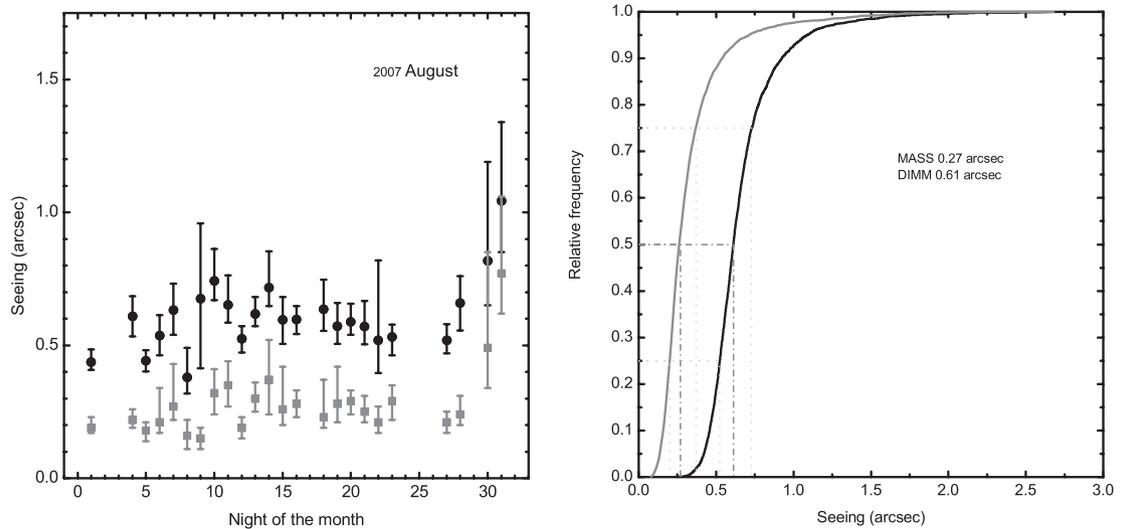


Figure 8. Left panel: DIMM (circles) and MASS (squares) statistics for simultaneously obtained data. Median seeing values (with lower and upper limits represented by first and third quartiles, respectively) for each night of the month 2007 August. Right panel: seeing CDF for the same month. The left curve represents MASS values with a median of 0.27 arcsec, and the right curve represents DIMM values with a median of 0.61 arcsec.

Table 5. Median seeing monthly values (arcsec).

Month	Year											
	2004		2005		2006		2007		2008		Total	
	DIMM	MASS	DIMM	MASS								
January	–	–	1.47	0.82	0.75	0.36	1.10	0.47	–	–	1.01	0.44
February	–	–	–	–	1.07	0.52	0.98	0.41	0.86	0.34	0.99	0.41
March	–	–	–	–	1.08	0.33	0.82	0.39	0.96	0.50	0.92	0.37
April	–	–	0.98	0.40	0.83	0.37	0.92	0.45	–	–	0.88	0.40
May	–	–	0.77	0.28	0.64	0.30	0.76	0.30	0.89	0.43	0.75	0.32
June	–	–	0.84	0.30	0.74	0.41	0.73	0.39	0.65	0.33	0.75	0.36
July	–	–	0.94	0.59	0.72	0.46	0.58	0.30	–	–	0.68	0.41
August	–	–	–	–	0.64	0.35	0.61	0.27	–	–	0.63	0.31
September	–	–	–	–	0.62	0.31	–	–	–	–	0.62	0.31
October	1.08	0.46	0.85	0.33	0.75	0.38	–	–	–	–	0.83	0.40
November	0.97	0.41	0.83	0.42	0.83	0.40	0.89	0.52	–	–	0.85	0.41
December	–	–	0.78	0.38	0.82	0.38	–	–	–	–	0.80	0.38

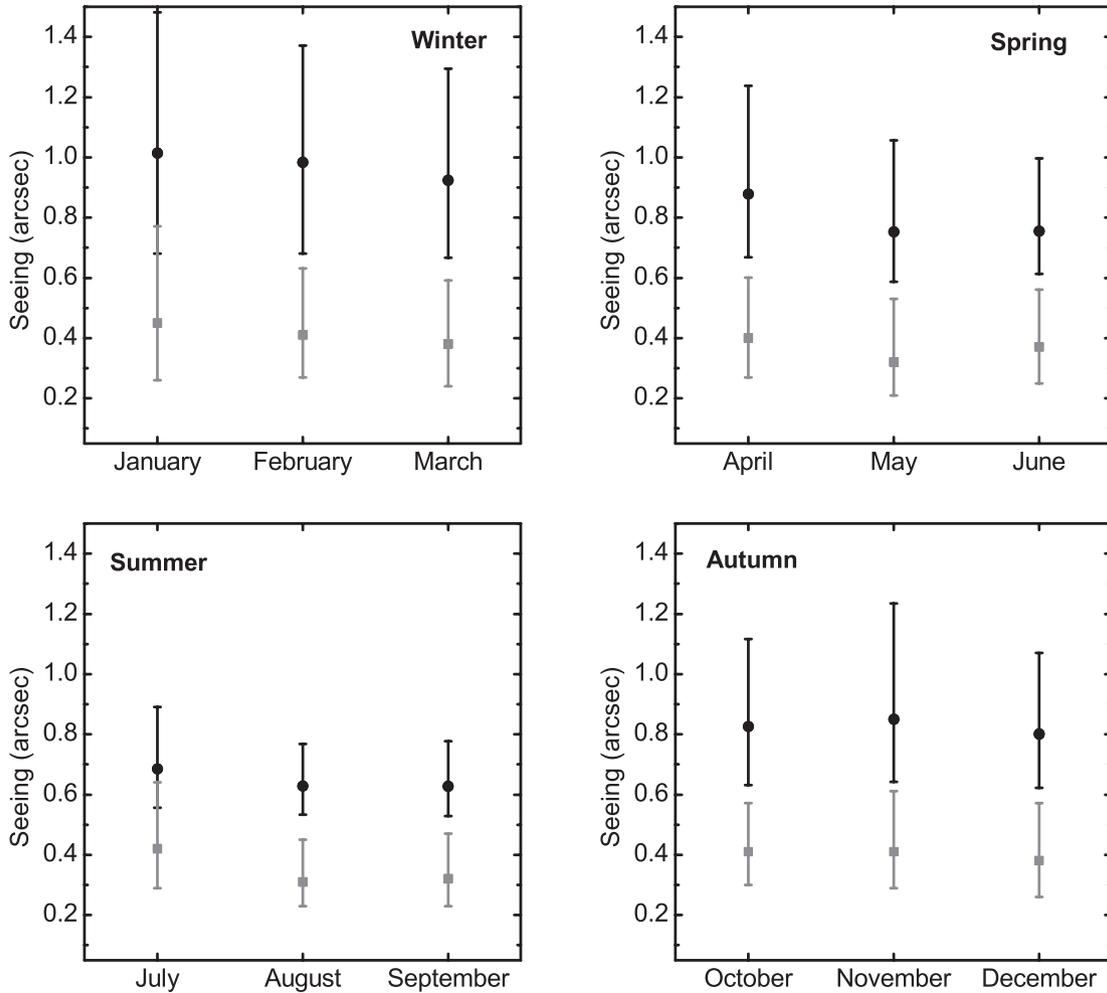


Figure 9. Median seeing values (with first and third quartiles as error bars) for each month of every season covered by the campaign (2004–2008). Symbols as in Fig. 7, left panel.

Table 6. Seasonal and annual seeing statistics (arcsec).

Season	First quartile	DIMM			First quartile	MASS Median	Third quartile	Ground layer			Coverage per cent
		Median	Third quartile	First quartile				First quartile	Median	Third quartile	
Winter	0.67	0.97	1.38	0.26	0.40	0.64	0.51	0.73	1.11	18.2	
Spring	0.61	0.78	1.07	0.23	0.35	0.54	0.46	0.59	0.81	44.6	
Summer	0.54	0.64	0.79	0.24	0.33	0.48	0.38	0.46	0.56	19.9	
Autumn	0.64	0.83	1.16	0.28	0.40	0.58	0.46	0.63	0.92	22.3	
Year											
2004	0.72	1.04	1.51	0.31	0.44	0.65	0.56	0.81	1.27	18.2	
2005	0.65	0.82	1.13	0.24	0.36	0.54	0.49	0.65	0.89	17.7	
2006	0.58	0.74	1.02	0.25	0.37	0.55	0.42	0.54	0.76	45.3	
2007	0.60	0.80	1.17	0.24	0.37	0.58	0.46	0.60	0.87	26.4	
2008	0.61	0.82	1.11	0.26	0.38	0.57	0.45	0.62	0.86	14.1	

defined as ‘over-shoots’. We have found that the total number of these occurrences corresponds to ~ 1.5 per cent. We have decided to reject these data; we note that the amount of rejected data is small, and therefore the overall statistics of the GL seeing are not affected.

In the GL section of Table 6, we present the seasonal and yearly results for the GL seeing values. In Table 7, we show the monthly variation of the GL seeing for the entire observing run. We note that

the best GL seeing is during July, August and September months, with a value ~ 0.46 arcsec.

Again, the GL behaviour is similar to the DIMM seeing; it is best in summer and worst in winter. This is because the MASS values are always nearly constant, showing that the high-altitude turbulence at SPM is small. Therefore, the main contribution to the whole atmosphere seeing at SPM comes from a strong GL.

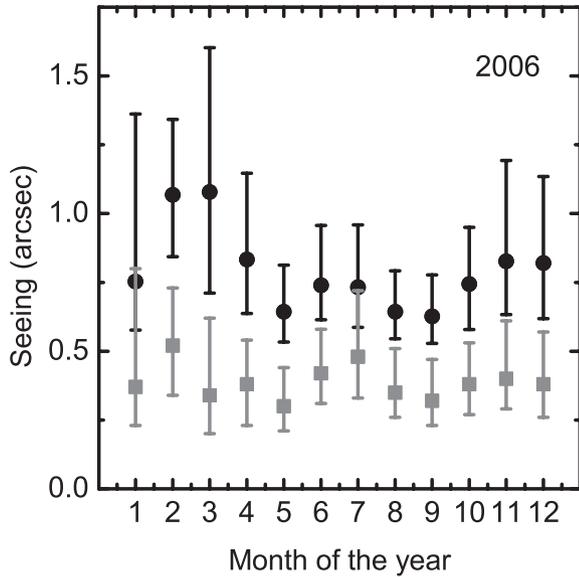


Figure 10. DIMM (circles) and MASS (squares) simultaneously obtained data. Median seeing values (with first and third quartiles as error bars) for each month of 2006.

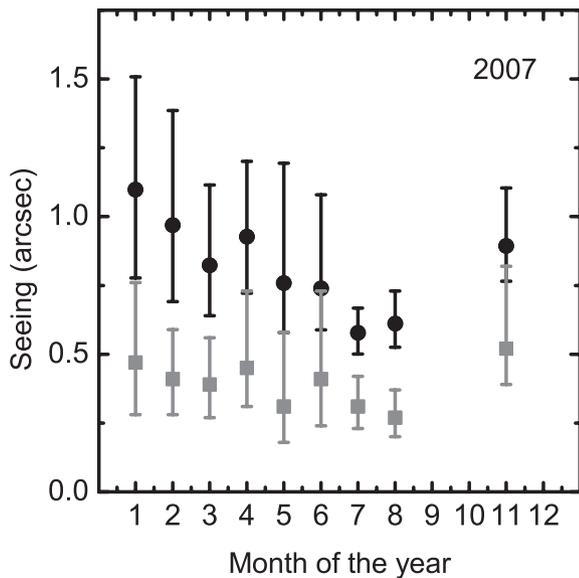


Figure 11. DIMM (circles) and MASS (squares) simultaneously obtained data. Median seeing values (with first and third quartiles as error bars) for each month of 2007.

4.6 Global statistics and hourly trend

In the left panel of Fig. 12 we show the CDF for the DIMM, MASS and derived GL seeing for all simultaneous data. Table 8 shows the overall seeing results.

Skidmore et al. (2009) have argued that the DIMM seeing at SPM rises during the second half of the night (see their fig. 4). We decided to explore the seeing behaviour and to look for a possible degradation during the night. In Fig. 13, we have plotted the number of data as a function of the hour at which they were taken. It is clear that before 4 UT hours and after 11 UT hours, the number of measurements taken was substantially smaller than within 4–11 UT. This justifies the calculation of an overall CDF in this restricted

Table 7. Ground-layer monthly median seeing (arcsec).

Month	Year					Total
	2004	2005	2006	2007	2008	
January	–	0.97	0.60	0.82	–	0.76
February	–	–	0.77	0.76	0.72	0.75
March	–	–	0.89	0.61	0.67	0.69
April	–	0.78	0.64	0.65	–	0.66
May	–	0.65	0.50	0.58	0.65	0.58
June	–	0.68	0.53	0.53	0.49	0.57
July	–	0.64	0.45	0.42	–	0.45
August	–	–	0.46	0.48	–	0.47
September	–	–	0.47	–	–	0.47
October	0.81	0.72	0.56	–	–	0.63
November	0.80	0.61	0.62	0.61	–	0.64
December	–	0.58	0.62	–	–	0.60

range, presented in the right panel of Fig. 12. The second line of Table 8 shows the overall results only for the same interval. As is clear, the resulting statistics does not significantly change when using the restricted time interval.

In Fig. 14, we plot the DIMM and MASS hourly results integrated over the whole campaign. The seeing seems to be worse at the beginning and at the end of the night. However, the number of data (N) that support this assertion is small, and it is clear from the figure that these data correspond to the longest nights of the year (i.e. winter nights where seeing is usually worse). The points on the plot have error bars corresponding to $1/\sqrt{N}$.

We have made a weighted fifth grade polynomial fit to the points. It is clear that in the interval delimited by the vertical dotted lines (corresponding to the shortest night of the year), the fit is essentially linear and horizontal, which might indicate that the seeing remains constant throughout the night. We know that by giving the data points an error bar equal to $1/\sqrt{N}$, those points within the 4–11 UT interval (where N is sufficiently large) have a determinant influence on the results of the fit. However, it is correct to do it this way, because we have shown that the statistical results in the 4–11 UT interval are the same as those for the whole interval (see Table 8).

In order to explore, with precision, the seeing behaviour at the beginning and the end of the night, we analyse the data in a different manner – we integrate with respect to the astronomical dusk and to the astronomical dawn, calculated for each night of the year. We do this because the beginning and the end of the night occur at a different time (UT) throughout the year.

We include Figs 15 and 16, which show the median seeing versus hours after astronomical dusk and before astronomical dawn, respectively.

Performing a linear fit to the DIMM points contained within the length of the shortest night, we find it to be essentially flat with slopes $9.0311 \times 10^{-4} \pm 0.0016$ for Fig. 15 and 0.0024 ± 0.0016 for Fig. 16.

The MASS points do not seem to show any significant tendency in either case, with slopes of $3.9400 \times 10^{-4} \pm 0.0016$ and $-2.4118 \times 10^{-4} \pm 0.0016$.

Thus, we conclude that the seeing at SPM does not statistically change either shortly after dusk or towards the last few hours of the night, in contrast with the results reported by Skidmore et al. (2009), and in good agreement with the findings of Echevarría et al. (1998) and Sánchez et al. (2003) where no clear tendency was found.

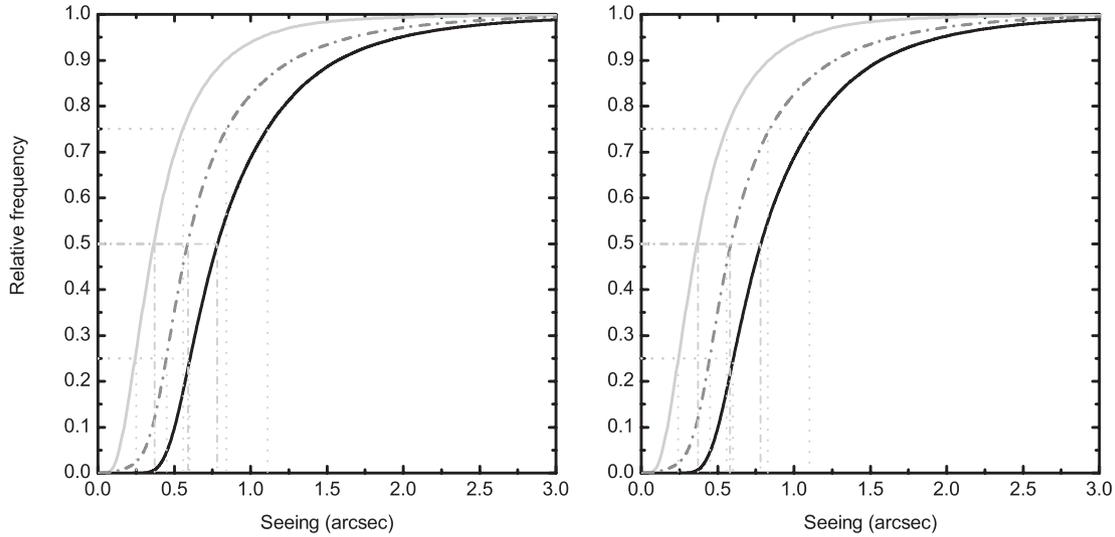


Figure 12. MASS, DIMM and GL statistics for simultaneously obtained data. Left panel: CDFs for the whole campaign (2004–2008) including all data points: median(MASS) = 0.37 arcsec; median(DIMM) = 0.78 arcsec; median(GL) = 0.59 arcsec. Right panel: CDFs for the whole campaign (2004–2008) including only 4–11 UT data points: median(MASS) = 0.37 arcsec; median(DIMM) = 0.77 arcsec; median(GL) = 0.58 arcsec. Left curves represent MASS values, middle curves represent GL values and right curves represent DIMM values.

Table 8. Global seeing statistics (arcsec).

Data	DIMM			First quartile	MASS		Ground layer		
	First quartile	Median	Third quartile		Median	Third quartile	First quartile	Median	Third quartile
All	0.60	0.78	1.11	0.25	0.37	0.56	0.45	0.59	0.84
4–11 UT	0.60	0.78	1.10	0.24	0.37	0.56	0.45	0.58	0.83

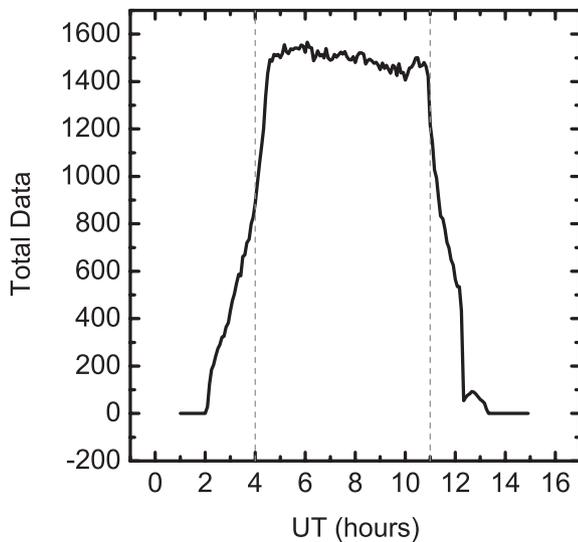


Figure 13. Total number of hourly simultaneous DIMM and MASS measurements (N). The vertical lines delimit the interval between 4 and 11 UT hours.

4.7 Comparison with previous results

Our seasonal results (see Section 4.3) can be compared with the findings of Echevarría et al. (1998) with the STT and CM monitors and those of Michel et al. (2003b) with a DIMM monitor. Echevarría et al. (1998) found a summer median of 0.58 arcsec while Michel et al. (2003b) found a median of 0.55 arcsec, compared with the

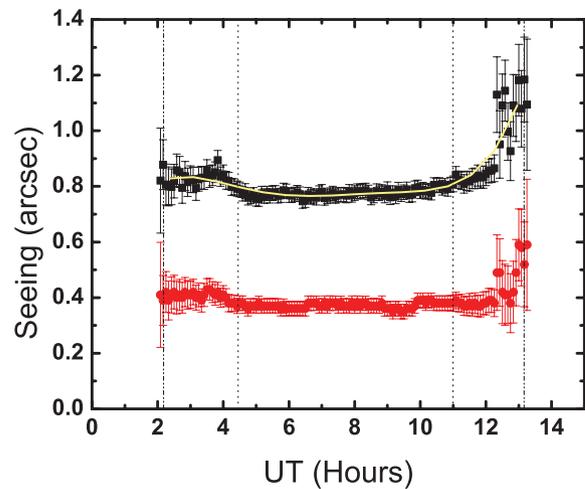


Figure 14. Hourly seeing computed from total simultaneous DIMM (upper curve) and MASS (lower curve) data. The error bars correspond to $1/\sqrt{N}$. The fitted curve to the DIMM data corresponds to a weighted fifth degree polynomial. Vertical dotted lines indicate the shortest night, whereas vertical dash-dotted lines delimit the longest night of the year.

value of 0.64 arcsec obtained here. Although we find higher values in all seasons in this paper, summer is still shown to be the best season in all studies. We point out that the coverage percentages in summer, autumn and winter, presented in this paper, are particularly low (≤ 23 per cent). Still, the median value for spring is much higher than in previous works: 0.60 arcsec in Echevarría et al. (1998), 0.61

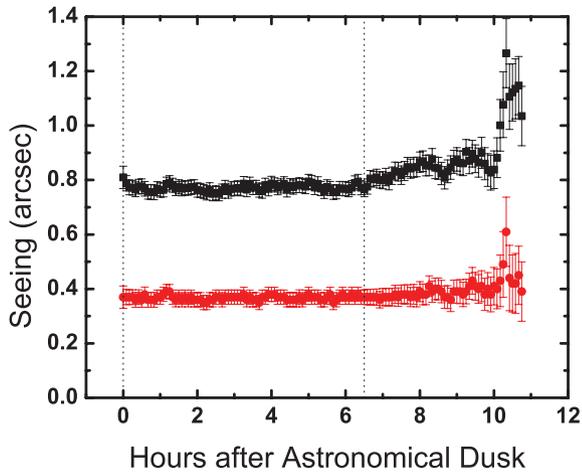


Figure 15. Hourly seeing computed from total simultaneous DIMM (upper curve) and MASS (lower curve) data, for hours after astronomical dusk. The error bars correspond to $1/\sqrt{N}$. Vertical dotted lines delimit the shortest night of the year.

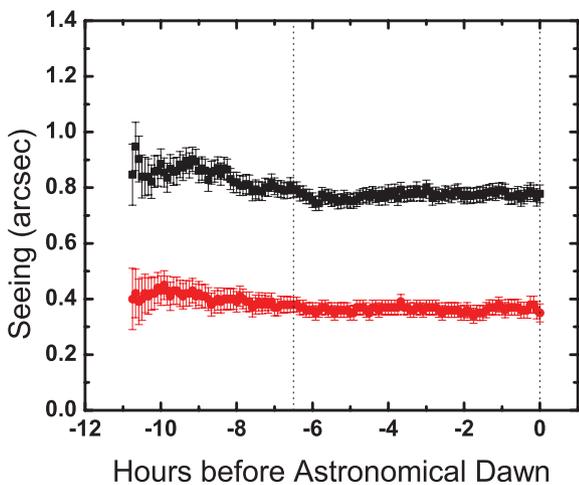


Figure 16. Hourly seeing computed from total simultaneous DIMM (upper curve) and MASS (lower curve) data, for hours before astronomical dawn. The error bars correspond to $1/\sqrt{N}$. Vertical dotted lines delimit the shortest night of the year.

arcsec in Michel et al. (2003b) and 0.78 in this paper. The results for autumn are 0.68, 0.63 and 0.83 arcsec respectively, while the results for winter are 0.69, 0.77 and 0.97 arcsec, respectively. Thus, the results are consistent, if not in absolute values, in the fact that summer yields the best values, while winter is the worst season. The mean values for all three campaigns are 0.79, 0.68, 0.61 and 0.70 arcsec for winter, spring, summer and autumn, respectively, while the overall median average is 0.70 arcsec. This value is higher than the median seeing in the first two campaigns and lower than the results in this paper (see Section 4.6). The differences show the skewness produced by uneven coverage during the year in all three campaigns.

Our global seeing results are in good agreement with those of Skidmore et al. (2009). The slight differences found could be the result of a larger temporal coverage in our data set, from 2004 October to 2008 August.

If we compare the results in this work (Table 8) with those of previous studies (see Table 1 and Section 4.3), we find that the whole atmosphere seeing (ϵ_{DIMM}) is larger than most of the values

reported previously. This could be the result of a slight degradation in seeing in recent years.

Based on the results for Paranal and La Silla (Sarazin et al. 2008), we suggest that the apparent seeing degradation found at SPM might be correlated with climate change.¹ We have consulted the Climatic Data Base of North-West Mexico (<http://peac-bc.cicese.mx/datosclim>), which contains weather data for a number of stations near the SPM observatory site for the years 1981–2008. For this time period, we found that the temperature tends to increase by 0.05 °C per year, while the water precipitation tends to decrease by 5 mm per year. These variations clearly point to a climate change that might produce local effects. Whether the seeing degradation is a result of these effects has yet to be established. However, a full study of the dependence of the seeing value with the SPM climate change is beyond the scope of this paper.

From a statistical point of view, we have found that the seeing at SPM does not suffer any degradation towards dawn, in contrast with the results reported by Skidmore et al. (2009). However, the consistent increase of seeing values towards the end of the night might suggest, as Skidmore et al. (2009) have stated, that seeing degrades towards dawn. It would be necessary to collect a large number of observations towards dawn, so that this result could be established with a sufficient degree of statistical significance.

Carrasco et al. (2012) have studied SPM solar radiation (cloud coverage) using the TMT data for the same period presented in this paper. They have stated that SPM skies are clear in spring, relatively cloudy in summer and fairly clear in winter. It is interesting to notice that there appears to be a correlation between the cloud cover during day time and the nightly value of the seeing, in the sense that cloudy days have better seeing at night, and vice versa. This might indicate that the processes that occur when the cloud cover is dissipated contribute to smaller amounts of atmospheric turbulence. This is an interesting point that merits further study, which is beyond the scope of this work.

5 SUMMARY AND CONCLUSIONS

In this paper, we have used the data obtained by the TMT Site-Testing Project for the SPM site in the north-west of Mexico. The data consist of DIMM and MASS measurements taken over a period of nearly five years (2004 October to 2008 August, ~1400 nights). A variety of previous studies have measured the seeing at SPM. The obtained median seeing varies from 0.50 to 0.79 arcsec, although these measurements have been taken in different epochs and with disparate instruments. The coverage of each observing run is also limited.

For the analysis presented in this paper, we have made a detailed coverage study, obtaining percentages of total observed time per night with respect to total night length. This is the first time that this approach has been presented in the seeing astronomical literature. The total coverages for DIMM, MASS and simultaneous data are 40.2, 27.9 and 26.4 per cent, respectively. This means that, of the 1400 available nights, the DIMM data were obtained in an equivalent of 563 ‘fully observed’ nights (nights with a 100 per cent time coverage), whereas for the MASS this corresponds to 391 nights and for the simultaneous data it corresponds to 370 nights.

We have calculated nightly, monthly, seasonal, annual and global statistics of the seeing from MASS, DIMM and simultaneous MASS–DIMM observations. The simultaneous MASS–DIMM

¹ Sarazin M., 2010: <http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/paranal/seeing/singstory.html>.

results indicate that the best seeing is obtained for 2006 September (DIMM, 0.62 arcsec; MASS, 0.31 arcsec) and 2007 August (DIMM, 0.61 arcsec; MASS, 0.27 arcsec). These months correspond to our definition of the summer season, in which the calculated seeing is 0.64, 0.33 and 0.46 arcsec, which are median values for DIMM, MASS and GL, respectively. This makes summer the best seeing season at SPM. It is worth noting that the seeing obtained for 2006 (DIMM, 0.74 arcsec; MASS, 0.37 arcsec; GL, 0.54 arcsec) is the best yearly seeing of the whole campaign, and it also corresponds to the best sampled year. For the GL seeing, the best month is July with a value of 0.45 arcsec. The overall results yield a median seeing of 0.78 arcsec (DIMM), 0.37 arcsec (MASS) and 0.59 arcsec (GL). Compared with previous works, we have found that our whole atmosphere seeing values are slightly larger than most of the values reported previously. Perhaps this is because of a degradation of seeing with time, which might be caused by climate effects. The hourly analysis clearly shows that there is no statistically significant tendency of seeing degradation towards dawn, in contrast with that reported by Skidmore (2009).

These results show that SPM is a competitive astronomical site, where it would be worth performing a continuous astroclimate evaluation.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper is based on data kindly made available to the public at <http://sitedata.tmt.org/> and obtained by the TMT Site-Testing Project. We acknowledge the TMT team and the technical and administrative staff of the OAN–SPM for their dedication and efforts in this campaign.

We thank the referee, J. Osborn, as well as an anonymous referee, for their careful reading of the manuscript, which resulted in significant improvements to this work.

Partial support from the DGAPA (Universidad Nacional Autónoma de México) PAPIIT projects IN109809, IN122409 and IT104311-2 is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Alvarez M., López E., 1982, in Corral M. A. M., ed., *Simposio de Historia de la Astronomía en México*. UNAM, Mexico, p. 311
- Alvarez M., Maisterrena Y., 1977, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 2, 43
- Alvarez M., Michel R., Reyes-Coca S., Troncoso-Gaytán R., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 13
- Araiza Quijano M. R., Cruz-González I., 2011, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 47, 409
- Avila R., Cuevas S., 2009, *Optics Express*, 17, 10926
- Avila R., Vernin J., Cuevas S., 1998, *PASP*, 110, 1106
- Avila R., Masciadri E., Vernin J., Sánchez L. J., 2004, *PASP*, 116, 682
- Avila R., Carrasco E., Ibañez F., Vernin J., Prieur J.-L., Cruz D. X., 2006, *PASP*, 118, 503
- Avila R., Sánchez L. J., Ibañez F., Vernin J., Masciadri E., Azouit M., Agabi A., Cuevas S., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 71
- Avila R., Sánchez L. J., Cruz-González I., Castaño V. M., Carrasco E., 2011, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 47, 75
- Bohigas J., Núñez J. M., 2010, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 46, 89
- Bohigas J. et al., 2008, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 44, 231
- Carrasco E., Sarazin M., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 103
- Carrasco E., Avila R., Carramiñana A., 2005, *PASP*, 117, 104
- Carrasco E., Carramiñana A., Sánchez L. J., Avila R., Cruz-González I., 2012, *MNRAS*, 420, 1273
- Conan R. et al., 2002, *A&A*, 396, 723
- Cruz-González I., Avila R., Tapia M., eds., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19
- Cruz-González I. et al., 2004, *Proc. SPIE*, 5382, 634
- Echevarría J., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 41
- Echevarría J. et al., 1998, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 34, 47
- Els S. G. et al., 2008, *Appl. Opt.*, 47, 2610
- Els S. G., Travouillon T., Schöck M., Riddle R., Skidmore W., Seguel J., Bustos E., Walker D., 2009, *PASP*, 121, 527
- Fried D. L., Mevers G. E., 1974, *Appl. Opt.*, 13, 2620
- Hiriart D., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 90
- Hiriart D., Ochoa J. L., García B., 2001, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 37, 213
- Kornilov V., Tokovinin A., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Safonov B., 2007, *MNRAS*, 382, 1268
- Masciadri E., Garfías T., 2001, *A&A*, 366, 708
- Masciadri E., Avila R., Sánchez L. J., 2002, *A&A*, 382, 378
- Masciadri E., Avila R., Sánchez L. J., Cuevas S., Garfías F., Agabi A., Azouit M., Vernin J., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 63
- Masciadri E., Avila R., Sánchez L. J., 2004, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 40, 3
- Mendoza E. E., 1971, *Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya*, 6, 95
- Mendoza E. E., 1973, *Mercury*, 2, 9
- Mendoza E. E., Luna J., Gómez T., 1972, *Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya*, 6, 215
- Michel R., Echevarría J., Costero R., Harris O., 2003a, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 37
- Michel R., Echevarría J., Costero R., Harris O., Magallón J., Escalante K., 2003b, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 39, 291
- Michel R., Hiriart D., Chapela A., 2003c, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 99
- Otárola A., Hiriart D., Pérez-León J. E., 2009, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 45, 161
- Parrao L., Schuster W. J., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 81
- Riddle R. L., Schöck M., Skidmore W., 2006, *Proc. SPIE*, 6267, 56
- Roddier F., 1981, *Progress in Optics*, Vol. 19. North-Holland, Amsterdam, p. 281
- Sánchez L. J. et al., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 23
- Sánchez L. J. et al., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 93
- Sarazin M., Roddier F., 1990, *A&A*, 227, 294
- Sarazin M., Melnick J., Navarrete J., Lombardi G., 2008, *The Messenger*, 132, 11
- Schöck M. et al., 2009, *PASP*, 121, 384
- Schöck M., Els S., Otárola A., Riddle R., Skidmore W., Travouillon T., *Proc. SPIE*, 7736, 66
- Schuster W. J., Parrao L., 2001, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 37, 187
- Skidmore W., Els S., Travouillon T., Riddle R., Schöck M., Bustos E., Seguel J., Walker D., 2009, *PASP*, 121, 1151
- Sohn E., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 122
- Tapia M., 1992, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 24, 179
- Tapia M., 2003, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 19, 75
- Tapia M., Cruz-González I., Avila R., 2007a, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 28, 9
- Tapia M., Cruz-González I., Hiriart D., Richer M., 2007b, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 47
- Tokovinin A., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 31, 61
- Tokovinin A., Kornilov V., 2007, *MNRAS*, 381, 1179
- Tokovinin A., Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O., 2003, *MNRAS*, 343, 891
- Tokovinin A., Vernin J., Ziad A., Chun M., 2005, *PASP*, 117, 395
- Vogiatzis K., Hiriart D., 2004, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 40, 81
- Walker M. F., 1971, *PASP*, 83, 401
- Walker M. F., 1984, in Ardeberg A., Woltjer L., eds, *Proc. ESO Workshop on Site Testing for Future Large Telescopes*, Vol. 18. ESO, Garching, p. 3
- Wang L. et al., 2007, *Appl. Opt.*, 46, 6460
- Wehinger P., 2007, *Rev. Mex. Astron. Astrofis. Ser. Conf.*, 28, 1

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.