

# MEDICIONES DE SEEING EN EL COMPLEJO ASTRONÓMICO EL LEONCITO MEDIANTE LA TÉCNICA DIMM, Y SU CORRELACIÓN CON PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Dr. Luis Mammana

## Resumen

*Se presentan resultados del análisis de mediciones de seeing corregidas al cenit en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) aplicando la técnica del Monitoreo del Movimiento Diferencial de la Imagen (DIMM). Las mismas son el resultado de la campaña que el Complejo viene realizando desde noviembre de 2018 en el sitio Cerro Burek, y son el resultado de 988 noches de observación a una altura de 6.2 m del suelo, con un tiempo de exposición de 4 ms. La mediana arroja un valor de  $1.54 \pm 0.90$  arcsec, con un primer cuartil en 1.31 arcsec y un tercer cuartil en 2.03 arcsec. La media fue de  $1.64 \pm 0.68$  arcsec, y la moda  $1.23 \pm 0.68$  arcsec. El 18.6% de las mediciones tienen valores por debajo de 1 arcsec. Comparaciones de estos valores con mediciones previas realizadas en el sitio Jorge Sahade (2016-2018) (mediana en  $1.87 \pm 0.89$  arcsec), permiten estimar que la calidad del cielo en el Cerro Burek es un 18% superior a la de aquel. Se observa una paulatina degradación del seeing conforme avanza la noche, con medianas para la primera y segunda mitad de la noche de  $1.48 \pm 0.80$  arcsec, y  $1.60 \pm 1.01$  arcsec respectivamente, con un nivel de confianza del 95%. Concluimos que este es un fenómeno inherente al sitio que se suma a los degradantes 'mirror seeing' y 'dome seeing'. Del análisis de las medianas mensuales surge que los meses con mejor seeing son enero y febrero ( $\sim 1$  arcsec) para luego ir empeorando hasta junio y julio ( $\sim 2$  arcsec), hasta mejorar un poco en los dos últimos meses del año ( $\sim 1.25$  arcsec). Los regímenes de lluvias en el sitio tienen una curva justamente inversa. La mejor estación es el verano ( $1.12 \pm 0.34$  arcsec) seguida por la primavera ( $1.31 \pm 0.36$  arcsec). Las dos estaciones con peor seeing son invierno ( $1.78 \pm 0.45$  arcsec) y otoño ( $1.62 \pm 0.49$  arcsec). De la correlación entre parámetros meteorológicos y el seeing concluimos que éste mejora a medida que disminuye la velocidad del viento (independiente de su dirección), o si aumenta la temperatura, la humedad y/o el punto de rocío, parámetro éste con el que guarda la correlación más fuerte.*

*Key Words: site testing; atmospheric effects; seeing; terrestrial atmosphere; optical turbulence; differential image motion monitor technic.*

## 1. La medición del seeing

### 1.a. Introducción

Debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, tal como lo predice la *Teoría de la Difracción*, cuando ésta viaja por un medio homogéneo y atraviesa una apertura circular, se difracta produciendo un patrón de interferencia con anillos concéntricos, alternativamente, brillantes y oscuros en torno a un disco brillante conocido como *Disco de Airy*, con un diámetro proporcional al cociente de su longitud de onda y dicha apertura.

A su vez, si la luz que proviene de una fuente estelar atraviesa la atmósfera terrestre, dicho patrón estará lejos de verse como el patrón de difracción teórico y cambia rápidamente con el tiempo, quedando degradado, formando lo que en Astronomía se conoce como *figura de seeing*, o simplemente *seeing*. Dicha degradación es provocada principalmente por las turbulencias sufridas por las capas atmosféricas de aire que atraviesa un rayo, que hacen fluctuar el índice de refracción fuertemente dependiente de la densidad del aire, y, por lo tanto, la dirección del rayo. El *disco de seeing* es una referencia fundamental a la hora de caracterizar la calidad óptica del cielo de un sitio astronómico, cuantificando los efectos de la turbulencia atmosférica sobre la calidad de las imágenes, la que podemos definir como la estabilidad y ausencia de distorsión en una imagen puntual a lo largo de un intervalo de observación.

Al parámetro *seeing* se lo podría definir como el *diámetro angular en unidades de arcsec ( $\epsilon_o$ ) del ancho a la altura media (Full-Width at Half Maximum o FWHM) del perfil de la función de dispersión puntual ideal (Point Spread Function o PSF) que modela el patrón de difracción tridimensional que genera en el plano focal del sistema, una fuente puntual en el infinito adquirida con un largo tiempo de exposición.*

El valor del seeing siempre será mayor al FWHM instrumental fijado por el *Disco de Airy*, el que puede estimarse mediante la expresión,

$$\epsilon_o(\text{rad}) = \frac{4}{\pi} \times \frac{\lambda}{D} \quad (1),$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda característica y  $D$  la apertura del sistema.

### **1.b. La técnica del Movimiento Diferencial de la Imagen (DIMM)**

Si bien hay métodos avanzados para medir el seeing de un sitio como el SCIDAR (*Scintillation Detection and Ranging*) (Fuensalida et al., 2008) o el MASS (*Multi-Aperture Scintillation Sensor*) (Tokovinin y Kornilov, 2007), el DIMM (*Differential Image Motion Monitor*) es el método estándar y más ampliamente difundido (Sarazin y Roddier, 1990; Vernin y Muñoz-Tuñon, 1995).

Consiste en un armado óptico compuesto por un telescopio en el cual la luz proveniente de una fuente pasa por dos aperturas idénticas separadas por una distancia dada, donde una de ellas posee una cuña que desvía levemente los rayos incidentes, formando en el plano focal dos imágenes gemelas bien separadas.

El objetivo de este sistema es aplicar la técnica del Movimiento Diferencial de la Imagen que se basa en el hecho de que si bien existen factores que afectan por igual a dichas imágenes gemelas en movimientos erráticos que se cancelaran al aplicar el método (errores de seguimiento, vibraciones del telescopio, temblores por viento -*wind shaking*-, imagen fuera de foco, etc.) (Michel et al. 2003), existen factores que afectan de manera individual a cada haz y hacen que se detecten variaciones diferenciales medibles de la separación entre ellos. Dichas variaciones, producto del movimiento relativo de ambas imágenes, son un reflejo de las inclinaciones locales del frente de onda. Así, con esta técnica las variaciones diferenciales en la distancia entre las imágenes se miden para obtener una estimación cuantitativa de la turbulencia ocasionada por la fluctuación de fase del frente de onda, y finalmente de esta manera poder estimar un valor para el seeing.

Un hecho que aprovecha esta técnica diferencial es, como se dijo, que todo movimiento errático de las imágenes gemelas queda anulado (salvo ante sacudones muy bruscos), permitiendo medir los desplazamientos relativos causados por las perturbaciones atmosféricas. El problema es que los movimientos de la imagen debidos a la turbulencia atmosférica y los debidos a los movimientos erráticos del telescopio no se pueden separar. En efecto, la varianza de los movimientos que podemos obtener es la varianza *total*:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{turbulencia}^2 + \sigma_{telescopio}^2 \quad (2).$$

Precisamente la técnica DIMM fue pensada para eliminar del análisis esos movimientos erráticos del telescopio y obtener información solamente de los movimientos de las imágenes gemelas que fueran provocados solamente por la turbulencia atmosférica.

Así, si se quiere comprender el comportamiento del seeing es necesario contar con un modelo de turbulencia de capas. Fue recién a partir de la década de 1960 que el problema de la degradación de la imagen por turbulencia atmosférica comenzó a comprenderse. Esta comprensión se basó en considerar los frentes de onda distorsionados como un proceso estacionario aleatorio con un espectro de ley potencia: el *modelo Kolmogorov-Obukhov* (Tatarskii 1961; Roddier 1981), en el cual un solo parámetro es suficiente para -entre otros fenómenos- describir la forma de una PSF de exposición prolongada, y, por lo tanto, la degradación de la imagen estelar causada por la turbulencia atmosférica. Dicho parámetro es el *radio de coherencia de Fried* ( $r_0$ ) (Fried, 1965) (o *Parámetro de Fried*) y está relacionado con las propiedades estadísticas espaciales del índice de refracción. Fue introducido precisamente por D. L. Fried (Fried, 1965; 1966), el cual postuló (1966), que  $r_0$  puede pensarse como *el diámetro de apertura del telescopio que produciría un punto de difracción del mismo tamaño que el producido por la turbulencia atmosférica en una fuente puntual observada con un espejo infinito*.

Una medida muy importante asociada al *Parámetro de Fried* es la *razón de degradación*  $D_T/r_0$ , donde  $D_T$  es la apertura del telescopio. Es una medida de la degradación relativa en resolución promedio de una imagen, una cantidad fundamental en observatorios profesionales (Vernín y Muñoz-Tuñón, 1995). En efecto, múltiples autores como Dennefeld y Fort (1986), de Serego Alighieri (1986), y Roddier y Lena (1984), destacan sus repercusiones en diferentes campos de la Astronomía, como la Fotometría, la Imagen Directa, la Espectroscopía o la técnica de Alta Resolución Angular (HAR). Tomando como ejemplo a nuestra base de datos, vemos que a un seeing de 1.5 arcsec le corresponde el parámetro de Fried  $r_0 = 7$  cm, con lo cual para un telescopio de apertura  $D_T = 215$  cm la degradación alcanza un factor 30. Para un telescopio con una apertura de 8 m, en un sitio con un seeing característico de 1 arcsec ( $r_0 = 10$  cm), la degradación llega a un factor 80.

Según el *Criterio de Strehl* (Sarazin & Roddier, 1990), en el caso de telescopios de grandes aperturas, su límite de resolución  $\theta$  en presencia de turbulencia atmosférica estará dado por:

$$\theta = \frac{4}{\pi} \times \frac{\lambda}{r_0} \quad (3).$$

La analogía entre esta expresión y la que nos da el FWHM instrumental fijado por el *Disco de Airy* (1), nos permite hablar de la analogía entre  $D$  y  $r_0$ , y así, gracias al *modelo de Kolmogorov-Obukhov* se demuestra que existe una

relación entre el FWHM ( $\epsilon_0$ ) de la PSF, la longitud de onda  $\lambda$  y el *Parámetro de Fried*  $r_0$ , y que dicha relación responde a la siguiente expresión (Martinez et al., 2010):

$$\epsilon_0(\text{rad})=0.976 \times \frac{\lambda(\text{cm})}{r_0(\text{cm})} \quad (4), \text{ con } r_0 < D.$$

En total acuerdo, el valor de proporcionalidad de dicha expresión ya había sido estimado numéricamente por Dierickx utilizando un software estándar (Dierickx, 1988).

En la Fig. 1 hemos graficado las curvas de seeing en función de  $r_0$  según distintos modelos. La curva consignada como *This paper* corresponde a los valores tomados de la base de datos de nuestra campaña.

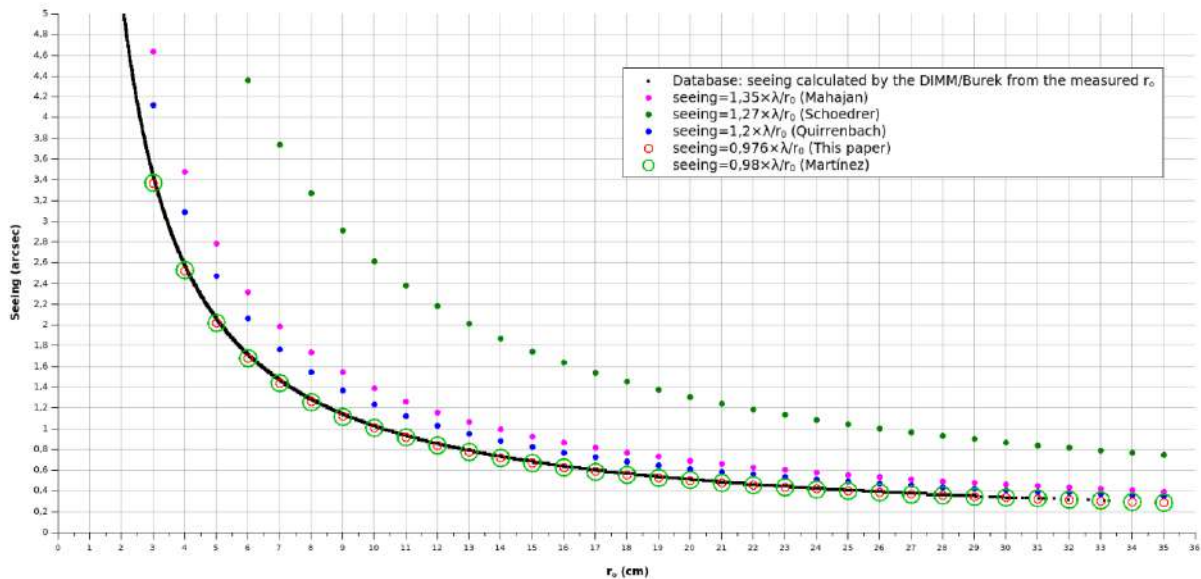


Fig. 1. Gráfico de distintos modelos de seeing en función del Parámetro de Fried ( $r_0$ ). Incluimos los puntos [seeing; $r_0$ ] surgidos de nuestra base de datos, y ajustamos una curva para obtener el coeficiente de proporcionalidad correspondiente a nuestra base.

Ajustando los datos de nuestra campaña obtenemos un coeficiente de proporcionalidad igual que 0.976. Ello nos está indicando que nuestro DIMM considera el FWHM por *default* que da el *modelo Kolmogorov* para  $\lambda=500$  nm y ángulo cenital cero (Martinez et al. 2010). Con dicho coeficiente y las conversiones adecuadas, la relación entre el seeing medido y el *Parámetro de Fried* en el CASLEO resulta:

$$\text{Seeing}(\text{arcsec})=\frac{10.313}{r_0(\text{cm})} \quad (5).$$

En principio, podríamos estar tentados a medir el movimiento de la imagen en el foco, obtener el valor  $r_0$ , y con él, mediante la expresión (5), el seeing. Si bien esta técnica fue empleada durante mucho tiempo, requiere de un telescopio muy robusto y masivo que evite reverberaciones en el sistema óptico.

El conocimiento de la *función de estructura de fases*, que se supone resulta de un comportamiento *Kolmogoroviano* de la turbulencia, nos permite evaluar la variación longitudinal y transversal (esto es, en el sentido paralelo y perpendicular a la línea que contiene a las dos aperturas de la máscara) del

movimiento diferencial de la imagen, cuyas varianzas son (Sarazin & Roddier, 1990):

$$\sigma_L^2 = 2 \cdot \lambda^2 \cdot (0.179 \cdot D^{-\frac{1}{3}} - 0.0968 \cdot d^{-\frac{1}{3}}) \cdot r_o^{-\frac{5}{3}} \quad (6),$$

$$\sigma_T^2 = 2 \cdot \lambda^2 \cdot (0.179 \cdot D^{-\frac{1}{3}} - 0.145 \cdot d^{-\frac{1}{3}}) \cdot r_o^{-\frac{5}{3}} \quad (7),$$

válidas sólo si  $d \geq 2D$ , donde  $D$  es la apertura de los agujeros de la máscara,  $d$  es la distancia entre ambos,  $r_o$  es el *Parámetro de Fried*, y  $\lambda$  es la longitud de onda característica, fijada por convención en 500 nm.

De esas dos expresiones se obtienen dos valores independientes para  $r_o$ . Según Sarazin y Roddier (1990) ambos valores no sólo son útiles para mejorar la estadística, sino también para asegurarnos de que ningún efecto de suavizado temporal afecte las mediciones. Como advierte Marti (1987), debido al tiempo de exposición finito, ante movimientos bruscos del telescopio -por ej. fuertes ráfagas de viento- los resultados de esta técnica de imagen diferencial puede introducir errores, resultando valores de seeing diferentes para las direcciones longitudinal y transversal. Registrar y monitorear ambos valores es la única manera de estar seguro de que se está trabajando en las condiciones de aplicabilidad de la técnica diferencial.

Se reproduce a continuación del trabajo de Sarazin et al. (1990) el gráfico de las desviaciones estándar longitudinal ( $\sigma_L$ ) y transversal ( $\sigma_T$ ) en función del *parámetro de Fried* para el caso del DIMM que emplean con  $D=4$  cm,  $d=20$  cm y  $\lambda=500$  nm, usando las expresiones (6) y (7):

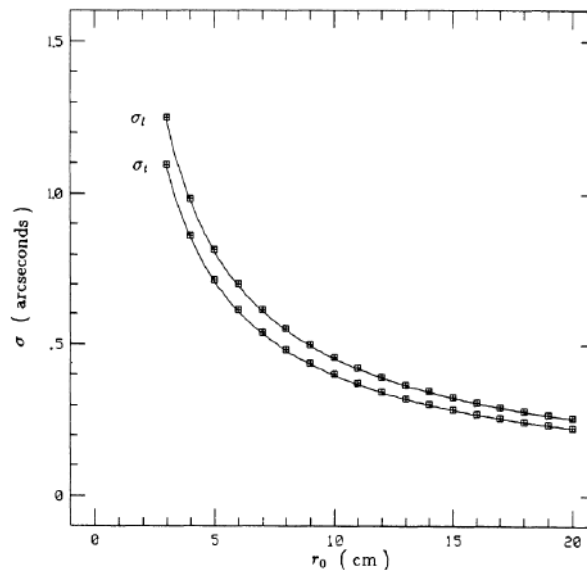


Fig. 2. Varianzas de los movimientos longitudinales y transversales de una imagen diferencial en función de los respectivos parámetros de Fried (Sarazin, M., Roddier, F., "The ESO differential imaging motion monitor", A&A, 1990)

En el caso de nuestra campaña, donde  $D=5.24$  cm,  $d=19.56$  cm, y  $\lambda=0.00005$  cm, las expresiones adoptan las siguientes formas:

$$\sigma_L = 3,78 \times r_o^{-\frac{5}{6}} \Rightarrow r_{oL} = \left[ \frac{\sigma_L}{3,78} \right]^{\frac{5}{6}} \quad (8),$$

$$\sigma_T = 3,24 \times r_o^{-\frac{5}{6}} \Rightarrow r_{oT} = \left[ \frac{\sigma_T}{3,24} \right]^{\frac{5}{6}} \quad (9).$$

En la Fig. 3 graficamos las varianzas de los movimientos longitudinales y transversales detectados entre las imágenes gemelas generadas por el DIMM en función de los respectivos *Parámetros de Fried*, calculadas a partir de las ecuaciones (8) y (9), tomando los datos de nuestra campaña, tal como el realizado por *Sarazin et al. (1990)* en su trabajo (Fig. 2).

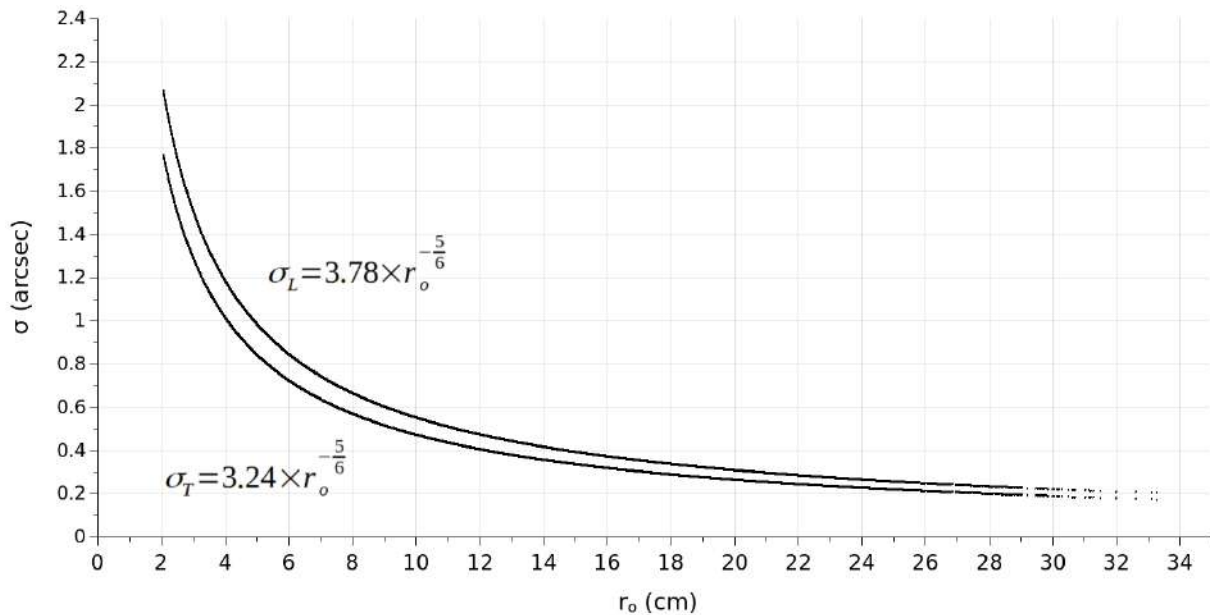


Fig 3. Varianzas de los movimientos longitudinales y transversales detectados entre las imágenes gemelas generadas por el DIMM en función de los respectivos *Parámetros de Fried*, tomados de la base de datos de la campaña de medición del seeing (CASLEO, 2018-2024).

La manera de obtener una medida de seeing empleando la técnica DIMM consiste en adquirir una cantidad predeterminada de  $N$  *frames* y calcular en cada uno las posiciones de ambas imágenes gemelas. Luego se calculan los centroides respectivos en el sistema de referencia del detector, y con ello, las distancias relativas de los mismos en cada eje ( $\Delta x$  y  $\Delta y$ ). De esa forma, cada  $N$  *frames* son calculadas las varianzas ( $\sigma_x^2 \equiv \sigma_L^2$  y  $\sigma_y^2 \equiv \sigma_T^2$ ) y empleando las ecuaciones (4), (6) y (7) se obtiene una medida individual del seeing para cada *frame*. Finalmente, el promedio de los valores de seeing (longitudinal y transversal), es la medida buscada.

### 1.c. Descripción del instrumental

Se presenta en esta sección el instrumental desarrollado por el personal del área técnica del CASLEO, como así también otros componentes que facilitan la medición del seeing aplicando la técnica DIMM en forma remota. Participaron de estos trabajos integrantes de los grupos Electrónica (GEL), Electromecánica Instrumental (GEMI), Computación (GC), Apoyo al Observador (GAO) y Conservación (GCON) del Complejo.

Las mediciones se llevaron a cabo en el sitio llamado Cerro Burek (IAU Observatory Code: I08, Alianza S4 site:  $\lambda = -69^\circ 18' 23''.9$ ;  $\phi = -31^\circ 47' 14''.4$ ;  $h = 2591$  msnm; UT-offset = -3 hs; CASLEO), desde finales de 2018 a principios de 2024. Previamente (2016-2018), se realizaron medidas en el sitio donde está emplazado el telescopio Jorge Sahade (sitio Jorge Sahade). Ambos sitios distan en línea recta unos 1.6 km en dirección NNW.

Los componentes, desarrollos y construcciones son los siguientes:

- Adaptación de un telescopio Celestron catadióptrico CPC 1100 GPS de 11" (27.94 cm).
- Cámara monocromática DMK 21AU618 de 640x480 píxeles<sup>2</sup>.
- Máscara con agujeros de 5.24 cm de diámetro separados 19.56 cm, con cuña óptica en uno de ellos.
- PC para ejecutar todos los programas necesarios con conexión a Ethernet.
- Software de medición denominado *Seeing Monitor Analyser v2.40*, adquirido a la empresa *ALCOR SYSTEM (Cyril Cavadore)*.
- Software *SeeingMeter* de desarrollo propio. Posee múltiples funciones como controlar el encendido/apagado del telescopio, la cámara CCD y los leds infrarrojos de una cámara IP en el interior de la cúpula. Apertura/cierre de la cúpula, control del foco del telescopio, acceso a los fines de carrera y a sensores que indican el porcentaje de apertura de la cúpula. Además, se cuenta con un acelerómetro para alinear el telescopio en forma remota. Por último, este programa analiza los datos que toma de un sensor de nubes y evalúa tomar decisiones sobre el cierre de la cúpula por inclemencias climáticas, como así también verificar el estado del UPS, de la PC del DIMM y de la conexión del microcontrolador a la red Ethernet. Datos tomados de *Pereyra y Pinto (2019)* y de *Pereyra et al.(2023)*.

El *SeeingMeter* interrumpe las mediciones si:

- (1) Se cae la conexión Ethernet o red Wifi del CASLEO por más de 5 min.
- (2) Se produce un fallo en la tensión eléctrica y la UPS (que mantiene la corriente del sistema), ha llegado a un límite inferior de carga.
- (3) Las condiciones del clima ponen en riesgo el instrumental.

Para ejecutar el punto (3), el sistema monitorea parámetros meteorológicos del detector de nubes y ordena cerrar el shutter (o directamente no abrirlo), si se da alguna de las siguientes condiciones:

- (a) Los datos provenientes de la estación meteorológica están desactualizados (esto es, no se reciben nuevos datos sensados durante más de 5 min).
- (b) El Sol está por encima del horizonte.
- (c) El viento supera los 60 km/hs. El sistema habilita la apertura cuando la velocidad del viento haya disminuido hasta los 36 km/hs, y ésta se mantenga en esa situación por al menos 10 min (histéresis).
- (d) La humedad es mayor que 90%. El sistema habilita su apertura cuando la humedad sea menor a dicho valor, y se mantenga en esa situación por al menos 10 min.
- (e) La diferencia entre la temperatura sensada en altura por la cámara IR del detector de nubes del Cerro Burek y la temperatura ambiente, arroja valores por encima de los -25°C. Superado ese límite, el sistema habilita la apertura recién cuando dicha diferencia haya bajado hasta los -37°C, y se mantenga en esa situación por al menos 10 min.



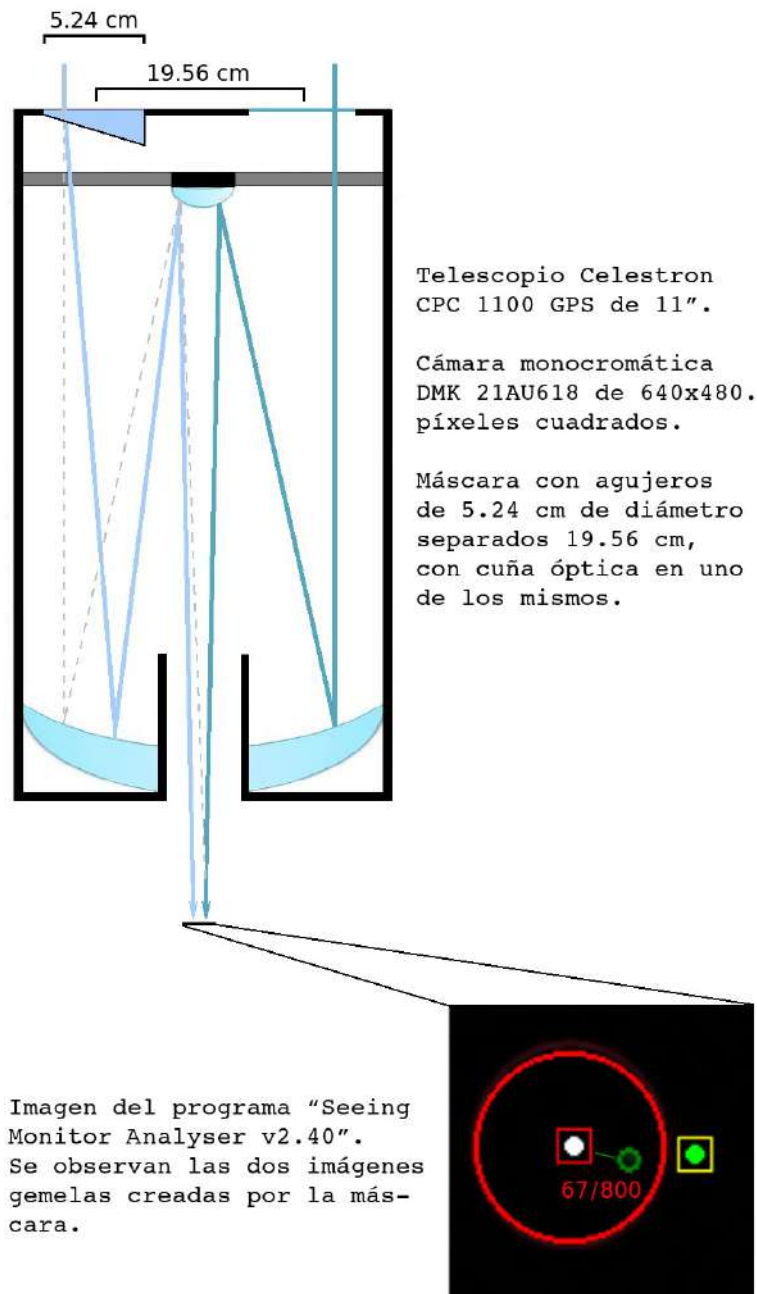


Fig. 4. Esquema del telescopio y su acondicionamiento para la aplicación de la técnica DIMM en el CASLEO. En el recuadro, las imágenes gemelas (puntos blanco y verde) en el display del Seeing Monitor Analyser.

El instrumento que acabamos de detallar, descrito en Vernin y Muñoz-Tuñón (1995), es muy similar a los empleados en los estudios de seeing en los observatorios de San Pedro Martir (Michel et al. 2003), Sierra Negra (Carrasco et al. 2003) y La Palma (Wilson et al. 1999).

La cúpula que alberga al telescopio es de tipo retráctil de lona y, para evitar la contribución de la turbulencia de la capa superficial de aire como lo recomienda la técnica DIMM, se lo instaló en una torre metálica a 6.2 m. Fue construida y diseñada por el GEMI a prueba de vibraciones, porque si bien, como se mencionó, el método diferencial elimina el movimiento errático del telescopio y, por lo tanto, las pequeñas vibraciones de la estructura no afectarían a las mediciones, vibraciones bruscas provocadas por fuertes ráfagas de vientos - frecuentes en el Cerro Burek-, pueden afectar las mediciones (Marti, 1987).





Fig. 5. imágenes del telescopio Celestron 11" con máscara de dos aperturas, una de ellas con cuña, y de la torre que alberga al mismo.

A modo de "auditoría científica" externa, del 26 al 29 de mayo de 2023 el CASLEO invitó a dos especialistas en mediciones de seeing del NOIRLab, Chile (*NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory*), el Ing. Edison Bustos y el Téc. Alejandro Gutiérrez, contactados por el observatorio con el fin de contrastar nuestros datos con los obtenidos con sus equipos de medición, corroborándose un total acuerdo entre ambas mediciones, y confirmando el buen funcionamiento de todo el instrumental para la aplicación de la técnica DIMM.

El observatorio desde su página web ofrece un servicio de *seeing on line*, donde se muestra el valor del seeing en tiempo real, y un gráfico de la progresión del mismo desde el comienzo de las mediciones de la noche:  
<http://181.27.127.127:58880/web/dimm/dimm.php>

## 2. Las observaciones

El DIMM comienza a medir en el sitio Cerro Burek el 04 de noviembre de 2018, y la base de datos analizada en este trabajo llega hasta el 27 de enero de 2024. El proceso de medición no es continuo y se ve interrumpido por diversos factores, principalmente las inclemencias del tiempo. Al momento de realizar el presente trabajo, se habían recogido 861595 datos en un total de 988 noches de observación.

El software *Seeing Monitor Analyser v2.40* genera cada dato promediando series de 800 *frames* con tiempos de exposición de 1/250 sec, y calcula para cada uno las posiciones de ambas imágenes gemela. Luego calcula los centroides respectivos en el sistema de referencia del detector, y con ello, las distancias relativas de los mismos en cada eje ( $\Delta x$  y  $\Delta y$ ). La cantidad de imágenes por serie puede variar dado que aquellas que no tengan el nivel de flujo adecuado como para definir un centroide, son descartadas. De esta manera, aproximadamente cada 800 imágenes el soft calcula las varianzas ( $\sigma_x^2 \equiv \sigma_L^2$  y  $\sigma_y^2 \equiv \sigma_T^2$ ) y empleando las ecuaciones (4), (6) y (7) obtiene una medida individual del seeing para cada *frame*, para finalmente promediar los valores (longitudinal y transversal) y obtener la medida de seeing que muestra y registra el programa. Para independizarse de la masa de aire, las observaciones son corregidas al cenit por el soft. Además, éste descarta todo valor de seeing mayor que 5 arcsec. Las mediciones no se corrigen a *tiempo nulo de exposición* (ver *interlaced-exposure technique for DIMM observation* del apartado *Exposure Time* en Tokovinin (2002)), lo que hubiera sido necesario y crítico si el fin del presente trabajo

hubiera sido comparar el seeing del CASLEO con el de otros sitios empleando la misma técnica pero con imágenes adquiridas con otros tiempos de exposición.

Dado que el tiempo muerto entre las imágenes es de 2/125 seg, se tendrá una medición de seeing cada 16 seg, lo que cumple con la recomendación de *Marc Sarazin (ESO)* de no tomar en el CASLEO mediciones menores que 10 seg, en concordancia con la opinión de *Andrei Tokovinin*, ambos autoridades internacionales en temas de medición del seeing y ya varias veces citados en este trabajo (*comunicación personal con el Dr. Hernan Muriel -informe interno del observatorio-*).

Si no se tienen ciertas precauciones, (a) la inhomogeneidad de la muestra en densidad de datos adquiridos a lo largo del tiempo -o posibles cambios seculares del seeing del lugar por fenómenos meteorológicos-, y las disparidades entre tiempos de exposición por frame (b), dificulta hacer comparaciones y estadísticas entre diferentes submuestras -años, meses, estaciones del año y/o de distintos años, etc-.

La situación (a) es salvada tomando submuestras al azar con los mismos cardinales, es decir, si por ej. se quiere ver el comportamiento del seeing en enero contra julio de un año, se toman N valores al azar no repetidos de cada mes y se comparan estadísticas. El experimento se repite al menos tres veces. En cuanto a (b), juzgamos que esas diferencias de tiempos de exposición no alteran las estadísticas, dado que en cerca del 90% de la muestra las mediciones se realizaron cada  $16 \pm 3$  seg.

La Fig. 6 es una forma de visualizar la distribución temporal de los datos. Sólo pueden apreciarse los *gaps* con intervalos de meses, semanas o días, mientras que los *gaps* diurnos entre una noche y la siguiente, o los de algunas horas, quedan invisibilizados por cuestiones de escala.

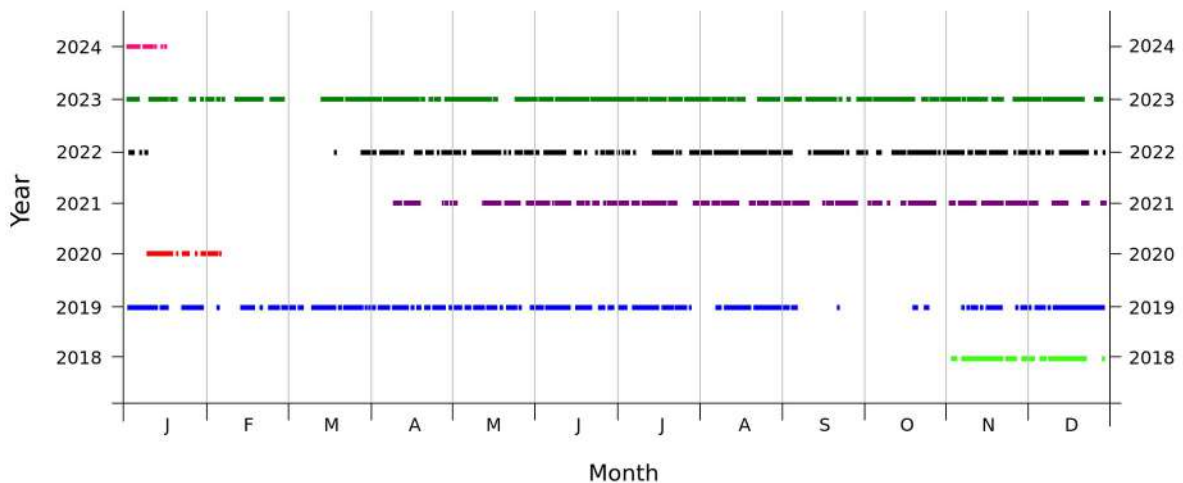


Fig. 6. Línea de tiempo en la que pueden visualizarse los períodos en los cuales se midió el seeing en el sitio Cerro Burek entre 2018 y 2024. Solamente pueden distinguirse los *gaps* entre días, semanas o meses.

Se destacan tres *gaps* importantes, siendo el más notorio el de 429.7 días (16.7 meses) desde el 6 de febrero de 2020 hasta el 10 abril de 2021, producto de la no-operatividad del DIMM en tiempos de la pandemia del COVID-19. Otro es desde comienzos de 2022 hasta el 20 de marzo de ese año, con un total de 120 días. El último de importancia es de 40 días y lo observamos entre septiembre y octubre de 2019.

Cabe aclarar que en una noche determinada pueden producirse *gaps* de varios minutos producto de distintos factores, como una pérdida de la *SNR* (*Signal-Noise Ratio*) de la estrella o el tiempo que insume cambiar de target. Hay que tener en cuenta que el DIMM es operado cada noche por el GAO (*Grupo de Apoyo al Observador*), cuya prioridad no es la operación de este instrumento, sino, precisamente, la de dar apoyo permanente al observador de turno, lo que puede llevar, en contadas ocasiones, a que el DIMM tarde en retomar sus mediciones. Un ejemplo de ello puede verse en la Fig. 13 (noche del 01 de agosto de 2023).

## 2.a. Análisis general de las mediciones de seeing

En la Fig. 7 se grafica el histograma de todo el período medido en el sitio Cerro Burek hasta el 27 de enero de 2024, junto con su *Distribución Acumulativa de Probabilidades* (o *Probabilidad de Ocurrencia*).

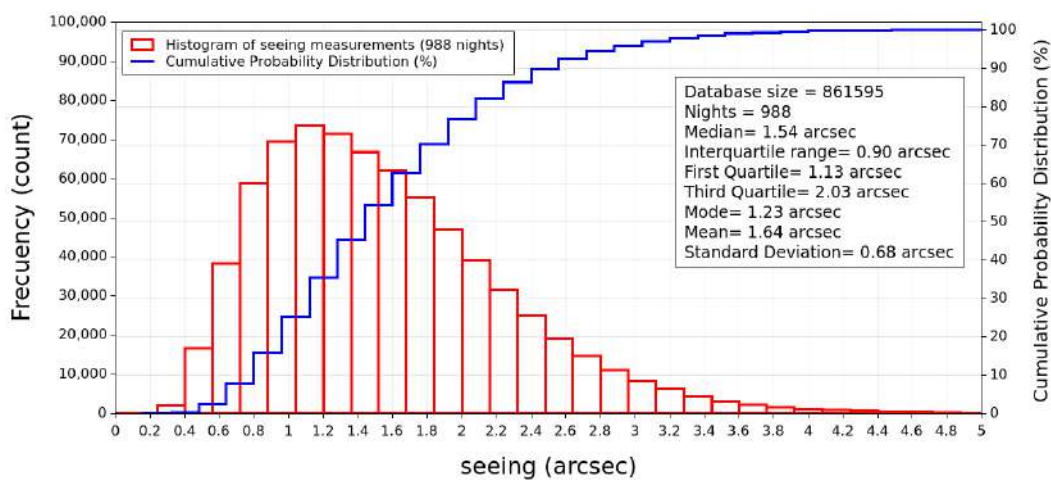


Fig. 7. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Cerro Burek normalizadas al cenit entre el 04 de noviembre de 2018 y el 27 de enero de 2024, y su correspondiente *Distribución Acumulativa de Probabilidades*. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos obtenidos.

Dado que la muestra no sigue una *distribución normal* como se aprecia en la Fig. 7, la variable estadística natural será la *mediana*. Como medida de la dispersión estadística de la misma se emplea el *rango intercuartílico* (o *rango intercuartil*), que es un parámetro de los considerados *estadísticamente robustos*.

La muestra de 861595 datos arroja un valor para su mediana de  $1.54 \pm 0.9$  arcsec. Para una mejor visualización de la distribución de los datos se realiza un diagrama tipo *box & whiskers* (Fig. 8), donde se ve que el 25% de las mediciones (primer cuartil) arroja un seeing menor que 1.13 arcsec, el 50% (mediana) es menor que 1.54 arcsec, y un 75% (tercer cuartil) adopta valores menores que 2.03 arcsec. Se incluyen también valores de otros percentiles, la media ( $1.64 \pm 0.68$  arcsec) y los extremos, máximo y mínimo de la muestra. Un dato importante que surge de la *Distribución Acumulativa de Probabilidades* es que el 18.6% de las mediciones arroja un seeing menor que 1 arcsec, mientras que el 99% de las mediciones no superan los 3.7 arcsec.

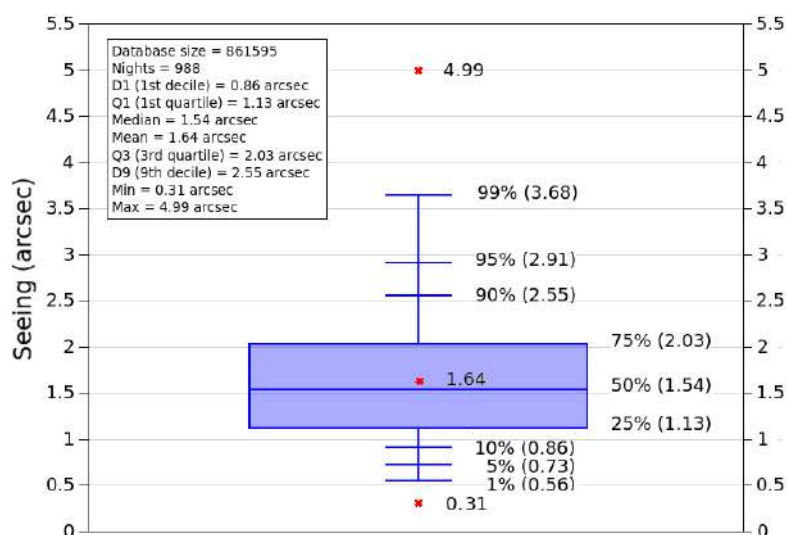


Fig. 8. Diagrama box & whiskers de las mediciones en el Cerro Burek, donde se visualiza fácilmente la distribución estadística de los datos, incluyendo diversos percentiles como los cuartiles y deciles.

En la tabla 1 reproducimos una tabla presentada por *R. Michel y colaboradores (2003)* donde comparan sus resultados del estudio de seeing en el *Observatorio Astronómico Nacional de la Sierra de San Pedro Mártir (México)*, con los de varios sitios astronómicos, todos obtenidos con la técnica DIMM. Están ordenados por número decreciente de noches observadas. En ella hemos incluido los resultados de este trabajo (Cerro Burek, Argentina).

COMPARISON WITH SIMILAR DIMM STUDIES IN OTHER SITES

Site	Site Elev. (m)	DIMM Height (m)	Exp. Time (ms)	1 <sup>st</sup> Qrt. (arcsec)	Median (arcsec)	3 <sup>rd</sup> Qrt. (arcsec)	Mean (arcsec)	N <sub>nights</sub>	Start	End	Ref.
Paranal, Chile	2636	6	5	0.64	0.82	1.08	0.91	~ 1700	03/98	11/02	(1)
La Silla, Chile	2335	6	5	0.70	0.89	1.15	0.97	~ 1400	03/99	11/02	(1)
Cerro Burek, Argentina	2591	6.2	4	1.13	1.54	2.03	1.64	988	11/18	01/24	(2)
Maidanak, Uzbekistan	2580	6	0	0.55	0.69	0.90	0.76	725	08/96	11/00	(3)
Apache Point, USA	2788	...	20	0.83	1.03	1.30	1.17	261	02/99	06/03	(4)
Kunming, China	1940	4	20	...	1.09	...	0.95	256	05/95	12/96	(4)
Gaomeigu, China	3193	4	20	...	0.78	...	0.70	234	05/95	12/96	(5)
La Palma, Spain	2400	5	10	~ 0.52	0.69	~ 0.90	...	233	10/94	08/98	(6)
Mount Fowlkes, USA	2027	1.8	10	~ 0.88	1.03	~ 1.28	...	186	07/01	07/02	(7)
San Pedro Mártir, México	2800	8.3	6	0.48	0.60	0.81	0.71	123	08/00	06/03	(8)
Sierra Negra, México	4580	5	10,20	0.62	0.78	1.05	0.90	85	02/00	04/03	(9)
Siding Springs, Australia	1130	2	10	...	...	...	1.20	64	06/93	12/93	(10)
Cerro Tololo, Chile	2200	6	0	0.79	0.96	1.17	...	48	05/02	07/02	(11)
Cerro Chico, Chile	5150	2.5	0	0.55	0.71	0.87	...	38	07/98	10/00	(12)
Devasthal, India	2540	2	10	...	1.07	...	1.20	37	10/98	12/98	(13)
South Pole	3200	12	33	~ 1.20	1.70	~ 2.20	...	28	05/95	09/95	(14)
Mauna Kea, USA	4123	...	0	...	0.88	...	0.92	13	05/02	06/02	(15)
Cananea, México	2480	2	20	0.78	0.91	1.08	...	...	02/99	10/99	(16)
Karoo Plateau, S. Africa	1760	...	...	0.74	0.92	1.16	...	...	04/94	02/98	(17)

References: (1) ESO (2002); (1) ESO (2002); (2) this work; (3) Ilyasov (2002); (4) Rest (2002); (4) Rest (2002); (5) Qian et al. (2001); (6) Wilson et al. (1999); (7) Barker et al. (2003); (8) Michel et al. (2003); (9) Carrasco et al. (2003); (10) Wood et al. (1995); (11) Tokovinin et al. (2003); (12) Giovanelli et al. (2001); (13) Stalin et al. (2001); (14) Loewenstein et al. (1998); (15) Chun et al. (2002); (16) INAOE (2002); (17) Erasmus (2000).

Tabla 1. Tabla comparativa de mediciones de seeing realizadas con la técnica DIMM en varios sitios astronómicos del trabajo de Michel y colaboradores de 2003, al que le agregamos el sitio Cerro Burek con nuestros resultados.

Si bien es claro que la comparación no favorece a nuestro sitio, tenemos que tener en cuenta que entre los listados en la tabla están los mejores cielos del



planeta. Otra observación pertinente que surge de la tabla, es que en las únicas dos características que no dependen del sitio en sí, sino de criterios a la hora de aplicar la técnica DIMM (altura a la que son medidos los datos y tiempo de exposición -*cuestiones críticas de la técnica*-) nuestras áreas técnicas coincidieron en las elecciones de esas características con los responsables aplicar la técnica en los observatorios *Paranal, La Silla, Cerro Tololo y San Pedro Martir*.

Como aclaran los autores de la tabla, hay tres aspectos que hacen que la comparación no sea sencilla: (1) algunas campañas son de muy corta duración y no cubren las variaciones durante un año completo; (2) las alturas sobre el suelo a las que se realizaron las mediciones son generalmente diferentes de un sitio a otro, y (3) los tiempos de exposición empleados no son los mismos, hecho a tener en cuenta cuando se pretende hacer una comparación estricta entre sitios, hecho que ya comentamos cuando hablamos de la importancia de corregir en esos casos *por tiempo nulo de exposición*.

Por último, también es menester aclarar que no todos los datos de la tabla han sido publicados en revistas con referato, y muchos sólo se pueden encontrar en sitios web.

A continuación veremos una comparación de los resultados que obtuvimos en el sitio Cerro Burek con los obtenidos años previos (2016-2018) en el sitio Jorge Sahade, emplazamiento del telescopio de 215 cm que le da nombre al sitio.

El objetivo principal de comenzar a operar el DIMM en el sitio Jorge Sahade en lugar de emplazarlo directamente en el lugar que había sido elegido para su operación permanente (Cerro Burek), fue tener un acceso directo e inmediato al telescopio y sus periféricos en los primeros tiempos de prueba. Así y todo, una vez terminadas dichas pruebas, se optó por mantenerlo midiendo en el sitio el tiempo suficiente como para sumar una cantidad significativa de datos y así poder comparar a futuro estadísticamente los seeing de ambos sitios.

La base de datos de seeing recopilada en el sitio Jorge Sahade cuenta con un total de 348546 mediciones realizadas durante 387 noches, entre el 30 de septiembre de 2016 y el 31 de octubre de 2018.

En la Fig. 9 se despliega el histograma de la muestra de datos medidos en el sitio, junto con su *Distribución Acumulativa de Probabilidades*.

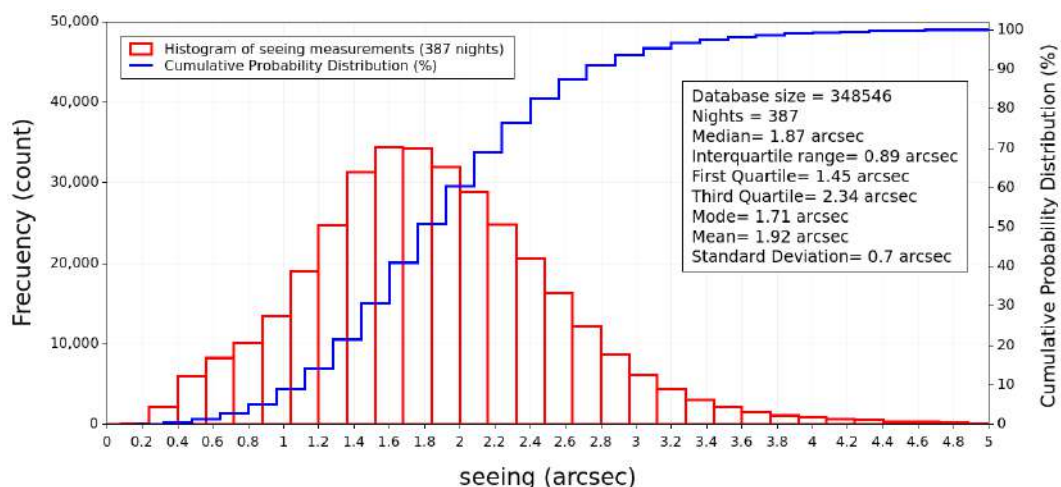


Fig. 9. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Jorge Sahade normalizadas al cenit entre el 30 de septiembre de 2016 y el 31 de octubre de 2018, y su correspondiente Distribución Acumulativa de Probabilidades. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos obtenidos.

Nuevamente, para visualizar la distribución de los datos se realiza un diagrama tipo *box & whiskers* (Fig. 10). La mediana de la muestra es  $1.87 \pm 0.89$  arcsec, sensiblemente mayor que la que arroja el sitio Cerro Burek. El primer cuartil tiene un valor de 1.48 arcsec mientras que el tercer cuartil está en 2.34 arcsec. Se aprecian en el esquema también otros percentiles, la media en  $1.92 \pm 0.7$  arcsec y los extremos, máximo y mínimo. El 8.7% de las mediciones muestra un seeing menor que 1 arcsec, mientras que el 99% posee un valor menor que 3.9 arcsec.

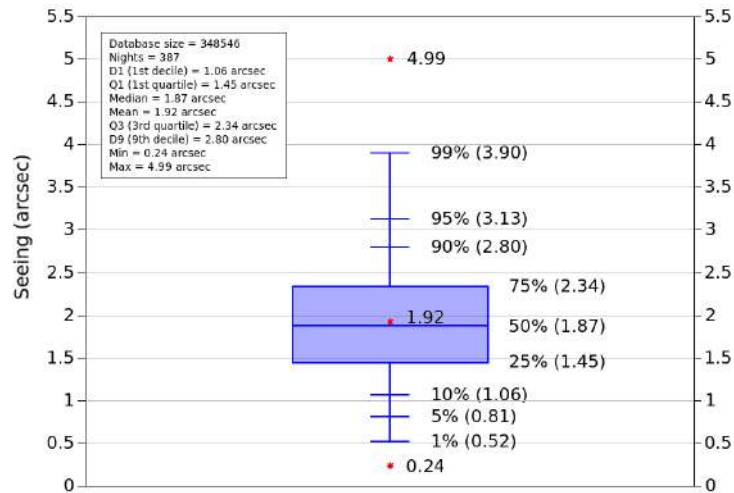


Fig. 10. Diagrama *box & whiskers* donde se visualiza fácilmente la distribución estadística de los datos, incluyendo diversos percentiles como los cuartiles y deciles.

Comparando entre sí cualquier parámetro estadístico de ambos estudios, podemos advertir que el seeing en el sitio Cerro Burek es mejor que el medido en el sitio Jorge Sahade. Considerando a la mediana como la variable estadística más representativa del valor del seeing, podemos cuantificar esa mejora en un 18%.

	Cerro Burek Site	Jorge Sahade Site	$\Delta$ (JSahade-Burek)	Improvement (%)
<b>MEDIAN (arcsec)</b>	$1.54 \pm 0.45$	$1.87 \pm 0.45$	$0.33 \pm 0.64$	<b>18%</b>
<b>MEAN (arcsec)</b>	$1.64 \pm 0.68$	$1.92 \pm 0.70$	$0.28 \pm 0.98$	<b>15%</b>

Tabla. 2. Resultados estadísticos obtenidos para las mediciones del seeing en los sitios Jorge Sahade y Cerro Burek, que confirman que el cielo en éste es de mejor calidad que el del sitio de emplazamiento del telescopio principal del Complejo en un 18%.

Estrictamente hablando, las condiciones de medición entre ambos sitios no fueron exactamente las mismas, básicamente a lo referido a cuestiones de altura y entorno de medición, pero juzgamos que estas diferencias no son tan críticas como para invalidar cualquier comparación.

## 2.b. La distribución del seeing

Una parte esencial de este trabajo es el estudio comparado del seeing entre distintos períodos dentro de la muestra, como por ejemplo, entre las distintas estaciones de un año o entre dos estaciones iguales de distintos años, entre meses, mitades de noches, etc.

Con relación a si el seeing mejora o empeora con los años, nada podría afirmarse a priori, pero estando éste, como veremos, correlacionado con parámetros meteorológicos que sufren cambios interanuales como consecuencia de factores y agentes dinámicos en superficie (ej. Viento Zonda), factores de la cupla océano-atmósfera (ej. El Niño-Oscilación Sur) y los llamados factores

*oceánicos*, es posible que esos cambios también afecten el comportamiento interanual del seeing. A ellos se suman los factores y agentes que operan en altura (*Jet Stream*, *Río Atmosférico*, etc.). Todas estas cuestiones son abordadas por Poblete y Escribá (2020) en su trabajo *Caracterización estadística y dinámica del clima de Pampa El Leoncito y su entorno*. Por ello, debemos tener cuidado al trabajar y hacer estadísticas de iguales períodos, pero de distintos años.

Como veremos en breve, concretamente lo que podemos afirmar es que el seeing en el año 2019 fue peor que en el resto de los años, pero se debe tener en cuenta que (Fig. 6), hablamos de una muestra pobre en cantidad de años como para hacer una estadística interanual robusta.

Con el fin de realizar comparaciones fiables entre los valores estadísticos de dos submuestras, se optó por considerar submuestras del mismo cardinal. Para ello se programó un código que selecciona al azar la misma cantidad de valores de una submuestra que de la otra, diseñado de manera tal que los datos de una submuestra (1) no se repitan y (2), que sea una distribución *random normal*, garantizándose así que todos tengan la misma probabilidad de ocurrencia.

El criterio elegido para fijar el cardinal en cada caso es tomar una cantidad igual al 50% de la muestra más pequeña que interviene en la comparación. Entonces, si por ej. queremos comparar la primavera de 2022 (25628 mediciones en 68 noches) con la primavera de 2023 (37831 mediciones en 73 noches) el código elige al azar  $25628/2=12814$  mediciones de cada período y sobre esas submuestras se hacen las estadísticas y se comparan resultados.

Con el fin de asegurarnos que los resultados son estadísticamente significativos (es decir, que, por ej. las medianas de dos períodos son independientes) y así poder rechazar o no una *Hipótesis Nula* ( $H_0$ ) con un *nivel de significación*  $\alpha$ , se realizan test estadísticos apropiados.

Como las distribuciones no son normales como hemos visto, los test empleados deberán ser *no-paramétricos* (es decir, no se asume que los datos provienen de una distribución particular), y el adecuado para relacionar medianas es el *Test de Hipótesis U de Mann-Whitnet*, que es el equivalente al *ANOVA unidireccional* de la *estadística paramétrica*. Esta prueba asume como  $H_0$  que si una mediana da mayor que la otra es por azar. Lo esperable en todos los casos será que el test rechace la *Hipótesis Nula*, confirmando así la llamada *Hipótesis Alternativa* ( $H_1$ ) que en este caso afirmará que efectivamente una de las medianas es mayor que la otra, y ese será un hecho fehaciente y no producto del azar.

Elegimos como *nivel de significación*  $\alpha = 0.05$  -punto de corte habitualmente elegido entre resultados significativos y no significativos- que se traduce en un *nivel de confianza* del 95%, lo que implica que rechazar la  $H_0$  es 95% seguro, lo que según nuestro criterio es suficiente para validar el rechazo. Evitamos fijar un  $\alpha$  más pequeño -lo que daría un nivel de confianza mayor-, para evitar falsos negativos. Por lo tanto, con dicho nivel de confianza podemos asegurar que habrá sólo un 5% de probabilidades de que la  $H_1$  sea falsa.

Si el valor de *p-value* que arroja el *Test de Mann-Whitnet* es menor que  $\alpha=0.05$ , se rechaza la *Hipótesis Nula*  $H_0$  que afirma que la relación de orden entre las medianas de las submuestras es  $M_1 \geq M_2$ , y se acepta la  $H_1$  ( $M_1 < M_2$ ) lo que



es equivalente a decir que  $M_1 < M_2$  es un resultado estadísticamente significativo en un 95%, y así, consideramos que ese resultado no es producto del azar.

Para el caso de comparar entre sí las medianas de varias submuestras, emplearemos de forma similar el *Test de Hipótesis de Kruskal-Wallis*, que es una generalización del *Test de Mann-Whitnet*, que nos dirá si hay una diferencia significativa entre dichas submuestras, pero no nos dirá qué grupos son diferentes.

### 2.b.i. Distribución del seeing a lo largo de la noche

En este párrafo nos indagamos sobre si el hecho ya conocido de que la degradación del seeing medido en las imágenes obtenidas con los telescopios del Complejo a medida que transcurre la noche, es sólo atribuible a causas locales (*mirror seeing + dome seeing + instrumental seeing*), o también contribuye a ese deterioro un fenómeno de *global seeing* típico del sitio, con esa misma tendencia. De ser detectada dicha tendencia en las mediciones del DIMM (naturalmente independientes de las medidas de seeing sobre imágenes de ciencia), confirmaría la existencia de un tal fenómeno atmosférico en el sitio.

Para ello dividimos la muestra total entre los valores del seeing que fueron medidos en la primera mitad de la noche (22:30-04:30 UT) y los que fueron medidos en la segunda (04:30-11:30 UT). Como era de esperar, las mediciones están repartidas equitativamente.

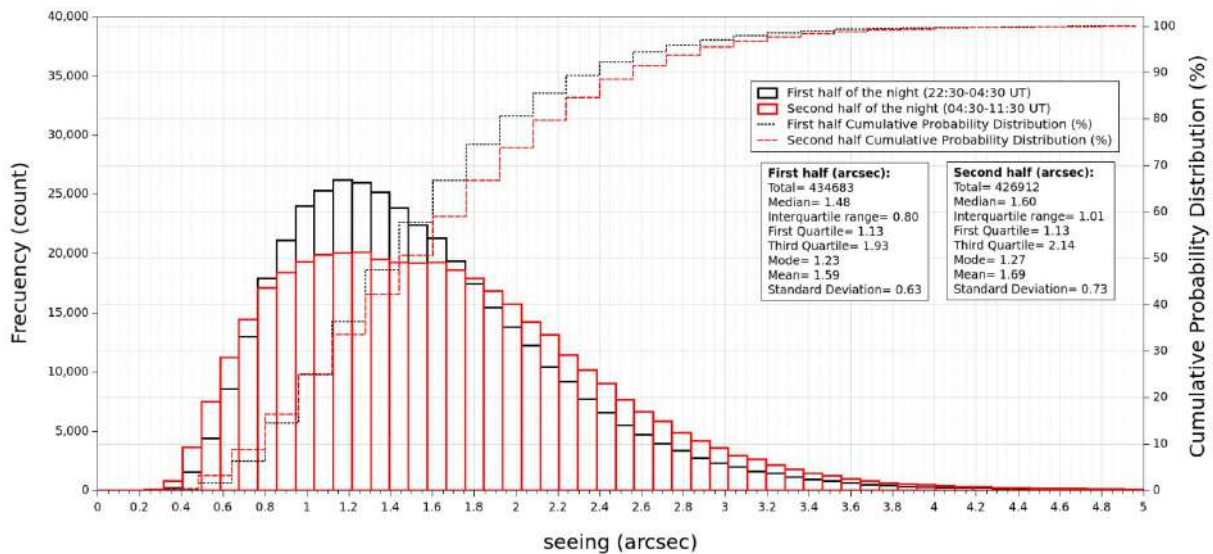


Fig. 11. Histogramas de las mediciones del seeing durante las primeras y segundas mitades de las noches en el período 2018-2024. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos obtenidos.

Lo primero que llama la atención en los histogramas de la Fig. 11 es que los datos de la segunda parte de la noche muestran una distribución más ancha (curtosis=0.6) que los de la primera parte (curtosis=1.6), evidenciando una mayor variedad de valores en las medidas del seeing, con un alto error en la mediana. En lo cuantitativo, el valor de la mediana de las mediciones tomadas en la primera parte de la noche es  $M_1=1.48\pm 0.80$  arcsec, y en la segunda,  $M_2=1.60\pm 1.01$  arcsec. Analizando más profundamente sobre si este resultado ( $M_1 < M_2$ ), -que parece implicar que efectivamente el seeing se degrada conforme avanza la noche-, es estadísticamente significativo o es producto del azar viniendo ambos valores de una muestra en común dividida arbitrariamente en dos submuestras, aplicamos el *Test de Hipótesis de Mann-Whitnet* bajo la

*Hipótesis Nula* enunciada como  $H_0 = "M_1 \geq M_2"$ . Estableciendo un *nivel de significación*  $\alpha = 0.05$ , el test arroja un *p-value*  $= 0 < \alpha = 0.05$ , con lo cual la  $H_0$  es rechazada, y podemos afirmar con un *nivel de confianza* del 95% que, efectivamente, el seeing es peor en la segunda mitad de la noche que en la primera.

Concluimos entonces que el deterioro del seeing a medida que avanza la noche es un fenómeno atmosférico típico del sitio, sin perjuicio de que puedan contribuir a ello otras causas como la inercia térmica de los espejos o las diferencias entre las temperaturas internas y externas de las cúpulas.

En las Fig. 12, 13 y 14 se despliega el comportamiento del seeing a lo largo de tres noches con calidades muy diferentes: una muy mala, otra regular, y una tercera excelente para los estándares en del lugar. Con el fin de hacer una mejor comparación entre los tres histogramas, se eligió en mismo *bin* para los tres. Los resultados de las estadísticas particulares de cada noche están consignados en los gráficos. Algo más general es hablar sobre las *curtosis* de las distribuciones, que aumentan a medida que vamos de la peor a la mejor de las tres noches. En otras palabras, las noches tienen los datos más dispersos cuanto peor es el seeing. En la mejor, la distribución está notoriamente desplazada hacia los valores más pequeños de seeing, y tiene los datos más concentrados en torno a la mediana.

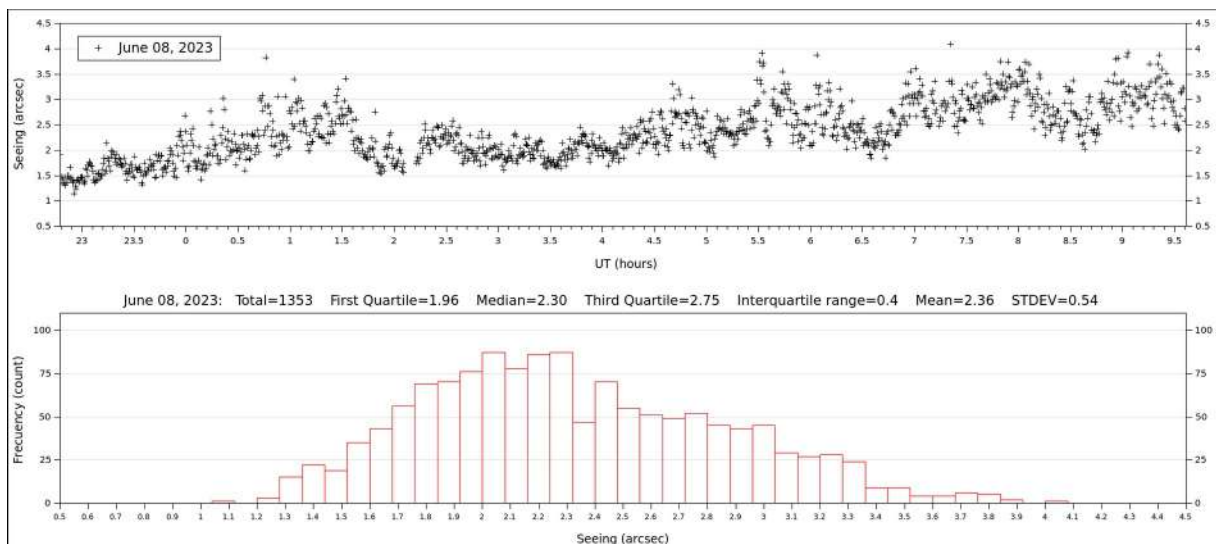


Fig. 12. Valores del seeing medido a lo largo de 11 hs en la noche del 08 de junio de 2023. Justo en esta noche se ve un claro y sostenido empeoramiento del seeing a medida que avanza la noche. La mediana tiene un valor de  $2.30 \pm 0.40$  arcsec, muy por encima de la mediana que estimamos para el sitio de  $1.54 \pm 0.90$  arcsec.

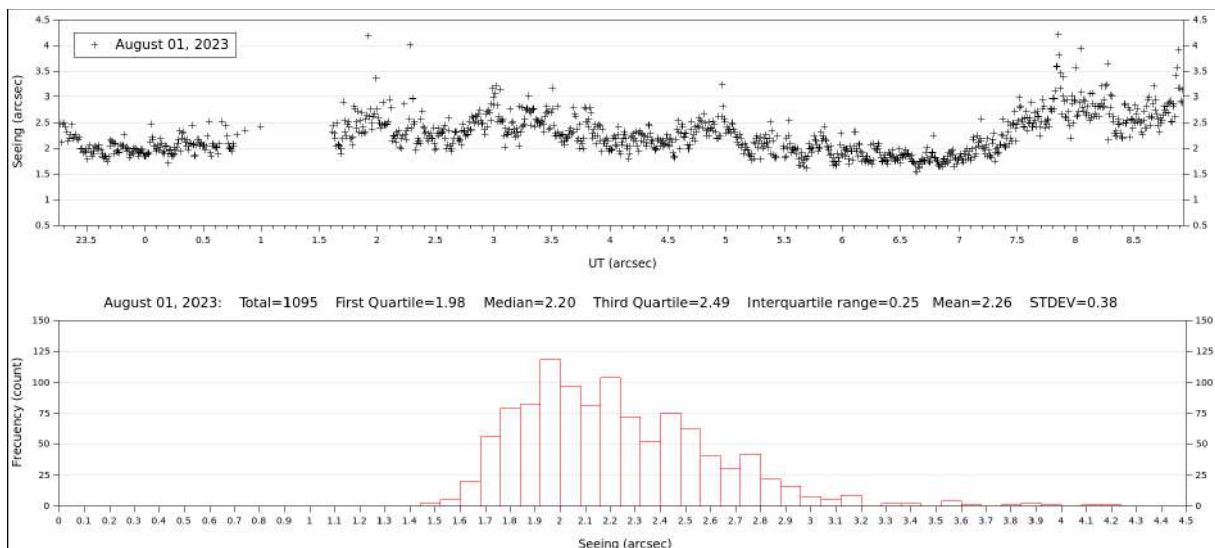


Fig. 13. Seeing medido a lo largo de 10 hs en la noche del 01 de agosto de 2023. La mediana de esta noche tiene un valor de  $2.20 \pm 0.25$  arcsec. Si bien la mediana no difiere mucho del ejemplo anterior, el error es la mitad.

Ya mencionamos y dimos algunas razones por las cuales en una noche determinada pueden producirse *gaps* de varios minutos. Esta noche muestra un ejemplo de ello, entre aproximadamente la 01:00 y la 01:30 UT.

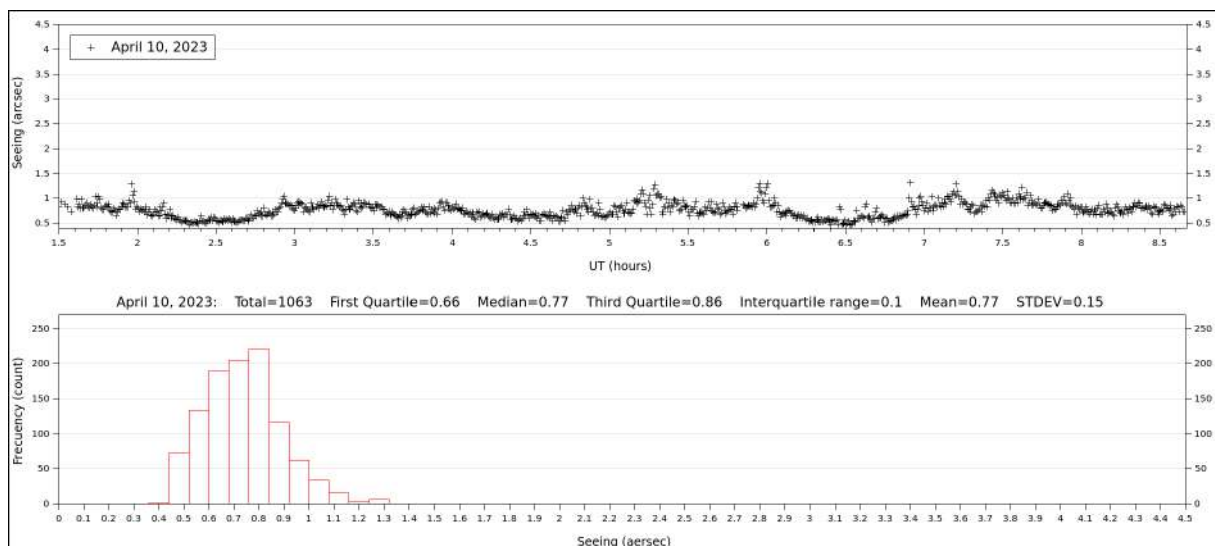


Fig. 14. Valores del seeing medido en la noche del 10 de abril de 2023 a lo largo de 7 hs. La mediana de esta noche tiene un valor de  $0.77 \pm 0.10$  arcsec, lo que constituye un excelente valor para el sitio.

## 2.b.ii. Distribución mensual del seeing

Dado que, como se dijo, no hay certeza acerca de que el seeing no esté variando anualmente, la metodología seguida para analizar la evolución del seeing según avanzan los meses, fue armar, para un mes determinado, una submuestra construida con el aporte de 5000 datos al azar no repetidos de cada uno de los 7 años que incluye nuestra muestra para ese mes. Así, por ejemplo, la submuestra "febrero" posee 10000 datos aportados por los febreros de 2019 y 2023 -no hay registros para ese mes en los otros años-, mientras que la muestra "noviembre", posee 25000 mediciones aportadas por cinco noviembrés. Luego se calculó la mediana para cada mes. Como medida de la dispersión estadística de cada mediana se toma el *rango intercuartílico* de dicha submuestra. Para analizar

la independencia de los resultados se someten las medianas al *Test de Hipótesis de Kruskal-Wallis*.

Los resultados se grafican en la Fig. 15. Se observa un aumento del seeing hasta mitad de año para luego decaer conforme va finalizando el año. La curva de ajuste es la interpolación polinómica de cuarto orden  $S(t) = 1.37 - 0.52 t + 0.23 t^2 - 0.03 t^3 + 0.001 t^4$  obtenida usando como método de ponderación los errores que obtuvimos para cada mediana -y cuyas barras se grafican también-, con un  $\chi^2=0.08$  y  $\rho^2=0.92$  (ajuste eficiente en un 92%), y con un error cuadrático medio de 0.29. Esta interpolación tiene como objetivo resaltar la evolución anual de las medianas mensuales.

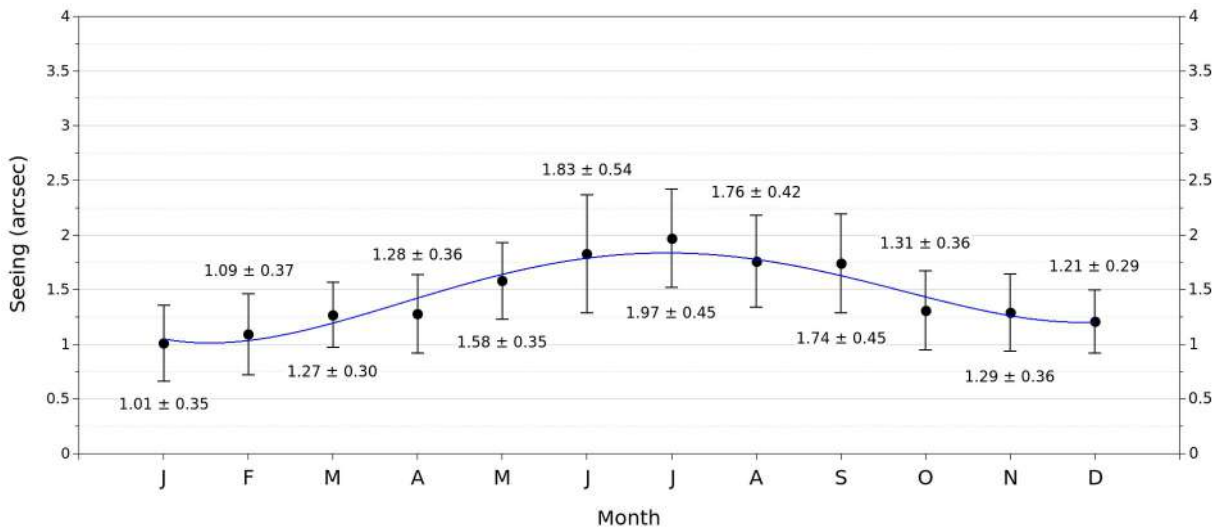


Fig. 15. Evolución del seeing mes a mes con datos de siete años distintos. Cada punto representa el valor de la mediana del seeing obtenida de una submuestra armada con 5000 datos extraídos al azar y sin repetición de cada año para dicho mes. Como dispersión estadística se emplea el rango intercuartílico. La función de ajuste es:  $S(t) = 1.37 - 0.52 t + 0.23 t^2 - 0.03 t^3 + 0.001 t^4$ .

En la Fig. 16 se reproducen (a) el gráfico del trabajo de Harris y Vrba (1992); y (b) el del trabajo de Ji-Cheng y colaboradores de 2015. Se aprecia en ambos que el seeing tiene una evolución cualitativa mensual análoga a lo que muestran nuestros resultados, pero con un comportamiento invertido debido a que son mediciones realizadas en el hemisferio norte.

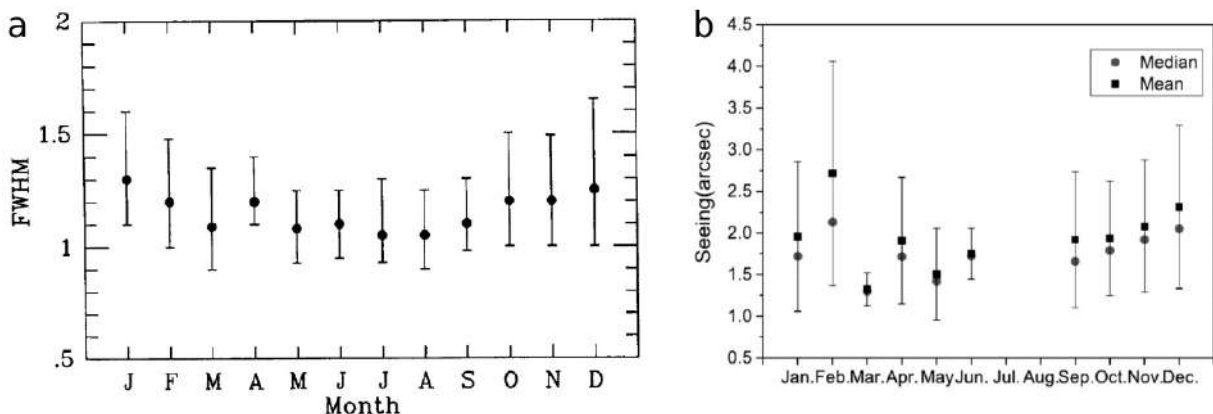


Fig. 16. (a). Variaciones por mes del seeing sobre 5 años de mediciones tomado del estudio realizado por Harris y Vrba en la Estación Flagstaff, Observatorio Naval de EE.UU. (Harris y Vrba, 1992). Cada punto representa la mediana del seeing (corregido al cenit) y las barras de error muestran el rango intercuartílico para cada mes. (b) Variaciones por mes del seeing medido durante 2014 en el Xinglong Observatory de China (Ji-Cheng et al., 2015). En este caso, grafican las medias y las medianas para cada mes. Las barras de error indican las STDEV.

La Fig. 17. muestra el gráfico de las medianas de cada submuestra de 5000 datos aportados por cada año para ese mes. Como referencia adicional, superponemos con círculos rojos el gráfico de medianas que mostramos en la Fig. 15.

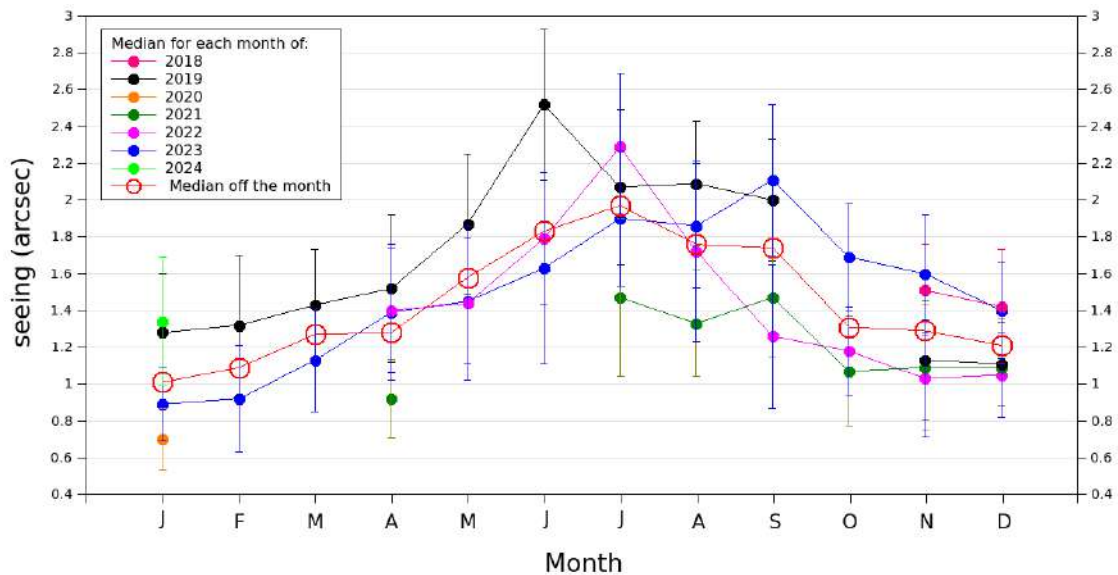


Fig. 17. Gráfico de cada mediana de cada mes de cada año. Se superponen las medianas graficadas en la Fig. 15 (círculos rojos).

Parece ir quedando claro que los mejores meses para observar, si sólo pensamos en términos de seeing, son los primeros del año (especialmente enero y febrero), seguidos por los dos últimos del año. Antes de afirmar que éstos son los mejores meses para observar en el sitio, debemos analizar la evolución anual de las noches despejadas. Si bien ese es un dato que queda pendiente en este trabajo y que será complementado con trabajos futuros, podemos hacernos una idea de ello teniendo en cuenta los datos sobre los regímenes de lluvia en el CASLEO. En la Fig. 18 se muestra el gráfico precisamente de esos regímenes durante el año, construido basándonos en los resultados de *Poblete y Escribá (2020)*. Se observa que justamente en los meses donde se registran los mejores valores de seeing, también se registran más precipitaciones.

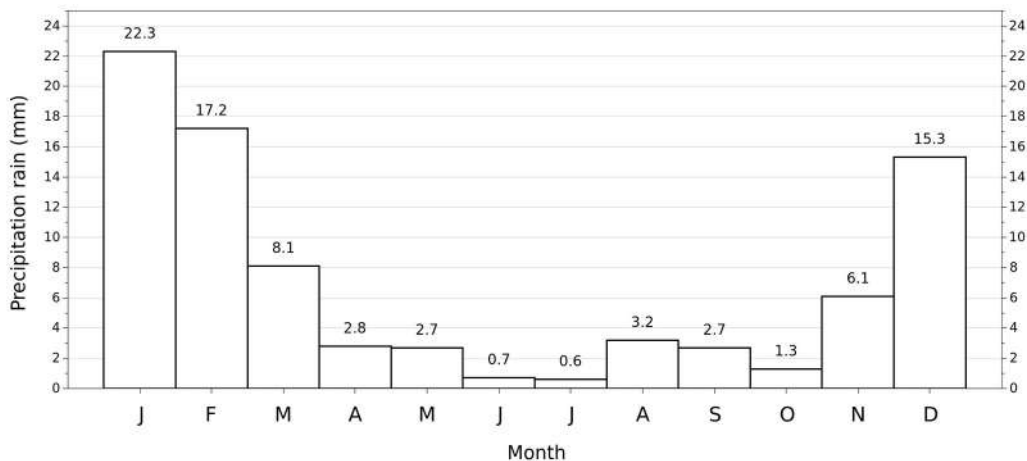


Fig. 18. Gráfico del régimen anual de precipitaciones en el CASLEO, registrados por nuestra estación meteorológica -construido basándonos en los resultados de *Poblete y Escribá (2020)*-.

Por otro lado, del análisis de *Hurtado y colaboradores* de 2020, se concluye que entre abril y octubre el porcentaje de días con precipitaciones es casi



inexistente. Las mayores precipitaciones tienen lugar entre diciembre y marzo, mientras que los mínimos tienen lugar en los meses más fríos del año.

En definitiva, nos animamos a especular que las pocas noches despejadas de enero y febrero -comparándolas con las noches despejadas del resto del año-, son las mejores para observar.

### 2.b.iii. Distribución estacional del seeing

Para poder analizar las cuatro estaciones hacemos estadística comparada con muestras de 130000 datos cada una, tomados al azar sin repetición, durante el año 2023.

En las Fig. 19-22 se grafican los histogramas de las cuatro estaciones con los mismos *bins* y las mismas escalas para una mejor comparación. Se dan los respectivos resultados estadísticos en cada uno.

Sin duda alguna podemos afirmar que los valores más bajos de seeing se registran en el verano, mientras que los más altos se miden en otoño e invierno, mejorando en primavera. Estos resultados eran los esperados en virtud del análisis que realizamos recién sobre la distribución mensual del seeing. Por otro lado, también son consistentes con los resultados de otros trabajos sobre el estudio del seeing estacional en otros observatorios, como el de *Michel et al. (2003)*, *Harris y Vrba (1992)*, *Ji-Cheng et al. (2015)*, etc., en los cuales también concluyen que el verano es la estación con mejor seeing.

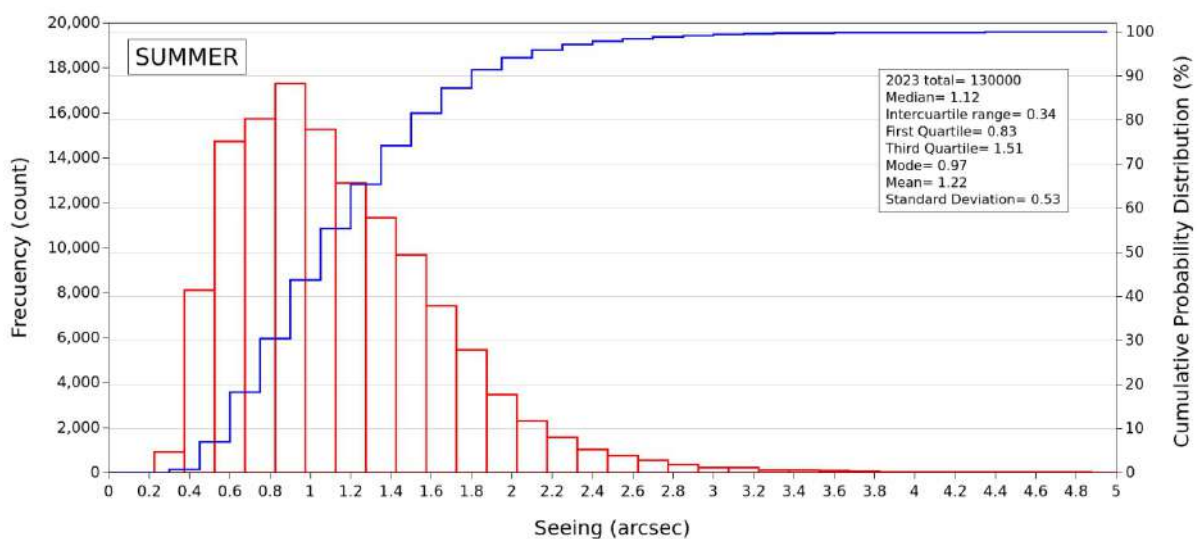


Fig. 19. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Cerro Burek para el verano de 2023. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos obtenidos.

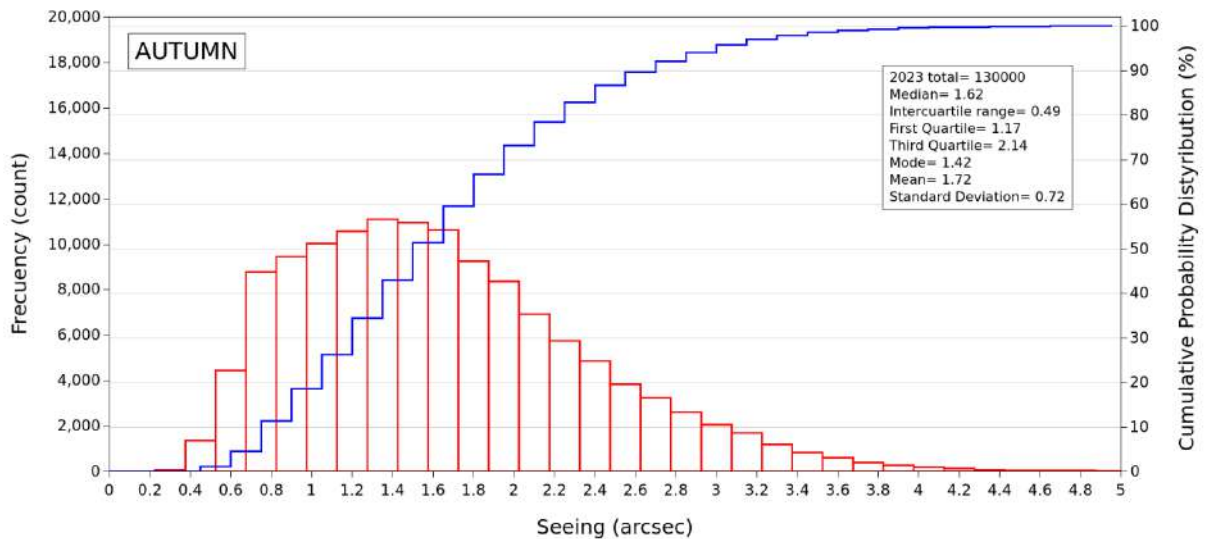


Fig. 20. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Cerro Burek en el otoño de 2023. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos obtenidos.

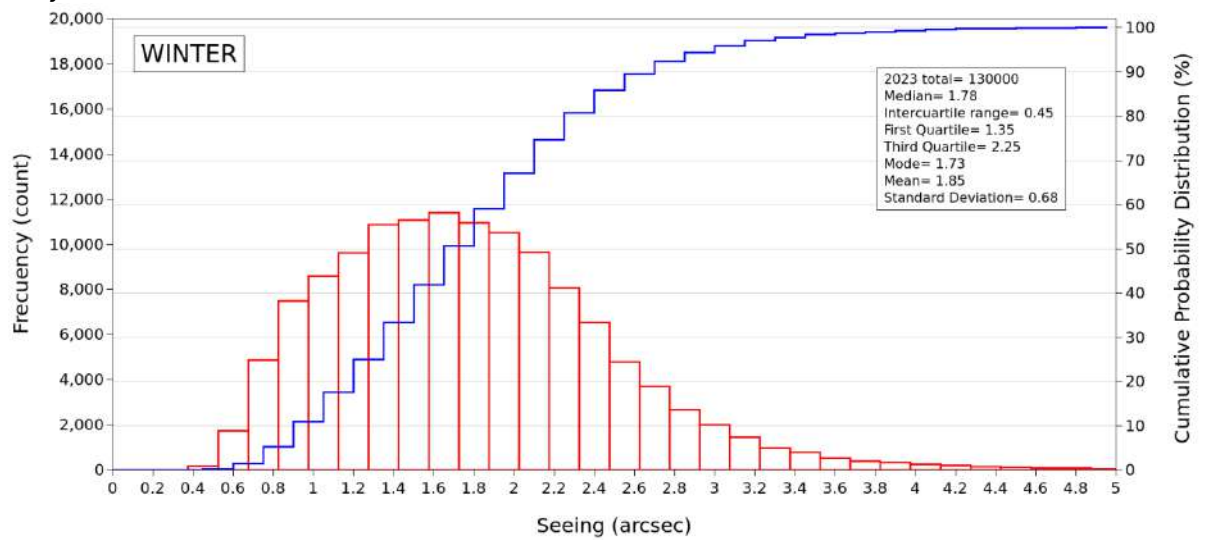


Fig. 21. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Cerro Burek en el invierno de 2023. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos.

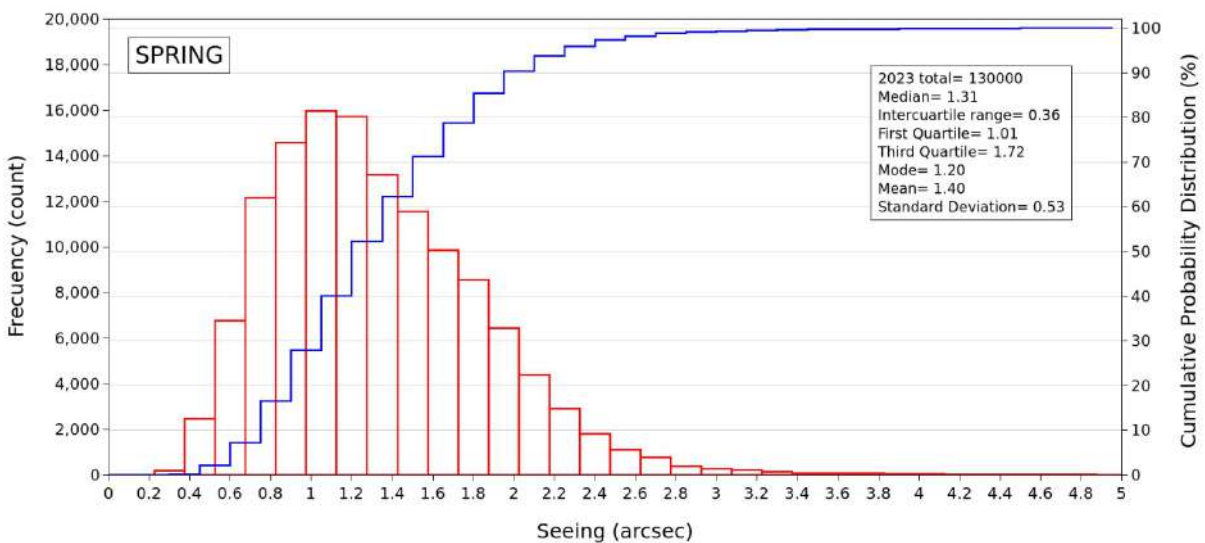


Fig. 22. Histograma de las mediciones de seeing en el sitio Cerro Burek en la primavera de 2023. Se incluye un resumen de los resultados estadísticos.



En la Fig. 23 se grafican las medianas del seeing por estaciones. Los veranos y primaveras se encuentran entre 1.0-1.5 arcsec, mientras que las de los otoños e inviernos están entre 1.5-2.0 arcsec.

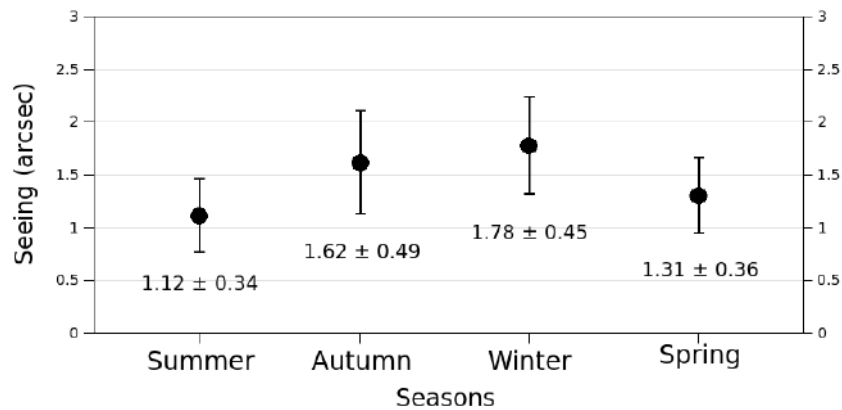


Fig. 23. Variación del seeing por estaciones con datos de 7 años (2018-2024). Cada punto muestra la mediana del seeing corregido al cenit. Las barras de error muestran el rango intercuartílico para cada mediana de cada estación.

## 2.b.iv. Distribución del seeing según pasan los años

Si bien la base de datos del sitio Cerro Burek incluye mediciones en el intervalo 2018-2024, descartamos de este análisis los años 2018 (solamente 45 noches; o sea, apenas el 12% de ese año), 2020 (23 noches; 6%) y 2024 (17 noches; 5%). Los restantes años tienen coberturas significativamente mayores, con 231 noches en 2019 (63%); 183 en 2021 (50%), 209 en 2022 (57%), y 280 en 2023 (77%) (ver Fig.6).

De los resultados ya discutidos sobre las medianas mes a mes para cada año, se puede afirmar que en todos el seeing tiende a ir empeorando desde los primeros meses hasta la mitad del año, para luego mejorar hasta el final del mismo. Esta afirmación queda respaldada con el análisis de las medianas estacionales.

El mal seeing registrado en el año 2019 no alcanza para afirmar que las mejoras registradas en años posteriores sea un hecho atmosférico real, o es simplemente un hecho relacionado con otras circunstancias, como diferencias en la toma de imágenes hasta que el método quedó definitivamente establecido.

A modo ilustrativo, en la Fig. 24 se muestra la evolución del seeing a lo largo de todo el año 2023, por ser el registro más denso, completo y con la mejor distribución matemáticamente *bien condicionada* de toda la base. Con el fin de apreciar el comportamiento del seeing a grandes rasgos en este año testigo, ajustamos un polinomio de segundo orden.

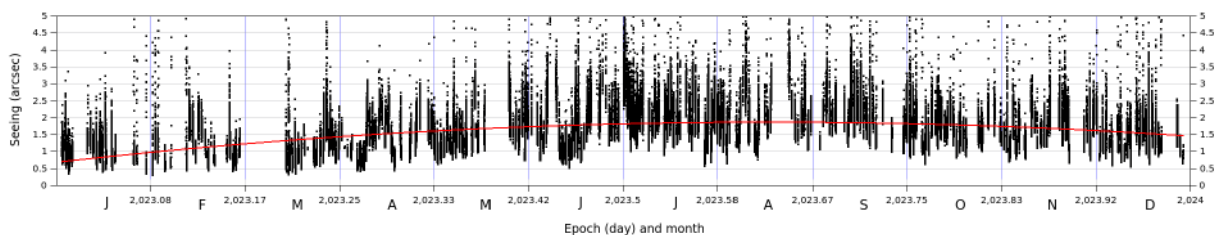


Fig. 24. Evolución del seeing a lo largo del "año testigo" 2023. La interpolación polinómica solamente se realiza con el fin de visualizar la tendencia evolutiva del seeing a lo largo del año.

La curva es la interpolación polinómica en el intervalo [2023.0;2024.0) en la variable *epoch*,  $S(epoch) = -1.23 \times 10^7 + 1.21 \times 10^4 epoch - 3 epoch^2$ , y obviamente sin ponderación de datos con un  $\chi^2=3.12$  y  $\rho^2=0.25$ , con un error cuadrático medio de 0.56. La interpolación solamente se realiza con el fin de visualizar la evolución del seeing a lo largo del año.

### 3. El seeing y los parámetros meteorológicos

Una caracterización integral del seeing de un sitio debe estar complementada con un estudio acerca de las eventuales correlaciones de éste con parámetros meteorológicos, adquiridos simultáneamente en todo el período estudiado. Para dicho fin, sumamos a la base de mediciones del seeing, la base de datos meteorológicos registrados por el soft *Weatherlink 6.0.5* de la estación meteorológica *Davis Ventage Pro2 (wired)*, emplazada en el sitio Cerro Burek y que viene recabando datos desde hace más de 18 años. Encontramos que la cadencia de adquisición de datos entre 2018 y 2024 puede ser de 300 seg, 600 seg o 1800 seg. Su sofisticado conjunto de sensores incluyen: anemómetro, colector de lluvias, temperatura, humedad, radiación solar y sensores de rayos UV, y para cada medición registran un total de 38 parámetros.

Puntualmente, el objetivo en este trabajo en relación a este tema es analizar las eventuales correlaciones del seeing con 6 parámetros meteorológicos elegidos entre esos 38 que mide periódicamente la estación. Éstos son: Temperatura Ambiente (T), Humedad Relativa del Ambiente (H), Punto de Rocío o Dew Point (Dp), Velocidad del Viento (Ws), Dirección del Viento (Wd) y Presión Atmosférica (P). El resto de los parámetros hacen referencia a magnitudes que no tendrían influencia en el valor del seeing, como la radiación solar, regímenes de lluvias, datos sobre la radiación UV, etc.

Este análisis no tiene otra pretensión que tratar de sacar cautas conclusiones estadísticas sobre cómo se comporta el seeing ante variaciones de los mencionados parámetros. Solamente se busca correlacionar matemáticamente variables, sin ahondar en la naturaleza de esas relaciones, las que son del dominio de disciplinas como la Meteorología y/o la Climatología y que escapan a nuestros conocimientos. Si se desea ahondar en el comportamiento de esos parámetros en la zona de El Leoncito y alrededores, recomendamos los artículos ya mencionados de *Poblete y Escribá (2020)* y de *Hurtado y colaboradores (2022)*.

Antes de comenzar con este análisis y arribar a conclusiones apresuradas, es importante tener muy claro que la presencia de una correlación entre dos variables no es suficiente para inferir una relación de causalidad (es decir, *correlación no implica causalidad*). Por ello, si bien coloquialmente el término *correlación* suele ser considerado sinónimo de *dependencia*, hablando con propiedad, *correlación* sólo hace referencia a tipos específicos de operaciones matemáticas entre variables probadas y sus respectivos valores esperados. En definitiva, una correlación es una medida de cómo dos o más variables están relacionadas entre sí, pero no dice ni cómo, ni porque, ni si son dependientes o no una de la otra.

La medida más ampliamente utilizada y conocida de la relación entre dos variables es el *coeficiente de correlación producto-momento de Pearson* (o *coeficiente de correlación de Pearson*), comúnmente llamado *coeficiente de correlación*. Adopta valores en el intervalo [-1;+1], y nos habla sobre qué tan fuertemente están relacionadas dos variables entre sí. Los valores extremos

indican una *correlación perfecta* negativa o positiva, y el 0, una inexistencia de correlación.

En la Tabla 3 presentamos los *coeficientes de correlación de Pearson* que obtuvimos entre el seeing y las distintas variables meteorológicas, que analizaremos caso por caso.

	T	H	Dp	Ws	Wd	P
Seeing	-0.26	-0.37	-0.46	0.26	-0.01	-0.01

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre el seeing y los parámetros meteorológicos: Temperatura (T), Humedad (H), Dew Point (Dp), Velocidad del Viento (Ws), Dirección del Viento (Wd) y Presión Atmosférica (P).

### 3.a. La compatibilidad entre la base de datos de seeing y la base de datos meteorológicos

Si se desean relacionar las mediciones de la base de datos del seeing con la de la mencionada base meteorológica, en primer lugar es necesario realizar ciertas depuraciones de datos para luego plantear una estrategia para sincronizar ambas bases.

La primera consideración es lograr que los datos de ambas bases estén referidos a un mismo calendario. El más natural y práctico para estudios en el tiempo es el Calendario Juliano, y si bien la base de datos del DIMM está precisamente en este sistema, los datos de la base meteorológica están en el Calendario Gregoriano.

Una vez convertidas esas fechas gregorianas a fechas Julianas, la primera depuración tiene que ver con los períodos en los que ambas bases tienen sus propios *gaps*, como por ej. el de *no-registro* por la pandemia de COVID19 en la base del seeing, y el *gap* de diciembre de 2021 a marzo de 2022 que se observa en la base meteorológica. La Fig. 25 esquematiza la línea de tiempo en la que pueden visualizarse los períodos entre 2018-2024 en los cuales se midieron en el Cerro Burek, el seeing por un lado (S), y los parámetros meteorológicos por el otro (M), para luego deducir los períodos donde existen datos de ambas bases y, por lo tanto, donde finalmente se hace el estudio de correlaciones (S∩M).

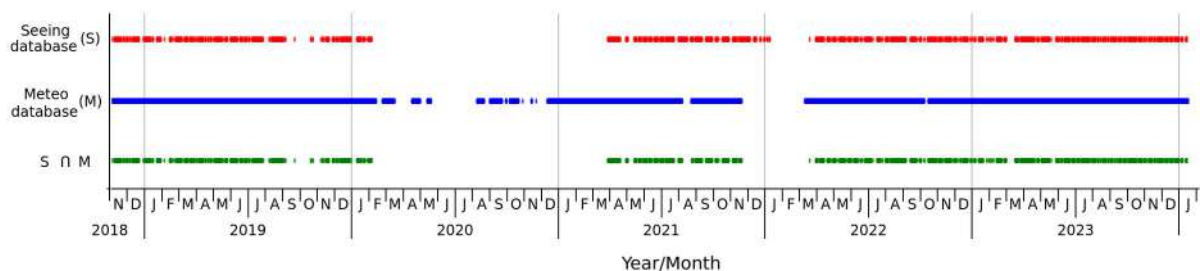


Fig. 25. Línea de tiempo en la se visualizan los períodos en los cuales se midieron el seeing (S) y los parámetros meteorológicos (M), y los períodos donde se tienen datos de ambas bases (S∩M).

Depurando ambas, nos quedamos solamente con los períodos que tienen en común. Naturalmente en esta primera depuración quedan afuera las mediciones diurnas de la base meteorológica, consideradas como aquellas que van desde las 11:45 a las 22:30 UT de cada día. También son eliminadas aquellas mediciones donde alguna de las variables meteorológicas no fueron registradas por algún problema. El 0.5% de los datos con presiones atmosféricas que luego

de un salto se separan del resto de la muestra con valores desusados para la altura del sitio, son considerados *outliers*, y también son eliminadas.

Una vez hechas estas depuraciones, pasamos de una base de datos de seeing cruda de 861595 mediciones -con la que realizamos los análisis anteriores-, a una con 834641 mediciones; y de una base de datos meteorológicos crudos de 183882 a una de 124372.

La siguiente incompatibilidad a sortear entre las bases se refiere al hecho de que los tiempos exactos en los que se registra el seeing, no coinciden con los tiempos en los que se registran los parámetros meteorológicos, dado que son datos medidos por instrumentos independientes. A ello hay que sumarle que mientras el DIMM almacena una medida cada 16 seg, la estación meteorológica, como se dijo, lo hace cada 300 seg, 600 seg o cada 1800 seg según distintos períodos de la muestra.

La estrategia adoptada para fabricar una base de datos que contenga para cada medida de seeing un juego de los 6 parámetros meteorológicos T, H, Dp, Ws, Wd, P, fue el siguiente: Sean Djs los días julianos de la base de datos de seeing, y Djm los de la base meteorológica. Entonces, al dato del seeing correspondiente a la fecha Djs(i) le asignamos el vector [(T(k),H(k),Dp(k),Ws(k),Wd(k),P(k))] correspondiente a la fecha juliana Djm(k) de la base meteorológica, si Djs(i) pertenece al intervalo semi abierto  $[(Djm(j) + Djm(j+1))/2 ; (Djm(j+1) + Djm(j+2))/2)$ . Esta estrategia confía en que una estación meteorológica profesional mide datos en intervalos donde asume que los parámetros permanecen razonablemente estables.

En el caso de los rangos de valores que pueden adoptar tanto la Humedad como la Dirección y Velocidad del viento, éstos son discretos. Ello explica los gráficos con barras verticales de las Fig. 27, 29 y 30. Por ej., en el último caso mencionado, la Velocidad del Viento tabulada en nuestra base meteorológica va desde 0 km/hs hasta 183.5 km/hs con pasos de 1.6 km/hs (y unos pocos de 1.7 km/h), constituyendo así un total de 111 valores posibles.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que recordemos que el DIMM no mide valor alguno tanto si la Velocidad del Viento o la Humedad relativa del ambiente superan, respectivamente, los 60 km/hs y el 90%. Ello implica que esos dos parámetros en la base SMM no superan nunca esos límites, y ,por lo tanto, están sesgados.

Luego de analizar todos los años de la muestra, elegimos exponer los resultados de las correlaciones entre el seeing y los parámetros meteorológicos del año 2023, al que llamamos *año testigo*, porque como se dijo, posee el registro más denso, completo y con la mejor distribución matemáticamente *bien condicionada* de toda la base.

A continuación se analizan las eventuales correlaciones entre el seeing y las variables meteorológicas consideradas.

### **3.b. Correlaciones entre el seeing y parámetros meteorológicos**

#### **3.b.i. Correlación Seeing-Temperatura ambiente**

El índice de refracción del aire depende de la temperatura (*Ji-Cheng et al., 2015*), por lo cual, necesariamente debe haber una correlación del seeing con

dicho parámetro. El coeficiente de correlación que encontramos entre ambas variables es de un  $-0.26$ . Una correlación negativa se traduce en el hecho de que cuando una variable aumenta, la otra disminuye.

Si bien se registran unos pocos valores con un buen seeing a bajas temperaturas, de la correlación de datos, estimamos que el valor del seeing mejora sostenidamente desde los  $+5.17$  °C, hasta el fin del registro. Si se tiene en cuenta que el primer cuartil está en  $+7.7$  °C, hablamos de que prácticamente para el último 75% de la muestra el seeing mejora fuertemente a medida que la temperatura aumenta.

En la Fig. 26 se grafica 'seeing vs. T', y se expone la estadística del parámetro Temperatura. Pese a que la correlación no es muy fuerte, puede apreciarse la tendencia mencionada.

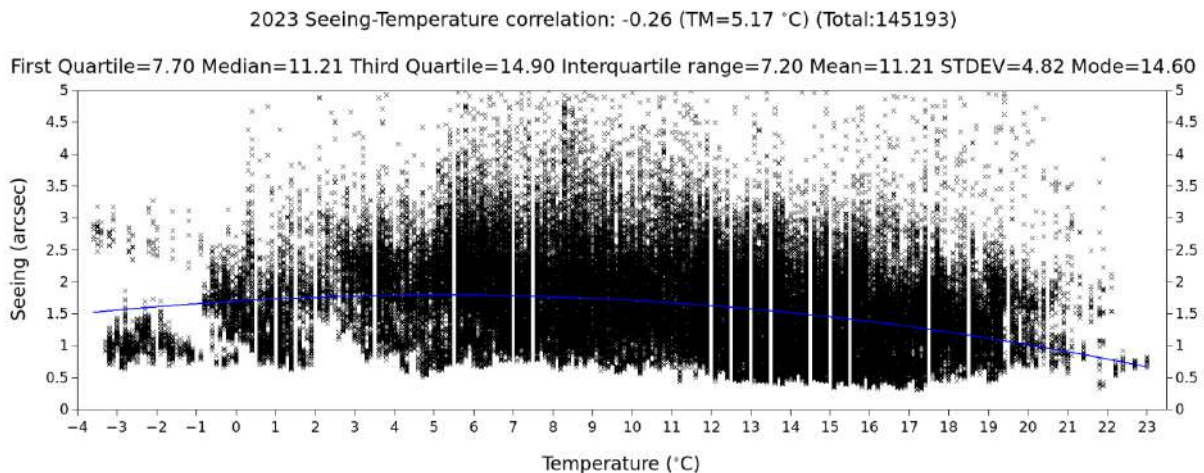


Fig. 26. Gráfico del seeing en función de la temperatura ambiente. El índice de correlación entre ambas variables es de  $-0.26$ .

### 3.b.ii. Correlación Seeing-Humedad Relativa del Ambiente

Las estadísticas y porcentajes de los que hablamos en este apartado solamente pueden referirse a la Humedad Relativa del Ambiente que fue registrada entre 0-90%, porque como aclaramos, ese es el sesgo que poseen estos datos.

En este caso, la correlación es claramente más fuerte, con un coeficiente estimado en  $-0.37$ . Teniendo en cuenta que el 75% de los datos de la Humedad tiene valores menores que 34% (tercer cuartil) y que la tendencia en ese tramo - hasta estabilizarse en el 25% final-, es claramente decreciente, podemos afirmar que el seeing mejora a medida que la Humedad aumenta (Fig. 27).

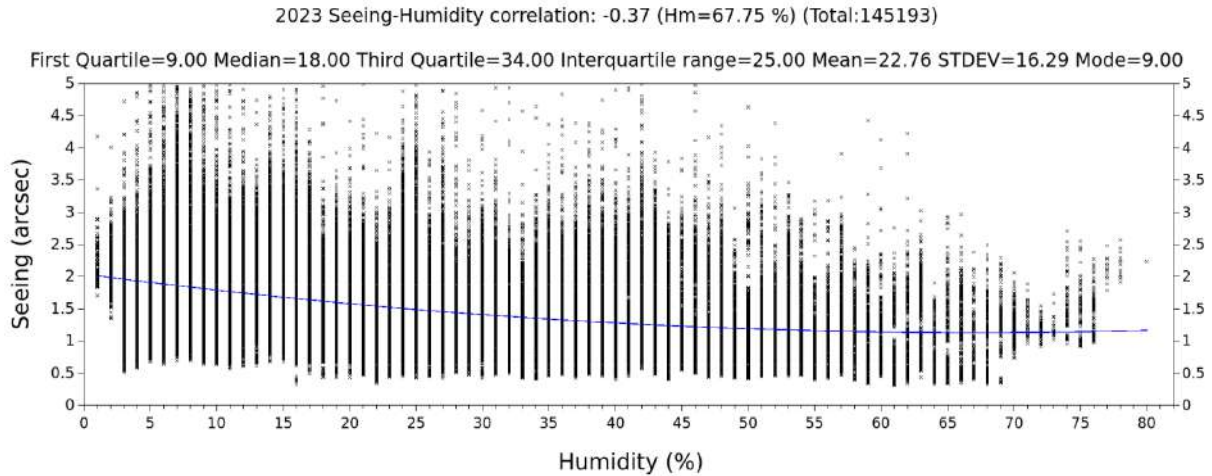


Fig. 27. Gráfico del seeing en función de la Humedad Relativa del Ambiente que no supere el 90%. El coeficiente de correlación entre ambas variables es de  $-0.37$ .

### 3.b.iii. Correlación Seeing-Dew Point

Estamos aquí ante la correlación más fuerte entre el seeing y los parámetros meteorológicos considerados en este estudio. El coeficiente fue estimado en  $-0.46$  y, siendo negativo, expresa una relación inversamente proporcional de crecimiento entre ambas variables. Es de notar que el *Dew Point* tiene a su vez, fuertes correlaciones tanto con la Humedad ( $+0.89$ ) como con la Temperatura ( $+0.35$ ).

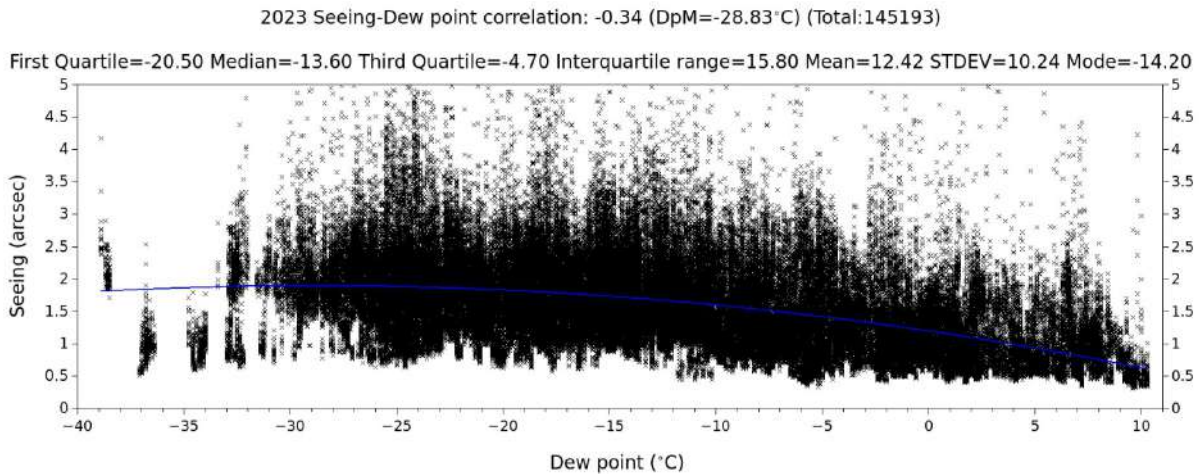


Fig. 28. Gráfico del seeing en función de la Temperatura de Rocío. El índice de correlación entre ambas variables es de fuerte  $-0.46$ .

En la fig. 28 se observa que el seeing mejora con el *Dew Point*, y la mejora es sostenida a partir de los  $-28.8^{\circ}\text{C}$ .

### 3.b.iv. Correlación Seeing-Velocidad del Viento

Nuevamente, debemos hacer la aclaración de que las estadísticas y porcentajes de los que hablamos en este apartado solamente podrán referirse a las velocidades del viento que durante 2023 no superaron los 60 km/hs. Es por



ello que dichos guarismos no deben compararse con resultados de estadísticas que no limitan la velocidad del viento. Así, cuando hablamos, por ejemplo, de la mediana, para nosotros ésta es la mediana de las velocidades que en 2023 fueron desde los 0-60 km/hs. Y ese es el motivo por el cual hay discrepancia entre nuestra mediana de 12.9 km/hs y la mediana anual de velocidades del viento estimada por *Hurtado y colaboradores (2022)* de 22.5 km/hs. Aclaremos también que ellos hacen estadística sobre 16 años, y nosotros sólo sobre 2023.

El coeficiente de correlación en este caso es de +0.26 y es el único coeficiente estudiado que da un valor positivo, señalando que un aumento en la velocidad del viento lleva a un deterioro del seeing. Si el viento supera los 4 km/hs la desmejora del seeing se vuelve sostenida.

Si bien el DIMM no mide valores si la velocidad del viento supera los 60 km/hs, en momentos donde el viento se sostiene en esos números, el seeing es malo, aunque el DIMM no tome registro de ello. *Hurtado y colaboradores (2020)* nos dicen que entre mayo y octubre se miden varios valores extremos superiores a 60 km/hs, lo que es consistente con los meses donde se registran los peores valores de seeing.

En la Fig. 29 se grafica el seeing vs. la Velocidad del Viento menor que 60 km/hs. Dado que, como mencionamos, la estación meteorológica discretiza la asignación de valores de la velocidad del viento, las primeras mediciones que se grafican y tienen como abscisa a 0 km/hs, se refieren a mediciones que van de 0 a 1.6 km/hs. De ese intervalo, en el gráfico y en el estudio estadístico, hemos excluido adrede el caso 0 km/hs porque nos pareció interesante hablar de cómo se comporta el seeing en ausencia total de viento.

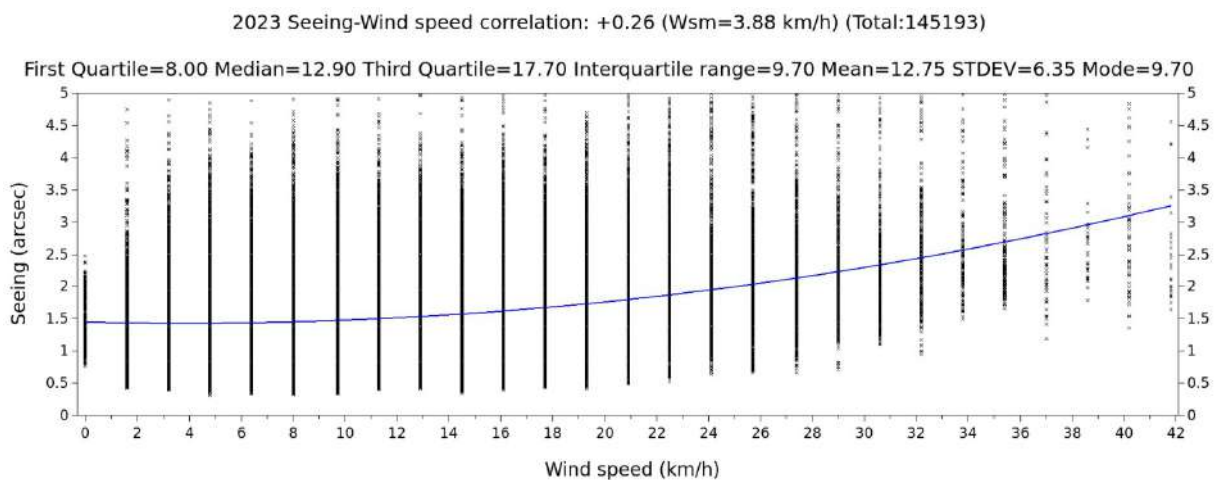


Fig. 29. Gráfico del seeing vs. la Velocidad del Viento. La estación meteorológica registra discretizadamente la velocidad del viento. Los datos consignados en la barra correspondiente a 0 km/hs son de valores estrictamente mayores que cero y que llegan hasta 1.6 km/hs. El índice de correlación entre ambas variables resultó ser de +0.26.

Se registran 547 mediciones con  $Wd=0$  km/hs. Las variables estadísticas de esta submuestra arrojan los siguientes resultados: Primer cuartil=1.16 arcsec, Mediana=1.35 arcsec, Tercer cuartil=1.82 arcsec, Rango intercuartil=0.66 arcsec, Media=1.46 arcsec, STDEV=0.38 arcsec, Moda=1.15 arcsec.

Esta mediana de  $1.35 \pm 0.66$  arcsec para el caso en el que no sopla viento en el Cerro Burek, es consistente con el hecho de que, como habíamos visto, el seeing adopta los valores más bajos cuando la velocidad del viento es más baja.



Un último aspecto que queremos mencionar es que si bien, por un lado, la estación meteorológica mide velocidad del viento en superficie, y por el otro, el seeing se ve afectado principalmente por el movimiento de capas atmosféricas de altura, en la mayoría de los casos, un movimiento de masas de aire en superficie está relacionado con movimientos de masas de aire en altura. Aunque las direcciones y velocidades de movimiento de ambas capas no necesariamente serán las mismas -de hecho, en general, la velocidad del viento aumenta exponencialmente con la altura-, una quietud del viento en superficie implicará menor actividad en altura, y, por lo tanto, es esperable un mejor seeing.

### 3.b.v. Correlación Seeing-Dirección del Viento

La correlación entre estas dos variables es muy débil, con un coeficiente de  $-0.01$ . Prácticamente, podríamos afirmar que no hay una correlación entre el seeing y la dirección del viento. En otras palabras, si bien vimos recién que el seeing empeora con la velocidad del viento, da lo mismo de dónde sople.

Si bien la dirección de los vientos en la zona tiene una preferencia -no muy marcada- en el intervalo NNW-NNE (*Poblete y Escribá, 2020*), no necesariamente los vientos con altas velocidades tienen esa misma preferencia. Por ello, no nos llama particularmente la atención que habiendo una clara correlación entre la velocidad del viento y el seeing, haya una casi nula correlación entre éste y la dirección del viento.

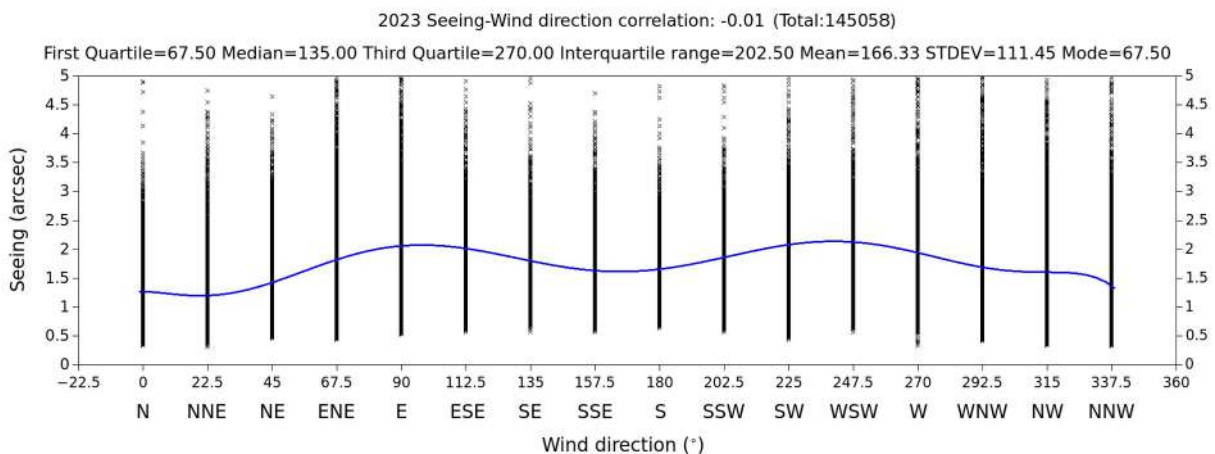


Fig. 30. Gráfico del seeing en función de la Dirección del Viento. El índice de correlación entre ambas variables es de  $+0.01$ .

### 3.b.vi. Correlación Seeing-Presión Atmosférica

Encontramos que la correlación entre el seeing y la presión atmosférica también es muy débil, con un coeficiente igual a  $-0.01$ , y nuevamente estamos ante un caso de prácticamente *no-correlación*. Si bien del gráfico de la Fig. 31 podemos inferir que si la presión adopta valores mayores que  $P \sim 753$  HPa el seeing muestra una notable y sostenida mejoría, lo cierto es que del estudio de los percentiles sobre los datos de la presión atmosférica, solamente el 5% posee valores mayores que  $P = 752.8$  HPa.

2023 Seeing-Pressure correlation: -0.01 (PM=744.75 HPa) (Total:145193)

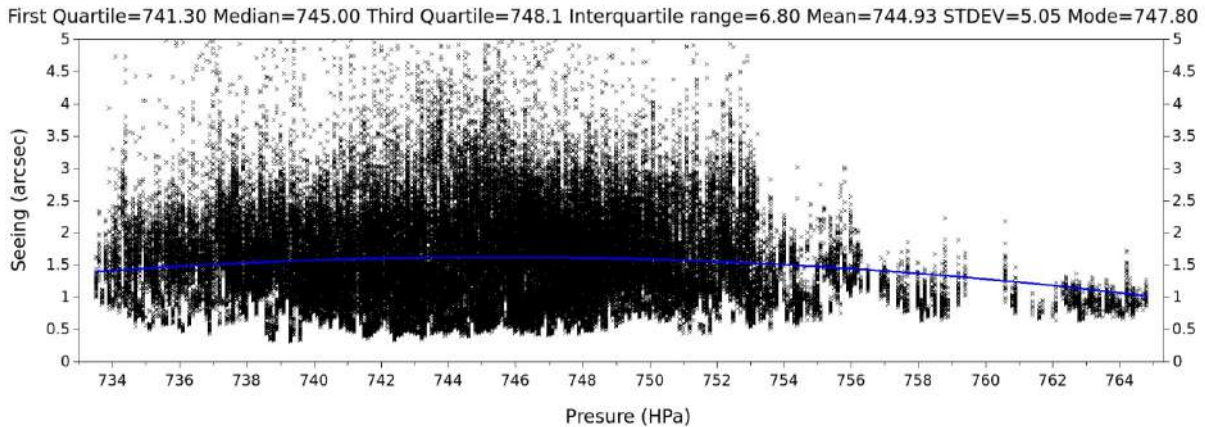


Fig. 31. Gráfico del seeing en función de la presión atmosférica. El coeficiente de correlación entre ambas variables es de un pobre -0.01.

Como corolario de este análisis de correlaciones, sugerimos sacar provecho de toda esta información deteniéndose en los gráficos en tiempo real que muestran los software tanto de estaciones meteorológicas como de detectores de nubes del sitio, donde podemos ver las evoluciones de los parámetros recién analizados. Así, por ejemplo, si notamos que el Dew Point y la Humedad están creciendo en una noche cálida y de poco viento, podremos inferir que es altamente probable que el seeing vaya a mejorar próximamente. Naturalmente, pueden conjeturarse otras posibilidades con otras combinaciones, y darnos una idea de la noche de observación a la que nos enfrentaremos.

## 4. Discusión y Conclusiones

**a)** De una campaña de mediciones de seeing con la técnica DIMM en el Cerro Burek (CASLEO) que se viene desarrollando desde noviembre de 2018, se analizaron datos hasta enero de 2024. Se obtuvieron en ese período 861595 mediciones a lo largo de 988 noches.

**b)** La mediana general obtenida de las mediciones tomadas a 6.2 m de altura y con un tiempo de exposición de 4 ms es de  $1.54 \pm 0.45$  arcsec, con un primer cuartil en 1.31 arcsec y un tercer cuartil en 2.03 arcsec. La media fue de  $1.64 \pm 0.68$  arcsec. El 18.6% de las mediciones están por debajo de 1 arcsec. Los datos obtenidos permiten afirmar que la calidad del cielo del sitio Cerro Burek es superior en un 18% a la del sitio Jorge Sahade, donde la mediana de valores obtenidos entre 2016-2018 fue de  $1.87 \pm 0.89$  arcsec.

**c)** Se observa una paulatina degradación del seeing conforme avanza la noche. Determinamos que este es un fenómeno independiente de los efectos que suman el *mirror seeing* y el *dome seeing* en las mediciones de éste sobre las imágenes de ciencia. El *Test de Hipótesis de Mann-Whitnet* nos permite afirmar con un nivel de confianza del 95% que la primera parte de la noche tiene una mediana más baja que la segunda, cuyos valores respectivos son,  $1.48 \pm 0.80$  arcsec y  $1.60 \pm 1.01$  arcsec.

**d)** Del análisis de las medianas mensuales surge que los meses con mejor seeing son enero y febrero ( $\sim 1$  arcsec), empeorando paulatinamente hasta los peores meses de junio y julio ( $\sim 2$  arcsec), para a partir de ellos, volver a mejorar un poco en los dos últimos meses del año ( $\sim 1.25$  arcsec). Por su parte, el régimen de lluvias presenta un desarrollo exactamente inverso, con los meses

más lluviosos entre noviembre y febrero, y prácticamente sin lluvias el resto del año.

**e)** En cuanto al comportamiento estacional del seeing, concluimos que la mejor estación es el verano con una mediana de  $1.12 \pm 0.34$  arcsec, seguida por la primavera con  $1.31 \pm 0.36$  arcsec. Las dos estaciones con peor seeing son en primer lugar el invierno ( $1.78 \pm 0.45$  arcsec) y en segundo lugar el otoño ( $1.62 \pm 0.49$  arcsec).

**f)** Se analizó la correlación del seeing con la Temperatura, la Humedad, la Presión, la Temperatura de Rocío, la Velocidad del Viento en superficie y su Dirección. La correlación más fuerte que encontramos es con la Temperatura de Rocío (coeficiente de correlación  $+0.46$ ), de modo tal que cuanto mayor es el Dew Point, mejor es el seeing. La correlación entre seeing y Humedad es de  $-0.37$ , y por ello, el seeing mejora cuando la Humedad aumenta. También vemos una sensible mejora del seeing a medida que aumenta la Temperatura ( $-0.26$ ). El seeing empeora con la Velocidad del Viento, incluso desde algunos pocos km/hs. Prácticamente, no encontramos una correlación con la Dirección del Viento, ni con la Presión, aunque para Presiones atmosféricas elevadamente desusadas para el sitio, el seeing responde mejorando. Resumiendo, el seeing mejora a medida que disminuye la velocidad del viento (independiente de su dirección), o si aumenta la temperatura, la humedad y/o el Dew Point.

## 5. Bibliografía

1. Carrasco, E., Carramiñana, A., Avilés, J., y Yam, O. 2003. *PASP*, 115, 879.
2. de Serego Alighieri, S. 1986. *ESO's Very Large Telescope*, ed. D'Odorico and J. P. Swings, Venice (Garching), p. 173.
3. Dennefeld, M. y Fort, B. 1986. *ESO's Very Large Telescope*, ed. D'Odorico and J. P. Swings, Venice (Garching), p. 151.
4. Dierickx P. 1988. *IMAQ 0.7, Diffraction Analysis Software Package; E.S.O.*
5. Fried D. 1965. *Statistics of a Geometric Representation of Wave front Distortion. Journal of the Optical Society of America*, pp. 1427.
6. Fried D. 1966. *Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. Journal of the Optical Society of America*, 56(10): 1372-1379.
7. Fuensalida J., García-Lorenzo B., Hoegemann C. 2008. *Correction of the dome seeing contribution from generalized-SCIDAR data using evenness properties with Fourier analysis. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 389, Issue 2, pp. 731-740.*
8. Harris H. y Vrba F. 1992. *Seeing Measurements and Observing Statistics at the U.S. Naval Observatory, Flagstaff Station, Hugh C. Harris and Frederick J. Vrba. Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104: 140-145.
9. Hurtado S, Blazquez J, F. Faifer F, Pereyra P, Cellone S, Aballay J L, Antico P, Gimenez, Mammana L, Ostrov P, Reynaldi V, Zaninelli P. 2022. *Astro-meteorological characterization of CASLEO sites: technical description and evaluation of the data series. BAAA, Vol. 63.*
10. Ji-Cheng, Liang G, Xiao-Meng L, Zi-Huang C, Xu C, Yong-na M y Xiao-Jun J. 2015. *Astronomical Observing Conditions at Xinglong Observatory from 2007 to 2014. The Astronomical Society of the Pacific*, 127:1292-1306.
11. Marti, H. 1987. *Image motion as a measure of seeing quality. Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, 1360-1370.
12. Martinez P, Kolb J., Tokovinin A. y Sarazin M. 2010. *Atmospheric image blur with finite outer scale or partial adaptive correction. A&A* 516, A90.
13. Martinez P, Kolb J, Sarazin M, Tokovinin A. 2010. *On the Difference between Seeing and Image Quality: When the Turbulence Outer Scale Enters the Game. The Messenger* 141.
14. Michel R. et al. 2003. *Mediciones del seeing en el observatorio San Pedro Mártir mediante el Método DIMM, (Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica).*

- 15.** Pereyra P. y Pinto J. 2019. *Medidor de Seeing de CASLEO*. WIAA-2019.
- 16.** Pereyra P., Aballay J.L., Fernández G., Giménez M., Pinto J, Giuliani B., Collado O, Alvarez E. y Mammana L. 2023. *Medidor de seeing del Cerro Burek (CASLEO)*. BAAA-65 (enviado).
- 17.** Poblete A y Escribá K. 2020. *Caracterización estadística y dinámica del clima de Pampa El Leoncito y su entorno (Calingasta-San Juan)*. *Revista Geográfica Digital*, Vol. 17, Nº 33, 29-43 pp.
- 18.** Roddier E. 1981. *The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy*, *Progress in Optics*, pp. 281 - 373.
- 19.** Roddier, E. y Lena, P. 1984. *J. Optics (Paris)*, 15, 171.
- 16.** Sarazin, M., Roddier, F. 1990. *The ESO differential imaging motion monitor*, *Astronomy and Astrophysics*, pp. 294-300.
- 20.** Tatarskii V. 1961. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. New York: Dover.
- 21.** Tillayev Y, Azimov A, Ehgamberdiev S y Ilyasov S. *Astronomical Seeing and Meteorological Parameters at Maidanak Observatory*. *Atmosphere*, 14, pp. 199. Editor, Lukin V.
- 22.** Tokovinin A. 2002. *From Differential Image Motion to Seeing*. *Astronomical Society of the Pacific*, 114:1156-1166.
- 23.** Tokovinin A. y Kornilov V. 2007. *Accurate seeing measurements with MASS and DIMM*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 381, Issue 3, 1179-1189.
- 24.** Vernín, J. y Muñoz-Tuñón, C. 1995. *Measuring Astronomical Seeing: The DA/IAC DIMM*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107: 265-272.
- 25.** Wilson, R., O'Mahony, N., Packham, C., y Azzaro, M. 1999. *MNRAS*, 309, 379.