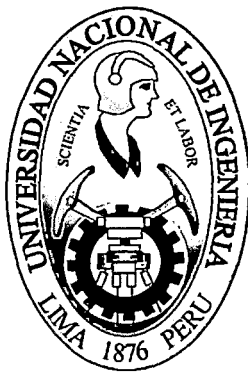


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO

TÍTULADA:

**Implementación del “OA-UNI DIMM Seeing Monitor” y
Observaciones de Ocultaciones Estelares por Cuerpos del Sistema Solar
desde los Andes Peruanos**

PRESENTADA POR:

ERICK GREGORIO MEZA QUISPE

ASESOR:

GERMAN YURI COMINA BELLID

Lima - Perú

2014

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

Agradecimientos

- A LESIA-OBSPM, IGI-UNI, RPB, IGP; por el apoyo financiero.
- A mi familia.

Resumen

La presente tesis muestra la implementación de un instrumento de medición de la calidad de cielo (*seeing*) basado en la técnica de Monitoreo de Movimiento Diferencial de Imagen (DIMM). Este instrumento permite la medición precisa y sistemática del *seeing*, así como su evolución temporal. El dominio de la técnica y su aplicabilidad permitirá usar el instrumento en varios lugares donde campañas de medición de *seeing* sean programadas (Huancayo, Cusco, Moquegua). La selección de una facilidad astronómica óptica profesional (llámese observatorio astronómico), será favorecida por medidas de DIMM futuras.

Así mismo, se presenta una metodología para realizar observaciones de ocultaciones estelares por cuerpos del Sistema Solar en el marco de campañas mundiales organizadas por el Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA) - l'Observatoire de Paris (OBSPM) y sus colaboradores. Se presentan los resultados positivos obtenidos de las observaciones de las ocultaciones por el Asteroide (177) Irma y Plutón, realizados en los Observatorios de Meudon – Francia y el Observatorio de Huancayo – Perú respectivamente. La ocultación por Plutón es un resultado que por primera vez se ha realizado en Perú y fue registrado simultáneamente en Chile y Argentina.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
2. Implementación y Observaciones con el OA-UNI DIMM	4
2.1. Introducción	4
2.2. Concepto de Seeing	6
2.3. Resolución de un telescopio con turbulencia atmosférica	8
2.4. Efectos de la Turbulencia en Astronomía	13
2.5. Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen - DIMM	13
2.6. Teoría del DIMM	16
2.7. Cálculo del Seeing	18
2.8. Misiones Observacionales	18
2.9. Observaciones en el Observatorio de Huancayo	19
2.9.1. Resultados de las medidas de Seeing en el Observatorio de Huancayo	20
2.10. Observaciones en Patacancha - Cusco	31
2.10.1. Resultados de las medidas de SEEING en Patacancha - Cusco	31
2.11. Conclusiones	34
3. Observaciones de Ocultaciones Estelares por Cuerpos del Sistema Solar	36
3.1. Introducción	36

3.2. Ocultaciones Estelares	37
3.3. Predicciones de Ocultaciones	39
3.3.1. Predicciones Iniciales	39
3.3.2. Predicciones de último minuto - Actualizaciones	39
3.4. Selección de Ocultaciones	43
3.5. Campañas de Observación de Ocultaciones	43
3.6. Observaciones de Ocultaciones Estelares	45
3.7. Resultados	47
3.7.1. Resultados de la Ocultación por (177) Irma	47
3.7.2. Resultados de la Ocultación por Plutón	48
3.8. Discusiones	48
3.8.1. Ocultación por (177) Irma	51
3.8.2. Ocultación por Plutón	52
3.8.3. Perspectivas	52
3.9. Conclusiones	55
A. Imágenes del OA-UNI DIMM en el OH	56
B. Imágenes del OA-UNI DIMM en Patacancha - Cusco	58
C. Imágenes durante las campañas de observación de Ocultaciones Estelares	61
D. Imágenes del Pre-Comisionamiento del OA-UNI (Junio/2014)	65
E. Predicciones de Ocultaciones Estelares Observadas	68
F. Campañas y llamados para observaciones de Ocultaciones Estelares	76
G. Ocultación por Plutón del 18 de Julio del 2012.	78
Bibliografía	79

Índice de figuras

2.1. Ejemplo de la Función de Dispersión Puntual. Créditos: LESIA	6
2.2. Disco de Airy y el Criterio de Rayleigh	7
2.3. Capas de la Atmósfera	8
2.4. La Circulación y Turbulencia en la atmósfera de la Tierra	9
2.5. Producción de la Turbulencia en la Atmósfera	10
2.6. Producción de Turbulencia	10
2.7. Formación de imágenes con turbulencia atmosférica	12
2.8. Efectos de la Turbulencia en Astronomía	13
2.9. Esquema óptico del OA-UNI DIMM	15
2.10. Lugares de las Misiones Observacionales	19
2.11. OA-UNI DIMM en el Observatorio de Huancayo.	21
2.12. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 05/08/2012 en el OH.	23
2.13. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 05/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	23
2.14. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 06/08/2012 en el OH.	24
2.15. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 06/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	24

2.16. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 07/08/2012 en el OH.	25
2.17. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 07/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	25
2.18. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 08/08/2012 en el OH.	26
2.19. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 08/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	26
2.20. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 09/08/2012 en el OH.	27
2.21. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 09/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	27
2.22. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 10/08/2012 en el OH.	28
2.23. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 10/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	28
2.24. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 11/08/2012 en el OH.	29
2.25. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 11/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM	29
2.26. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 09/06/2013 en el OH.	30
2.27. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 09/06/2013 en el OH con el OA-UNI DIMM	30
2.28. Lugares de las Misiones Observacionales en Cusco	32
2.29. Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 01/06/2013 en Patacancha.	33

2.30. Histograma de los valores de Seeing para la noche del 01/06/2013 en Patacancha con el OA-UNI DIMM	34
3.1. Sombra del Planeta Enano Eris	38
3.2. Predicción de la Ocultación por Plutón en base al catálogo WFI	40
3.3. Actualización astrométrica observada en el Pic du Midi.	41
3.4. Actualización astrométrica, observada en Pico dos Dias.	42
3.5. Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma.	44
3.6. Sistema utilizado para la observación de ocultaciones estelares.	46
3.7. Curva de luz de la Ocultación por (177) Irma.	49
3.8. Curva de luz de la Ocultación por Plutón.	50
3.9. Mapa de las estaciones de observación de la Ocultación por Irma.	51
3.10. Mapa de las estaciones de observación de la Ocultación por Plutón.	53
3.11. Plutón y el campo de estrellas de la Ocultación del 18 de julio del 2012.	54
A.1. OA-UNI DIMM en el OH	56
A.2. OA-UNI DIMM y el autor en el OH	57
B.1. La Montaña Pachatusan vista desde la comunidad de Huacoto.	58
B.2. La Montaña Pachatusan vista desde la comunidad de Patacancha	59
B.3. El OA-UNI DIMM en Patacancha.	60
C.1. El C8 en la Ocultación de Plutón en el OH.	61
C.2. Planetarium Cusco.	62
C.3. El C14 de Philippe Tinajeros en el Pic du Midi.	63
C.4. Observacion de (177) Irma desde el OBSPM.	64
D.1. Comisionamiento del OA-UNI.	66
D.2. Comisionamiento del OA-UNI.	67
E.1. Predicción de la Ocultación por el asteroide (895) Helio.	68

E.2. Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma.	69
E.3. Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma.	70
E.4. Predicción de la ocultación del asteroide (3550)Link.	71
E.5. Predicción de la Ocultación por Plutón en base al catalogo WFI	72
E.6. Predicción de la ocultación del asteroide (654)ZELINDA.	73
E.7. Predicción de la ocultación del TNO 2002 TC302.	74
E.8. Predicción de la ocultación del TNO 1995 GO ASBOLUS.	75
F.1. Alerta para la observación de la ocultación por (177) Irma.	76
F.2. Campaña para la observación de la ocultación por Plutón.	77
G.1. Ocultación Estelar por Plutón el 18 de Julio del 2012.	78

Índice de tablas

2.1. Producción de Turbulencia en la atmósfera.	11
2.2. Especificaciones del OA-UNI DIMM	14
2.3. Posiciones Geográficas de Patacancha y del Observatorio de Huancayo.	20
2.4. Datos generales de Achernar y Altair.	20
2.5. Log de observaciones de <i>seeing</i> con OA-UNI DIMM en el OH (05-11/agosto/2012).	22
2.6. Log de observaciones de <i>seeing</i> con OA-UNI DIMM en el OH (09/junio/2013).	31
2.7. Posiciones Geográficas de Patacancha y Huacoto	32
2.8. Log de observaciones de <i>seeing</i> con OA-UNI DIMM en Patacancha (01/Junio/2013).	33
3.1. Resumen de las ocultaciones seleccionadas para observar.	45
3.2. Posiciones Geográficas de los lugares de observación de las ocultaciones.	46
3.3. Resumen de los Resultados de las Observaciones de Ocultaciones.	47

Lista de Acrónimos

UNI Universidad Nacional de Ingeniería.

OA-UNI Observatorio Astronómico de la UNI .

OPP Observatorio Para el Perú.

IGP Instituto Geofísico del Perú.

OBSPM l'Observatoire de París Meudon.

LESIA Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique.

IMCCE Institut de Mécanique Céleste de Calcul des Ephémérides.

IGI-UNI Instituto General de Investigación - UNI.

RPB Red Raúl Porras Barrenechea.

OH Observatorio de Huancayo.

FWHM Full Width at Half Maximum.

SEEING Calidad de Cielo o FWHM.

DIMM Differential Imaging Motion Monitor.

GA Grupo Astronomía.

FC-UNI Facultad de Ciencias de la UNI.

CCD Charge Coupled Device.

TNO Trans Neptunian Objet.

SCIDAR SCIntillation Detection And Ranging.

GSM General Seeing Monitor .

PSF Point Spread Function.

C8 Telescopio Celestron de 8".

C14 Telescopio Celestron de 14".

OFR Optical For Research (Division of Thorlabs Inc.).

IRAF Imaging Reduction and Analysis Facility.

V Magnitud Absoluta Visual.

AR Ascensión Recta.

dec declinación.

UA Unidad Astronómica.

MPC Minor Planet Center.

MPCORB MPC ORBit Database.

IAA Instituto de Astrofísica de Andalucía.

LNA Laboratorio Nacional de Astrofísica.

PRAIA Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En el 2001 el Grupo Astronomía¹ (GA) de la Facultad de Ciencias (FC-UNI) implementó el “Laboratorio de Tratamiento de Imágenes Astronómicas CCD”. Experiencia en las técnicas observacionales con detectores CCDs fue adquirida desde el año 2001 dentro del proyecto “Observaciones Astronómicas con CCD” en el Observatorio de Huancayo (OH). El resultado de estos trabajos de investigación permitió realizar una serie de publicaciones científicas en revistas como TECNIA y REVCUNI (Baella 2001, Baella & Pereyra 2003, Pereyra 2003, Dalmau & Pereyra 2004, Meza et al. 2013).

En el 2009, declarado por la UNESCO como “Año Internacional de la Astronomía”, el Grupo Astronomía de la Facultad de Ciencias, inicia el proyecto de implementación del **Observatorio Astronómico de la UNI (OA-UNI)** (Meza et al. 2009, Pereyra et al. 2013). Dentro de los alcances de este proyecto se incluye llevar a cabo medidas de *seeing* a través de la técnica de monitoreo diferencial de imagen y la construcción del **OA-UNI DIMM**. Este dispositivo permite medir el *seeing* con la precisión necesaria, de modo que es posible determinar el po-

¹<http://astronomia.uni.edu.pe>

tencial de un determinado lugar para observaciones astronómicas. En este sentido, calificar la calidad de cielo es de vital importancia para las observaciones astronómicas debido a su impacto directo en el rendimiento de las medidas fotométricas y espectroscópicas.

En el año 2011 iniciamos una colaboración con el Dr. Bruno Sicardy (LESIA- OBSPM) que consiste en la Observación de Ocultaciones Estelares desde los Andes Peruanos. Este método de ocultación estelar es comúnmente utilizado para estudiar los cuerpos mas lejanos del sistema solar, las atmósferas planetarias, o anillos de cuerpos menores (Sicardy, Roques & Brahic 1991). Campañas mundiales utilizando esta técnica vienen produciendo importantes resultados que incluyen el descubrimiento de la atmósfera de Plutón (Brosh 1995, Hubbard et al. 1988, Elliot et al. 1989), el descubrimiento y caracterización de los anillos de Urano (Elliot et al.1997), la detección de ondas gravitacionales en la atmósfera de Titán (Sicardy, Ferri & Roques 1999), la explicación del comportamiento complejo estacional de Plutón (Elliot, Person & Qu 2003, Sicardy et al. 2003), la reciente medida precisa del tamaño del Objeto Trans-neptuniano (TNO de sus siglas en inglés) Eris (Sicardy et al. 2011), o el descubrimiento de un Sistema de Anillos alrededor del asteroide tipo Centauro (10199) Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014).

Así, campañas de observación de ocultaciones son organizadas por LESIA y sus colaboradores, implicando en esto tanto observatorios profesionales como aficionados. Es usual que la información necesaria para cada evento esté disponible en la red para los observadores potenciales.

1.2. Objetivos

Nuestros objetivos en el presente trabajo son:

- Implementar un Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen el cual sea capaz de

caracterizar la turbulencia atmosférica, es decir el *seeing*. Dicha caracterización resulta de vital importancia para determinar la calidad del cielo en aquellos lugares en que se ubican los observatorios astronómicos.

- Adquirir las competencias para la observación de ocultaciones por diversos cuerpos del sistema solar como Asteroides (como por ejemplo, los Centauros) y/o TNO's.

Capítulo 2

Implementación y Observaciones con el OA-UNI DIMM

2.1. Introducción

La turbulencia atmosférica es uno de los mayores problemas en la astronomía óptica, ya que degrada la resolución angular de los telescopios. Esto se traduce en una pérdida de la calidad de cielo para las observaciones astronómicas. Comúnmente la palabra *seeing*, en inglés, es utilizada en astronomía para caracterizar el efecto de la turbulencia atmosférica. El diámetro de la imagen de una estrella, también llamado disco de *seeing*, varía aproximadamente de 0,3" a 10" o más, de acuerdo a las condiciones meteorológicas. Un buen valor de *seeing* se encuentra entre 0.2" a 0.5", mientras que valores normales varían entre 0.6" a 1.0". Mas allá de 1.0" el *seeing* es considerado de baja calidad, lo que afecta de manera importante la imagen formada (Lombardi 2008).

Cuando se obtiene una imagen estelar con alta magnificación a través del telescopio, la estructura de la imagen está, por lo general, lejos del patrón de difracción teórico. Esto cambia rápidamente con el tiempo, incluso utilizando una óptica perfecta. La forma de la ima-

gen depende de la apertura del telescopio. Así, un movimiento aleatorio de la imagen es el principal efecto en telescopios de pequeñas aperturas. Con telescopios de grande apertura ocurre una difusión y desenfoco de la imagen. Frecuentemente se observa una estructura moteada o “speckles”, que Rosch (1954) lo describe como un racimo de uvas.

A inicio de los 60's, la física de la degradación de la imagen todavía no era muy comprendida. Muchas técnicas empíricas fueron elaboradas con el objetivo de realizar estimaciones cuantitativas de la degradación de la imagen (ver por ejemplo Stock y Keller 1960 y Meinel 1960).

Actualmente la degradación de la imagen en la atmósfera terrestre es teóricamente bien entendida (Tatarski 1961, Roddier 1981) usando como base al modelo de turbulencia de Kolmogorov (1941). En este modelo, un solo parámetro, el parámetro de Fried (1965) " r_0 ", es suficiente para describir todos los efectos de la turbulencia o *seeing* (Young 1974). Este parámetro se puede medir a partir del movimiento de la imagen en un pequeño telescopio.

En los telescopios modernos de última generación, es de extrema importancia el conocimiento de la razón de degradación, D/r_0 , donde D es la apertura del telescopio. Por ejemplo, para un telescopio de 8 m de apertura y un valor típico r_0 de 10 cm, la degradación alcanza un factor 80. Así, cuanto mayor sea esta razón, el *seeing* será de menor calidad. Esto tiene muchas repercusiones en diferentes campos de la astronomía como fotometría, proyección de imagen clásica (imaging), espectroscopia, etc. (Roddier & Lena 1986, Dennfeld & Fort 1986).

Muchos intentos han sido hechos para medir el *seeing* desde los trabajos pioneros de Rosch (1954). Los parámetros relevantes a la degradación de la imagen están relacionados a las fluctuaciones turbulentas de la densidad del aire. En este sentido, los instrumentos de medición de

seeing (monitores de *seeing*) son instrumentos ópticos.

Para medir el *seeing* se usan diferentes conceptos, entre los cuales se puede destacar: la técnica Scidar (Azouit & Vernin 1980), la técnica DIMM (Stock & Keller 1960, Sarazin & Roddier 1990), y la técnica GSM (Martin et al. 1994). Las diferentes técnicas usan diferentes tipos de detectores que van desde el ojo humano, placas fotográficas, fotomultiplicadores hasta los actuales CCDs. Los monitores tipo DIMM son actualmente los instrumentos de tipo patrón para las mediciones de *seeing*.

2.2. Concepto de Seeing

La distribución de luz generada por un objeto puntual en el plano focal de un telescopio, es descrita por una función denominada Función de Dispersión Puntual o de sus siglas en inglés PSF (*Point Spread Function*, fig. 2.1).

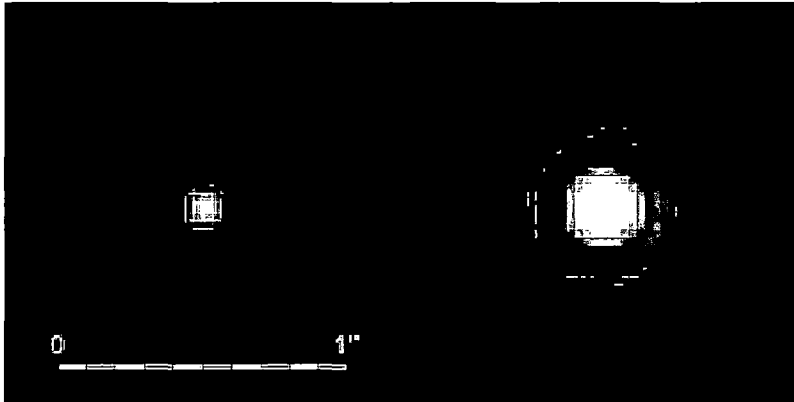


Figura 2.1: Ejemplo de la Función de Dispersión Puntual. Créditos: LESIA

Cuando la luz se propaga en un medio homogéneo, la imagen de una fuente puntual producida por un telescopio de diámetro D , en una longitud onda λ , forma un patrón de difracción llamado **Disco de Airy**. Este patrón resultante tiene una región central brillante rodeada de una serie de anillos concéntricos que forman el patrón de Airy. El tamaño de la parte central,

ε_D (ver figura 2.2), es dado por:

$$\varepsilon_D \sim \frac{\lambda}{D}. \tag{2.1}$$

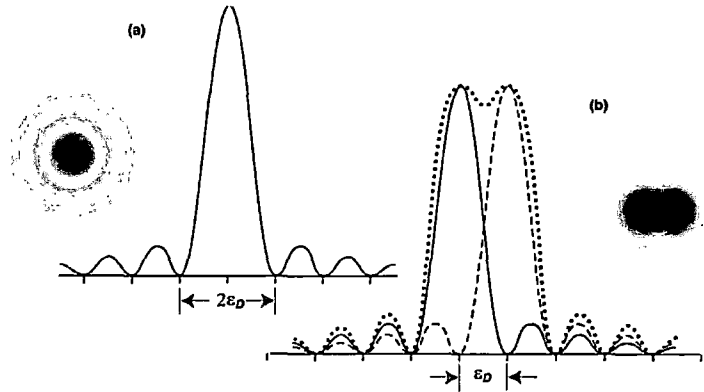


Figura 2.2: (a) El patrón de Airy (intensidad vs radio). (b) La imagen negativa de dos fuentes puntuales monocromáticas idénticas separadas por un ángulo igual al límite de Rayleigh. El gráfico muestra la intensidad a lo largo de la línea que une las dos imágenes. Las imágenes sin mezclar se representan con líneas continuas y las líneas discontinuas representan la suma (Frederick 2010).

El poder de resolución de un telescopio requiere que para resolver dos fuentes, los centros de sus discos de Airy deben estar separados, como mínimo, una distancia ε_D (criterio de Rayleigh). Sin embargo, durante observaciones astronómicas este límite teórico no puede ser alcanzado debido a que:

- La turbulencia atmosférica hace borrosa la imagen.
- Las aberraciones ópticas deforman la imagen. Por ejemplo, la aberración de coma o problemas de foco.
- Las propiedades de los detectores son imperfectas.

El resultado es que la PSF observada es más grande que lo normal y tiene aproximadamente un perfil gaussiano. Para cuantificar el concepto de *seeing* se utiliza el ancho total a media

altura, σ_{FWHM} (de sus siglas en inglés *Full Width at Half Maximum*), de la PSF que se mide en segundos de arco.

2.3. Resolución de un telescopio con turbulencia atmosférica

La atmósfera terrestre está compuesta de una mezcla de gases que envuelven la Tierra y está estructurada en capas, que utilizando la temperatura como parámetro se dividen en 5 capas principales: Tropósfera, Estratósfera, Mesósfera, Termósfera y Exósfera (ver figura 2.3).

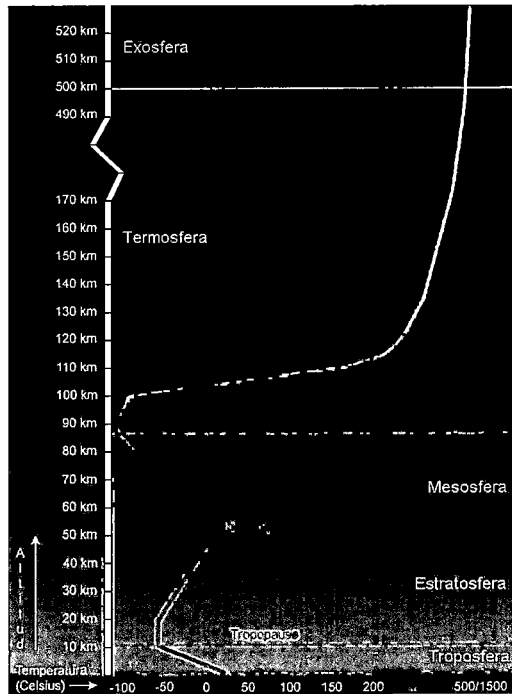


Figura 2.3: Capas de la Atmósfera.

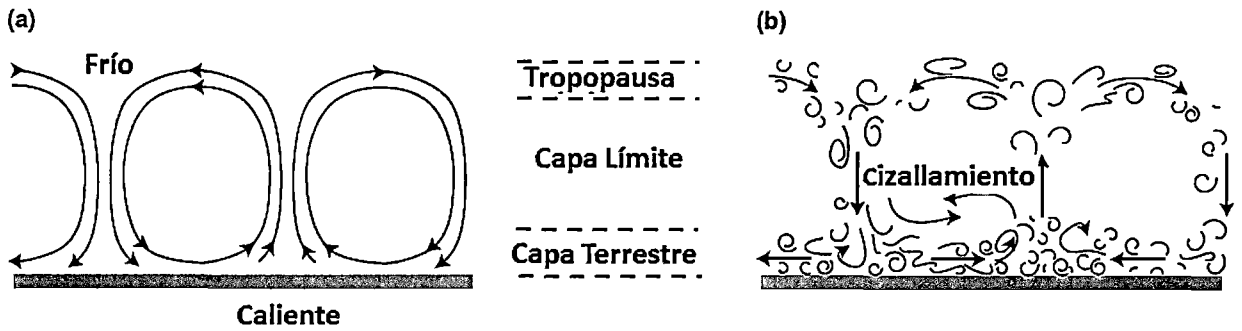


Figura 2.4: La circulación y la turbulencia en la atmósfera de la Tierra. Valores locales grandes de la cizalladura del viento en la capa límite también pueden producir turbulencia apreciable. (a) El patrón de circulación establecido por convección por encima de una superficie caliente. (b) La circulación modificada por la turbulencia (Frederick 2010)

En una atmósfera serena y quieta, la densidad y el índice de refracción sólo dependen de la altura, por lo que cada punto a la misma altitud tiene la misma temperatura. Sin embargo, el calentamiento diurno de Sol afecta la atmósfera, y en particular, las capas bajas como la Tropósfera (10 -12 Km). Éstas son las más comprometidas debido a la emisión térmica de la superficie terrestre. Así, las masas de aire más cercanas a la superficie entran en contacto con ella elevando su temperatura y son, en consecuencia, más ligeras que sus vecinas. De este modo tienden a subir, mientras que otras masas de aire se mueven de manera horizontal para llenar su lugar. Adicionalmente aire frío desciende desplazado por las masas más calientes y completa un proceso de circulación alrededor de una célula convectiva. Con esto, muchas células se generan, y el aire tiende a romperse en remolinos y trozos (cizallamiento) cada vez más pequeños de diferente densidad y temperatura como se puede observar en la figura 2.4. Esta ruptura del flujo es la **turbulencia**, que también puede ser generada por la presencia de obstáculos (ver figura 2.5).

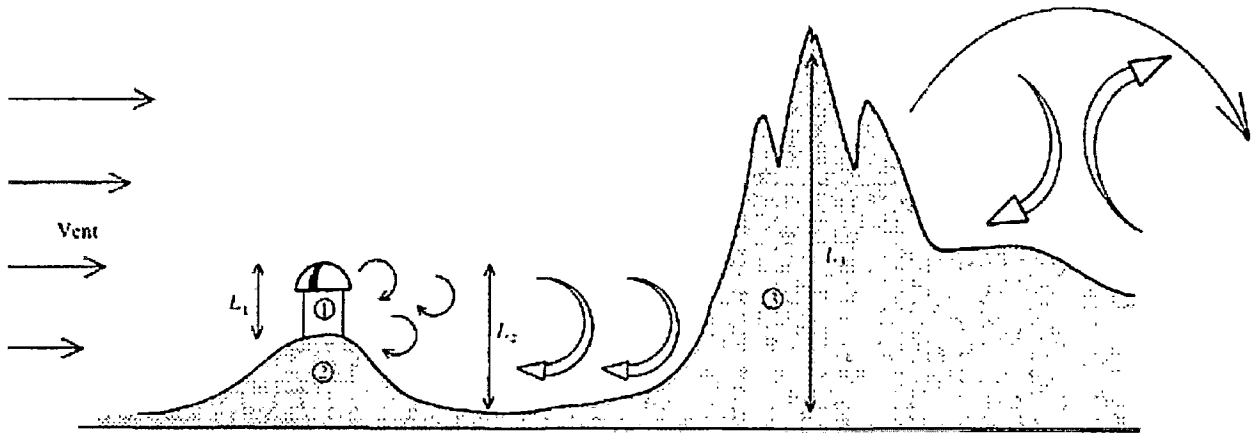


Figura 2.5: Representación esquemática de la producción de turbulencia en la atmósfera generada por diferentes obstáculos. Las escalas L_1 , L_2 y L_3 son típicas escalas de turbulencia producidas por los diferentes obstáculos 1, 2 y 3 (Léna 2008).

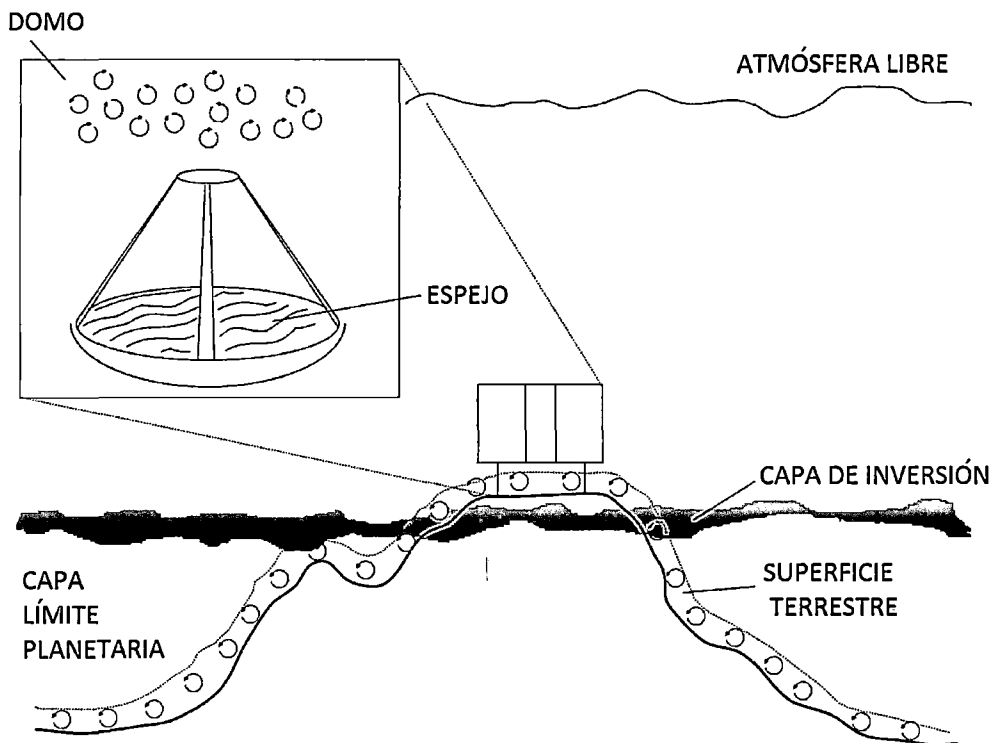


Figura 2.6: Producción de Turbulencia (Lombardi 2008).

Tabla 2.1: Producción de Turbulencia en la atmósfera.

Contribución	Lugar donde se forma	Causa
Espejo	Espejo Primario	Gradiente térmico entre el Espejo Primario y sus alrededores.
Domo	Dentro de la Cúpula	Gradiente térmico entre la zona interna y externa de la cúpula.
Superficie Terrestre	Capa de inversión superficial	Calentamiento diurno de la superficie que genera celdas convectivas locales.
Capa Límite Planetaria	Hasta debajo de la capa de inversión principal	Calentamiento diurno del Sol genera células convectivas que son transportadas por las corrientes ascendentes y descendentes.
Atmósfera libre	Tropósfera hasta 25Km	Corrientes convectivas en la tropósfera.

La turbulencia puede ser clasificada de acuerdo al lugar donde se generará como se muestra en la tabla 2.1 y en la figura 2.6. Su efecto principal es degradar las imágenes astronómicas. Esto se debe a que antes de alcanzar la apertura de un telescopio, la luz que viene de una estrella atraviesa varias capas atmosféricas turbulentas las cuales perturban la propagación del haz. En el plano focal del telescopio, el efecto de estas perturbaciones inducidas por la atmósfera es formar una imagen con forma aleatoria que cambia muy rápidamente (patrón de Speckles). Para exposiciones largas, la imagen de una estrella, cambia rápidamente, de modo que una integración larga en una cámara CCD, producirá una imagen que será el promedio de todas las imágenes speckles aleatorias (fig. 2.7). El resultado es una imagen con forma de una gaussiana. Pues bien, el ancho total a mitad de altura ϵ_{FWHM} (FWHM, full width half maximum) de dicha gaussiana, es lo que se conoce en términos astronómicos como *seeing* (generalmente expresada en unidades de segundos de arco). Por las razones antes mencionadas, es imposible alcanzar la resolución angular teórica ϵ_D de un espejo perfecto en el foco de un telescopio. Por tanto, la calidad de una imagen será mejor cuanto más pequeño sea el *seeing*.

El modelo patrón de *seeing* astronómico, desarrollado por Tatarski (1961) y Fried (1965),

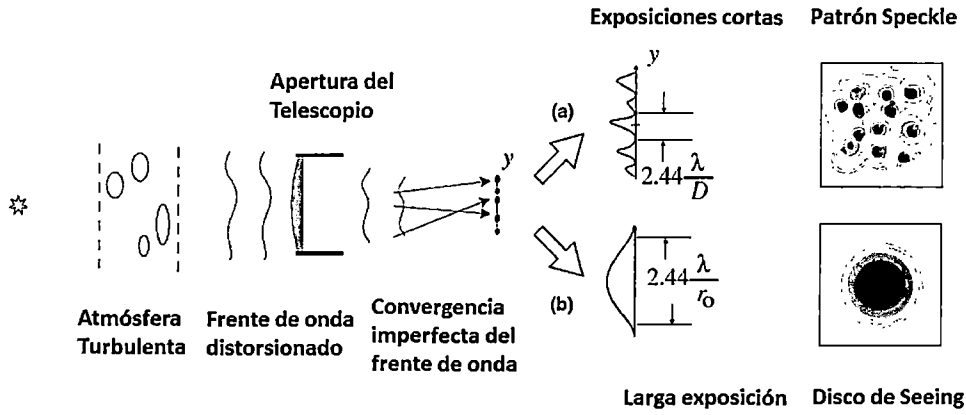


Figura 2.7: Formación de la imagen en un telescopio con turbulencia atmosférica. (a) En una exposición corta, las distorsiones del frente de onda causadas por variaciones del índice de refracción en la atmósfera producen patrones de interferencia (Disco de Airy). (b) En presencia de turbulencia durante una exposición larga se produce un disco de *seeing* grande (Frederick 2010).

está basado en el trabajo de Kolmogorov (1941) sobre turbulencia atmosférica que ha sido revisado en detalle por Roddier (1981). El resultado crucial es que la propagación de la turbulencia en el modelo de Kolmogorov está dado por la función de estructura $D_\phi(\vec{\rho})$ de las perturbaciones de la fase del frente de onda $\phi(\vec{\rho})$ y que depende de la escala de separación $\vec{\rho}$ según:

$$D_\phi(\vec{\rho}) = \langle [\phi(\vec{r} + \vec{\rho}) - \phi(\vec{r})]^2 \rangle = 6,88 \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{5/3} \quad (2.2)$$

El modelo establece que para imágenes con exposiciones largas realizadas con telescopios de diámetro $D \geq r_0$, el FWHM o *seeing* es proporcional a λ/r_0 lo que significa que el *FWHM* $\propto \lambda^{-1/5}$.

$$seeing = 0,98 \frac{\lambda}{r_0}, \text{ para } r_0 \ll D \quad (2.3)$$

2.4. Efectos de la Turbulencia en Astronomía

Como hemos visto, el frente de onda es distorsionado por la turbulencia atmosférica. Este efecto se puede observar en las imágenes generadas por telescopio, ya sea como variaciones en la Intensidad (cambio de brillo); en la nitidez (imagen borrosa); o en la posición (imagen movida) (ver figura 2.8).

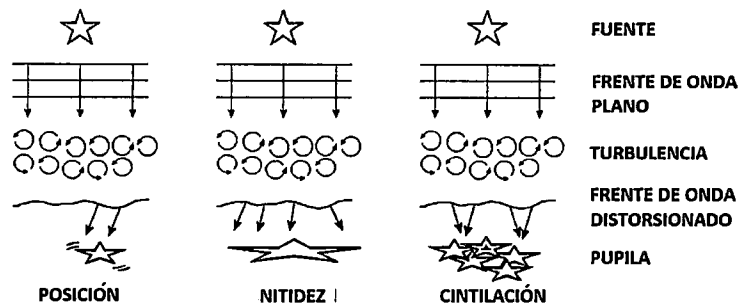


Figura 2.8: Esquema simple de los efectos de la turbulencia atmosférica en astronomía (Lombardi 2008).

2.5. Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen - DIMM

Un Monitor de Movimiento Diferencial de Imagen - DIMM (Sarazin & Roddier 1990) es un sistema óptico formado por un telescopio en el cual la luz pasa por dos aperturas idénticas separadas una distancia " d " como se observa en la figura 2.9. El cono de luz producido por cada apertura es desplazado por el prisma situado en una de ellas formando una imagen bien separada en el plano focal del telescopio. El movimiento relativo de ambas imágenes en el plano imagen representa inclinaciones locales del frente de onda. Existen factores que afectan por igual a las imágenes producidas por ambas aperturas, como por ejemplo, las vibraciones del telescopio. Sin embargo, hay otros factores que afectan de forma diferente a cada una de las aperturas, como por ejemplo, la turbulencia atmosférica. Estas pequeñas variaciones en la separación de las imágenes son utilizadas para obtener una estimación

Tabla 2.2: Especificaciones del OA-UNI DIMM

Dispositivo	Parámetro
Telescopio	Celestron C8
Diámetro	20cm
Sub-apertura	6.38cm
Separación Sub-aperturas	14.16cm
Detector	Sony ICX419ALL
Escala de placa	0.81 arcseg/pixel

cuantitativa de la turbulencia inducida por la fluctuación de fase del frente de onda, es decir del “*seeing*”.

El sistema utilizado que compone el **OA-UNI DIMM** incluye (1) un telescopio Celestron de 8” (C8) equipado con una máscara con dos aperturas de 63.8mm de diámetro cada una. Ambas aperturas están colocadas simétricamente a una distancia de 141.6mm entre ellas; (2) una cuña óptica con deflexión de 1’, manufacturada por OFR¹ en vidrio óptico BK7, que fue instalada en una de las aberturas como muestra la figura 2.9; (3) un detector CCD WATEC 120N+, de rápido muestreo, facilitada por el Dr. Bruno Sicardy (LESIA-OBSPM); (4) un astrógrafo del OH o una montura analógica Celestron, donde se acopla el telescopio; y, (5) una computadora personal con procesador tipo Pentium IV o una laptop con procesador Cori5 que controlan el uso de la cámara CCD. La tabla 2.2 muestra las especificaciones del OA-UNI DIMM.

¹<http://www.ofr.com>

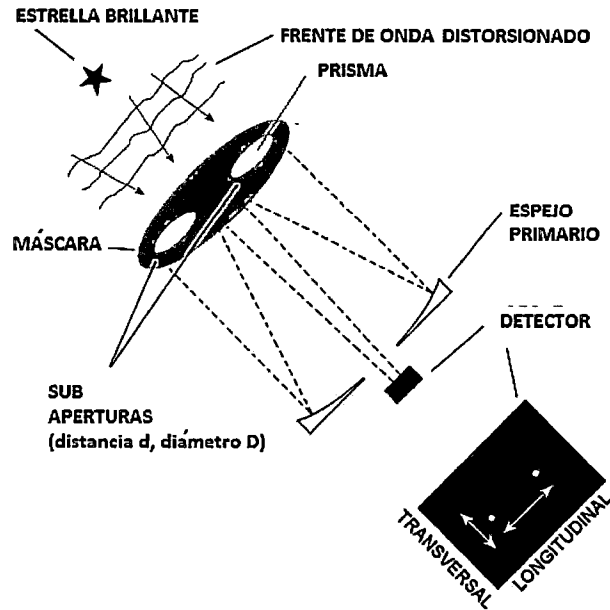


Figura 2.9: Esquema óptico del OA-UNI DIMM. El principio es producir dos imágenes gemelas de una estrella, con el mismo telescopio. Para ello, se usan dos aperturas, cada una de tamaño D , separadas una distancia d . El prisma situado en una de las aperturas produce un desplazamiento en la imagen, de manera que en el plano focal del telescopio habrá dos imágenes separadas de la misma estrella. Este método diferencial elimina posibles movimientos erráticos del telescopio (Lombardi 2008).

2.6. Teoría del DIMM

La deformación del frente de onda $z(x, y)$, es proporcional a la diferencia de fase del frente de onda $\phi(x, y)$ (Sarazin & Roddier 1990):

$$z(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x, y) \quad (2.4)$$

Los haces de radiación son normales a la superficie del frente de onda, el cual llega con una pendiente $\alpha(x, y)$, cuya componente en x viene dada por la siguiente expresión:

$$\alpha(x, y) = -\frac{\partial}{\partial x} z(x, y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) \quad (2.5)$$

Por otro lado la covarianza de dicho ángulo:

$$B_\alpha(\xi, \eta) = \langle \alpha(x, y), \alpha(x + \xi, y + \eta) \rangle \quad (2.6)$$

está relacionada con la covarianza de la función de fase $B_\phi(\xi, \eta)$ por la siguiente expresión:

$$B_\alpha(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} B_\phi(\xi, \eta) \quad (2.7)$$

Introduciendo la función de estructura de fase, definida como:

$$D_\phi(\xi, \eta) = 2[B_\phi(0, 0) - B_\phi(\xi, \eta)] \quad (2.8)$$

se obtiene (Sarazin & Roddier 1990)

$$B_\alpha(\xi, \eta) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} D_\phi(\xi, \eta) \quad (2.9)$$

Para la turbulencia de Kolmogorov (1941), la función de estructura de fase, viene dada por la expresión usada por Roddier (1981):

$$D_\phi(x, y) = 6,88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (2.10)$$

donde $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ y r_0 es el parámetro de Fried (1965). Combinando las ecuaciones 2.10 en 2.9 se tiene:

$$B_\alpha(\xi, \eta) = 0,145\lambda^2 r_0^{-5/3} [(\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} - \frac{1}{3}\xi^2(\xi^2 + \eta^2)^{-7/6}]$$

Para $\eta = 0$ obtenemos la covarianza longitudinal como función de la separación $\xi = d$:

$$B_l(d) = B_\alpha(d, 0) = 0,097\left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{5/3}\left(\frac{\lambda}{d}\right)^{1/3} \quad (2.11)$$

Si queremos obtener la covarianza lateral o transversal como función de la separación $\eta = d$,

$$B_t(d) = B_\alpha(0, d) = 0,145\left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{5/3}\left(\frac{\lambda}{d}\right)^{1/3} \quad (2.12)$$

A primera vista, existe una divergencia en el origen. Dicha divergencia no es física, y el valor en el origen viene dado por la expresión de la varianza del movimiento de la imagen provocado por la turbulencia. Según Fried (1965) y Tatarski (1961)

$$B_\alpha(0, 0) = 0,179\left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{5/3}\left(\frac{\lambda}{D}\right)^{1/3} \quad (2.13)$$

donde D es el diámetro de las aperturas usadas para hacer las medidas. La varianza $\sigma^2(d)$ del movimiento de una imagen diferencial observada en una distancia d , viene dada por (Sarazin & Roddier 1990):

$$\sigma^2(d) = 2[B(0) - B(d)] \quad (2.14)$$

Dicha expresión junto con las ecuaciones 2.11 y 2.13 nos da una aproximación para la varianza del movimiento longitudinal diferencial para valores $d \geq 2D$:

$$\sigma_l = \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[0,179D^{-1/3} - 0,968d^{-1/3} \right] \quad (2.15)$$

Y del mismo modo se puede obtener una expresión análoga para la varianza transversal para valores $d \geq 2D$:

$$\sigma_t = \lambda^2 r_0^{-5/3} \left[0,179D^{-1/3} - 0,145d^{-1/3} \right] \quad (2.16)$$

Las varianzas son calculadas de las medidas del movimiento de imagen.

2.7. Cálculo del Seeing

En cada frame, son calculadas las posiciones de las dos imágenes generadas por el DIMM de la misma estrella. El cálculo es realizado a través del software “Seeing Monitor Analyser”², el cual computa los centroides respectivos en el sistema de referencia del detector. Información adicional pertinente es también registrada en cada medida como la hora de la adquisición (en día juliano) y la masa de aire. Cada medida de *seeing* se calcula usando 50 frames consecutivos. En cada frame las distancias relativas de los centroides de las imágenes de cada eje (Δx y Δy) son calculadas. Con esto las varianzas ($\sigma_x^2 = \sigma_t^2$ y $\sigma_y^2 = \sigma_t^2$) son calculadas cada 50 frames y usando las ecuaciones 2.3, 2.15 y 2.16 se calcula una medida de *seeing*. Finalmente una verificación es realizada para las medidas de *seeing* incluyendo un filtrado con 1σ utilizando una rutina que se ha desarrollado en IRAF³.

2.8. Misiones Observacionales

Dos misiones observacionales fueron organizadas para medir el *seeing*. Los lugares elegidos fueron el Observatorio de Huancayo (OH) y la comunidad de Patacancha en Cusco (ver fig. 2.10). Estos sitios fueron elegidos debido a la existencia de proyectos para implementar o construir observatorios astronómicos en lugares aledaños como el proyecto del “Observatorio Astronómico de la UNI (OA-UNI)” (Meza et al. 2009, Pereyra et al. 2013) y el “Observatorio

²<http://www.alcor-system.com/us/DimmSoftware/index.html>

³IRAF - Image Reduction and Analysis Facility - <http://iraf.noao.edu/>

para el Perú (*Pachatusan*) en Cusco”(Quintanilla et al. 2011). La tabla 2.3 detalla las coordenadas geográficas y la altitud de los dos lugares de observación.

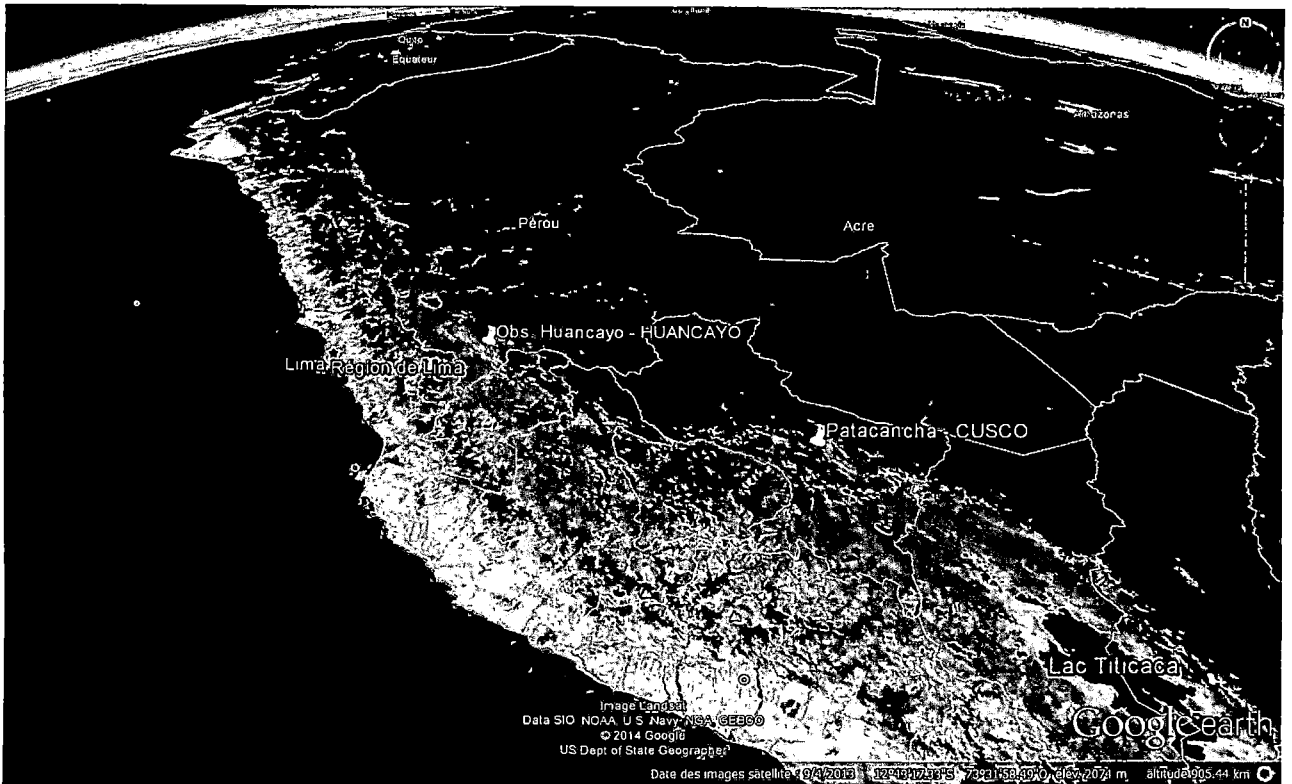


Figura 2.10: Ubicación geográfica de Patacancha - Cusco y del Observatorio de Huancayo.

2.9. Observaciones en el Observatorio de Huancayo

Las observaciones realizadas desde el Observatorio de Huancayo que está ubicado a 12 Km de la ciudad de Huancayo se realizaron durante siete noches consecutivas del 5 al 11 de agosto de 2012.

El telescopio C8 fue montado sobre el astrógrafo del OH como se muestra en la figura 2.11.

Tabla 2.3: Posiciones Geográficas de Patacancha y del Observatorio de Huancayo.

Lugar	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
Patacancha - Cusco	13°33'04" S	71°48'05" O	3879
Observatorio de Huancayo	12°02'12" S	75°19'07" O	3350

Fuente: Google Earth.

Tabla 2.4: Datos generales de Achernar y Altair.

	AR	Dec	V (mag)
Achernar	01 ^h 37 ^m 42,85 ^s	-57°14'12.31"	0.46
Altair	19 ^h 50 ^m 47,00 ^s	08°52'05.96"	0.76

Fuente: SIMBAD.

Imágenes de esta misión se pueden observar en el Apéndice A. Una computadora personal con procesador tipo Petium IV controló el uso de la cámara CCD. Las condiciones atmosféricas durante las noches de observación fueron óptimas, es decir, no se observaron nubes pasajeras. Las estrellas observadas con el OA-UNI DIMM fueron Achernar (α Eri) y Altair (α Aql). La tabla 2.4 muestra sus coordenadas ecuatoriales (J2000) y sus magnitudes visuales aparentes (V), obtenidas de la base de datos SIMBAD⁴.

2.9.1. Resultados de las medidas de Seeing en el Observatorio de Huancayo

En la tabla 2.5 se muestra los resultados de las observaciones realizadas noche por noche con el OA-UNI DIMM en el OH en agosto del 2012. Se muestra el periodo observado (en horas) en cada noche, así como el número efectivo de medidas de *seeing* tomadas en el muestreo de cada noche. Finalmente, la estadística del *seeing* (en segundos de arco) para cada una de las siete noches es calculada. Ésta incluye el promedio, la mediana y la desviación estándar.

⁴SIMBAD - <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>

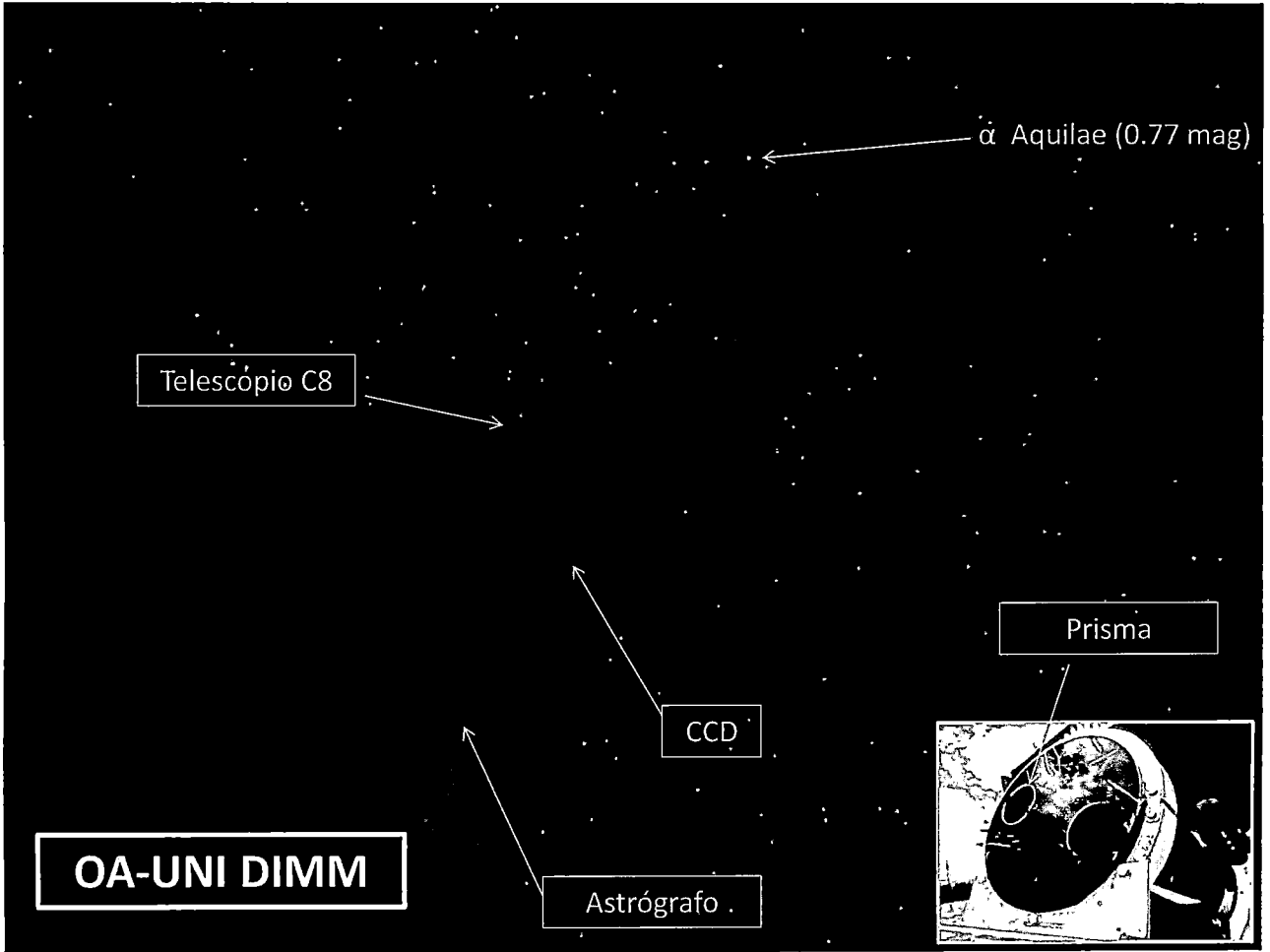


Figura 2.11: OA-UNI DIMM en el Observatorio de Huancayo.

Tabla 2.5: Log de observaciones de *seeing* con OA-UNI DIMM en el OH (05-11/agosto/2012).

Noche	Periodo (horas)	Muestra	Seeing(")						
			promedio	mediana	desviación estándar	min	<0.5" (%)	<1.0" (%)	<1.5" (%)
05	3	1614	1.58	1.53	0.34	0.74	0	1.8	46.5
06	7	3491	1.03	1.01	0.21	0.49	0	47.7	96.9
07	7	3526	1.33	1.28	0.31	0.65	0	12.0	73.4
08	7	3007	1.46	1.42	0.29	0.70	0	2.9	60.7
09	6	3243	1.44	1.38	0.35	0.62	0	6.7	61.3
10	7	3686	1.40	1.37	0.27	0.64	0	4.4	67.3
11	7.5	3920	1.32	1.26	0.30	0.68	0	11.6	77.3
Todas		22505	1.34	1.30	0.33	0.49	0	13.6	71.4

dar. Los valores mínimos obtenidos en cada noche también están indicados. La estadística considerando las medidas totales de las siete noches monitoreadas también es mostrada. La primera noche contiene pocas horas observadas debido al montaje inicial y a la calibración del sistema. La noche del 9 de agosto se presentó un problema técnico en el sistema eléctrico del observatorio por lo cual, sólo se realizaron medidas por 6 horas. Las figuras 2.12-2.25 muestran los valores de *seeing* y sus respectivos histogramas computados durante esta campaña observacional.

Finalmente se realizó una observación de verificación del OA-UNI DIMM el 09 de junio del 2013 en el OH. La tabla 2.6 muestra los resultados de esas medidas, y las figuras 2.26 y 2.27 muestran los valores de *seeing* y su respectivo histograma. A pesar de ser una única noche con pocas horas de observación sus resultados son comparables a la mejor noche obtenida 10 meses antes en el OH. La posibilidad de una mejora en el *seeing* en el mes de Junio frente al mes de Agosto en el OH debe ser confirmada en el futuro.

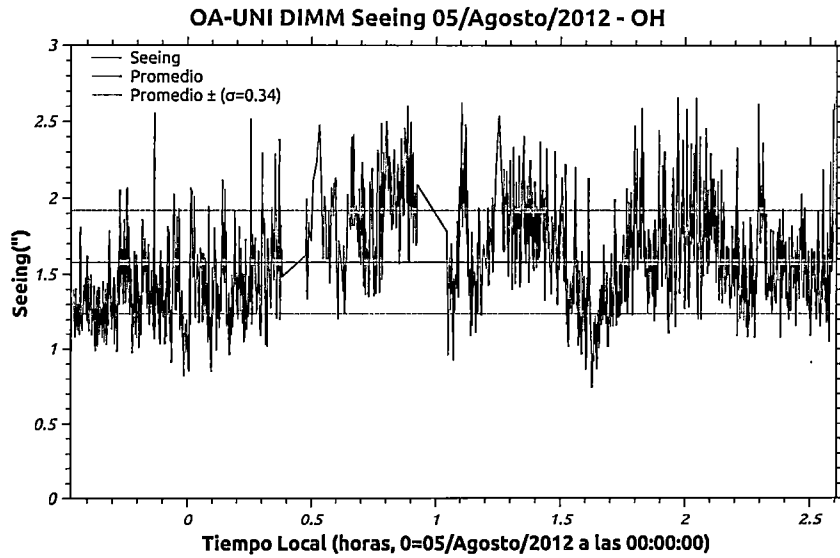


Figura 2.12: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 05/08/2012 en el OH. En rojo, los valores de *seeing*. En azul, el promedio de las medidas de *seeing*. En verde, la desviación estándar de los datos mostrados.

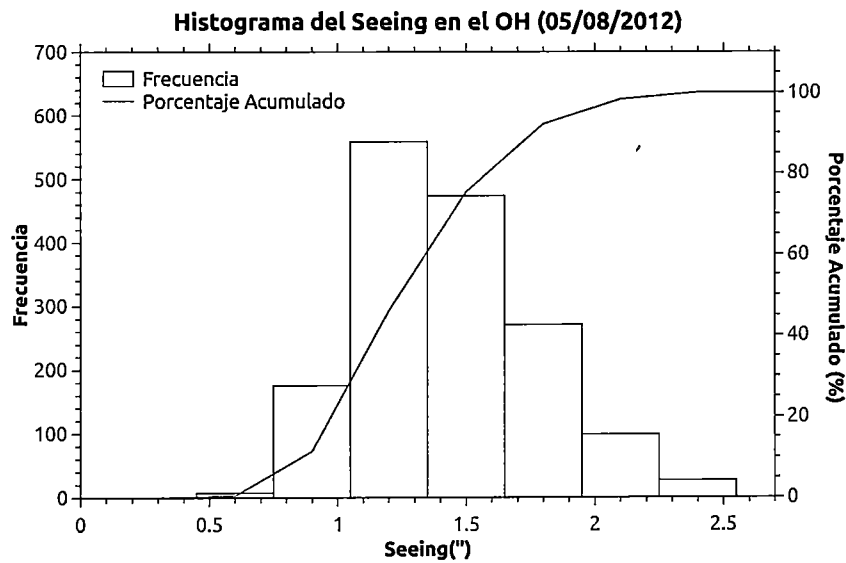


Figura 2.13: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 05/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM. En azul, la frecuencia de las medidas de *seeing*. En rojo, la curva de porcentaje acumulado, indicando la frecuencia de ocurrencia de valores de *seeing* menores que un valor de referencia.

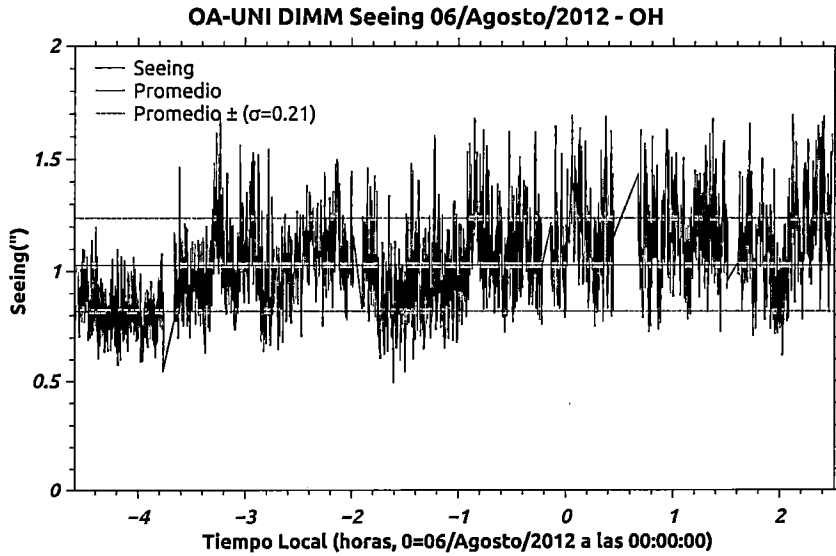


Figura 2.14: Gráfico de *Seeing* vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 06/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

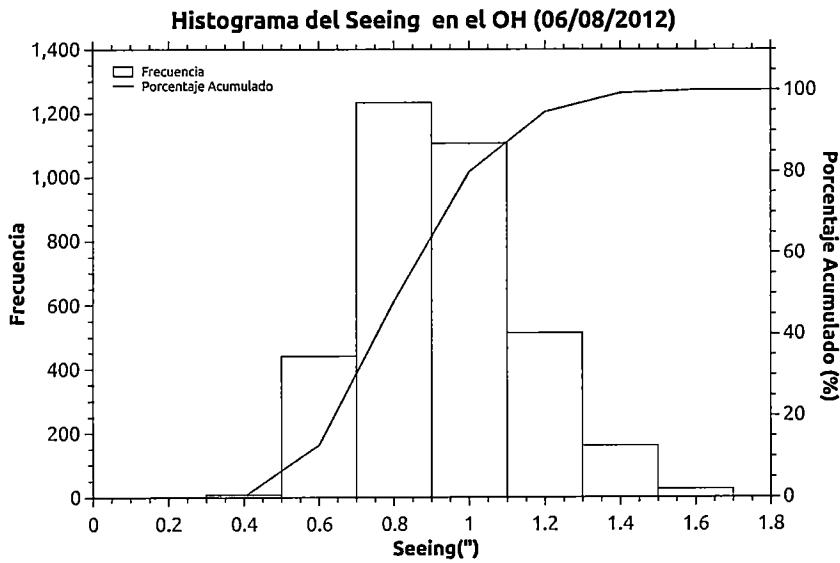


Figura 2.15: Histograma de los valores de *Seeing* para la noche del 06/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

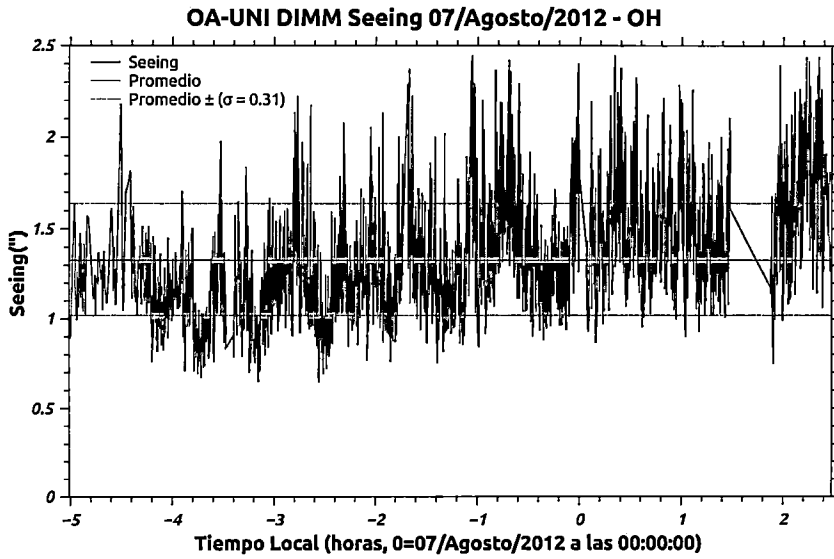


Figura 2.16: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 07/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12

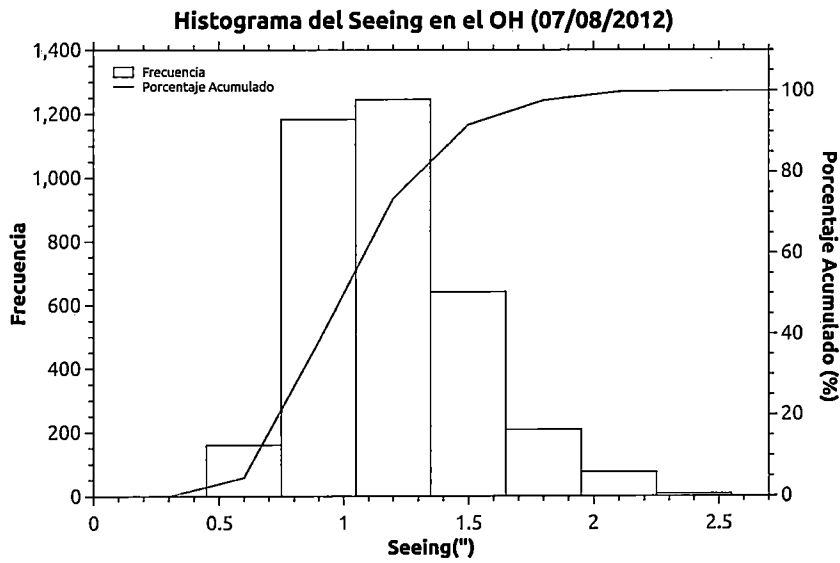


Figura 2.17: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 07/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

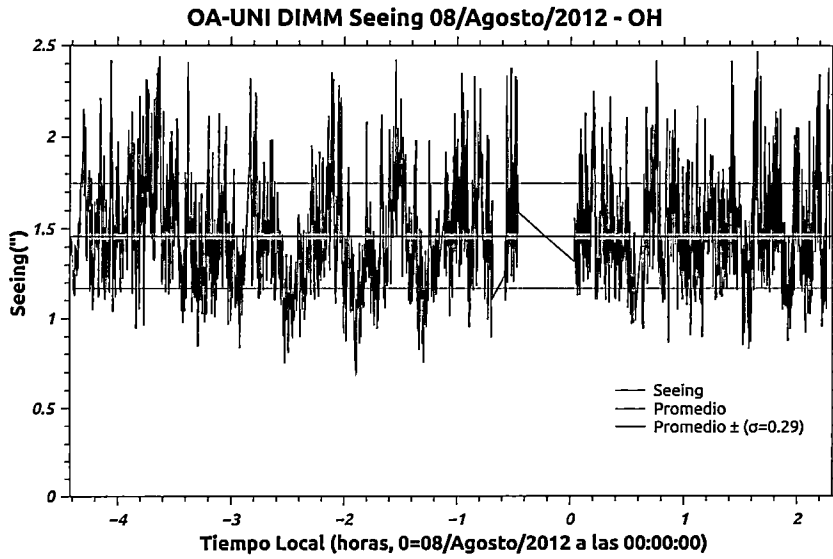


Figura 2.18: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 08/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

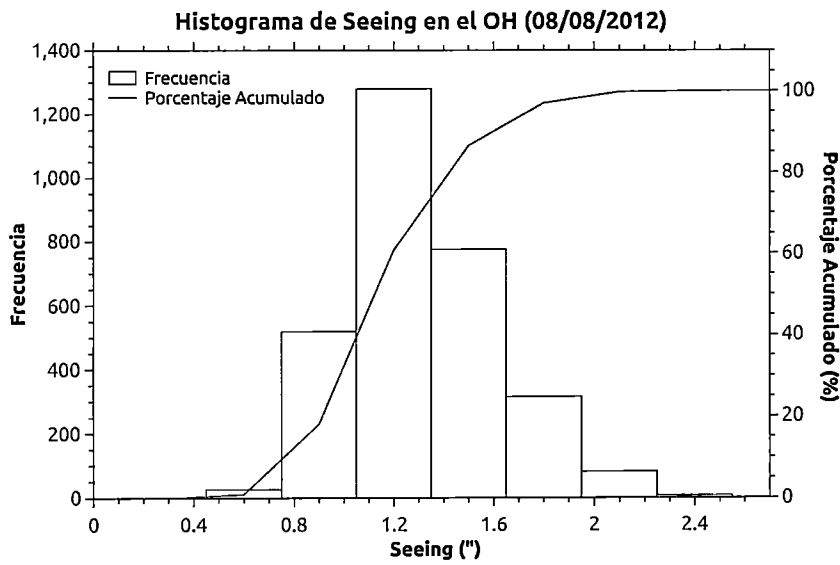


Figura 2.19: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 08/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

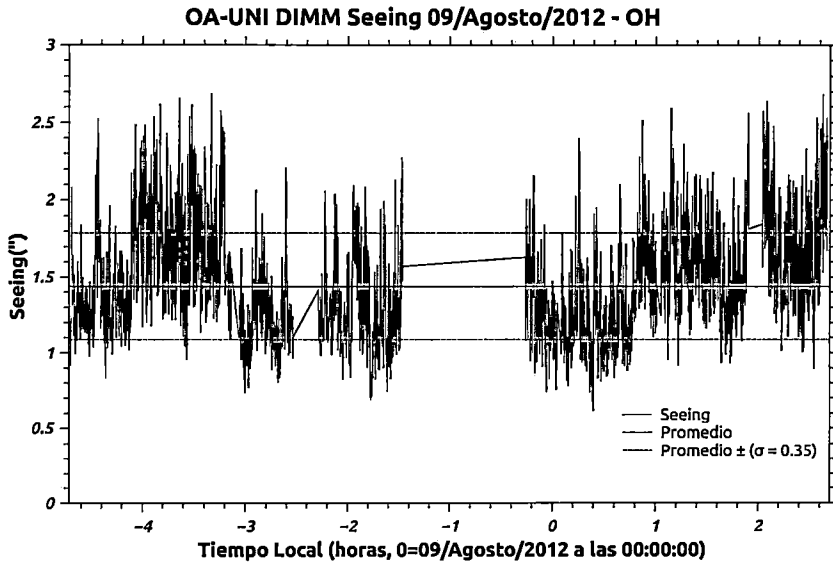


Figura 2.20: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 09/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

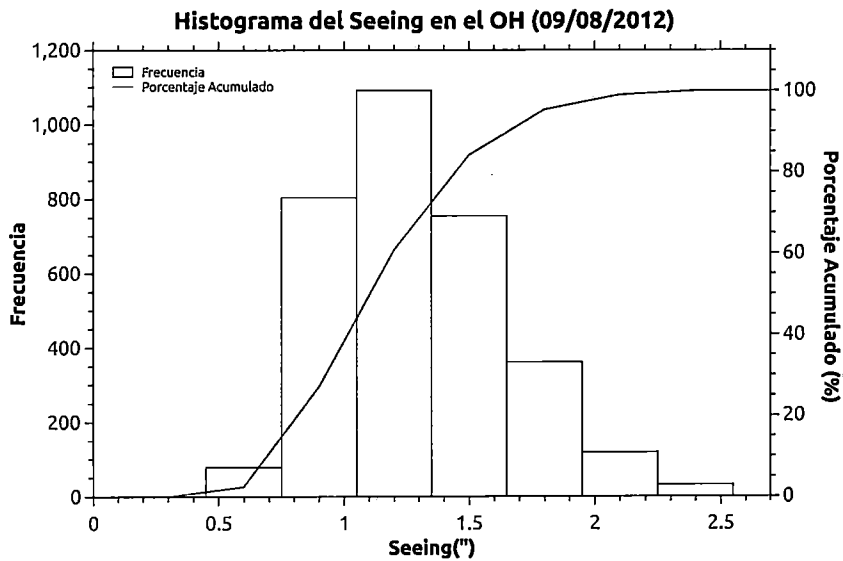


Figura 2.21: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 09/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

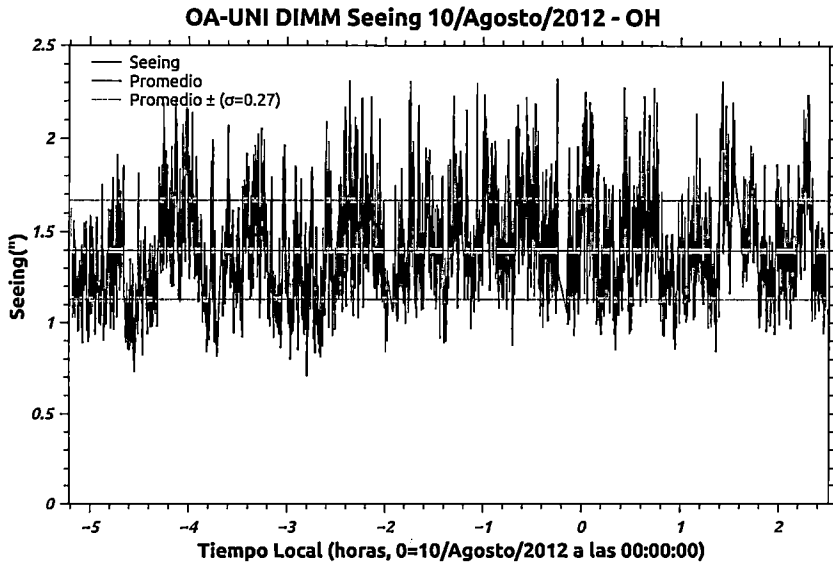


Figura 2.22: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 10/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

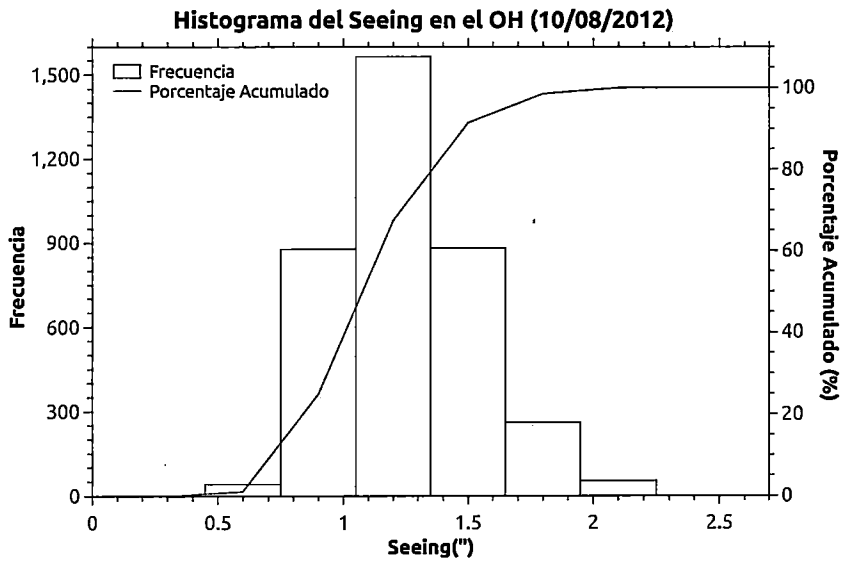


Figura 2.23: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 10/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

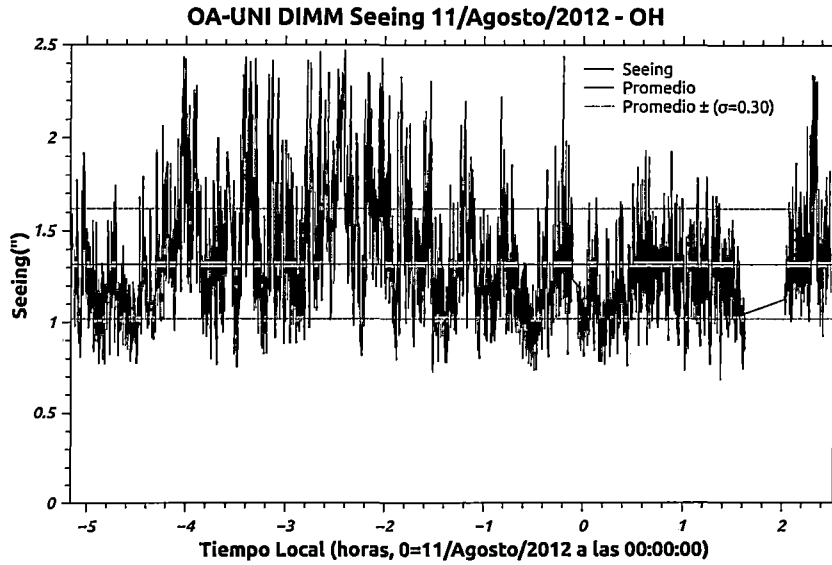


Figura 2.24: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 11/08/2012 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

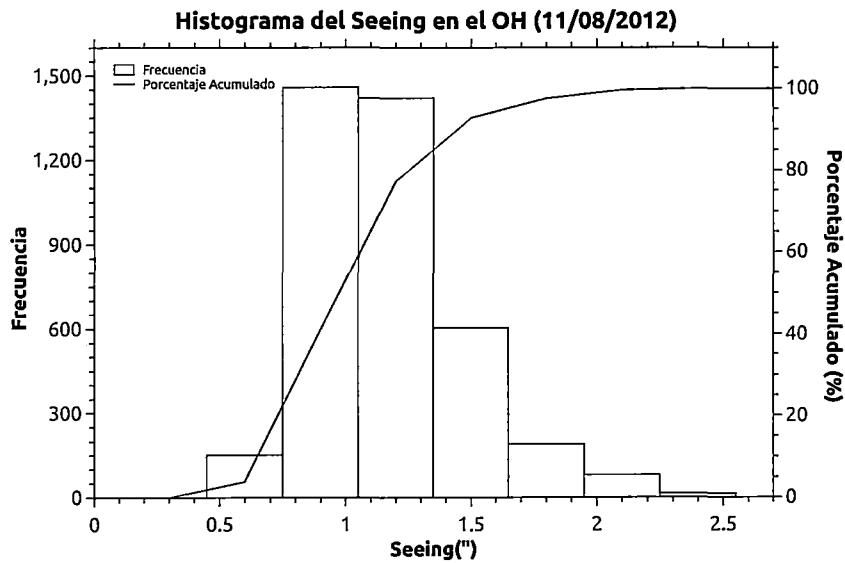


Figura 2.25: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 11/08/2012 en el OH con el OA-UNI DIMM.

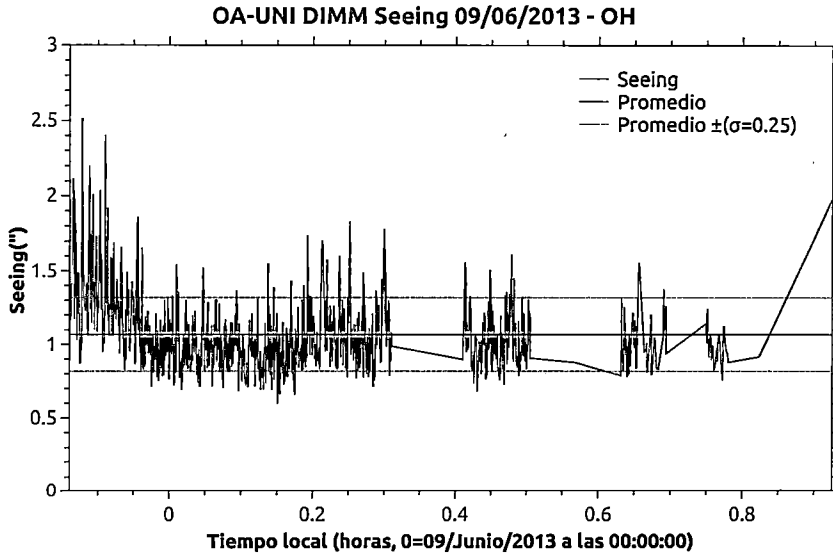


Figura 2.26: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 09/06/2013 en el OH. Las curvas como en la fig.2.12.

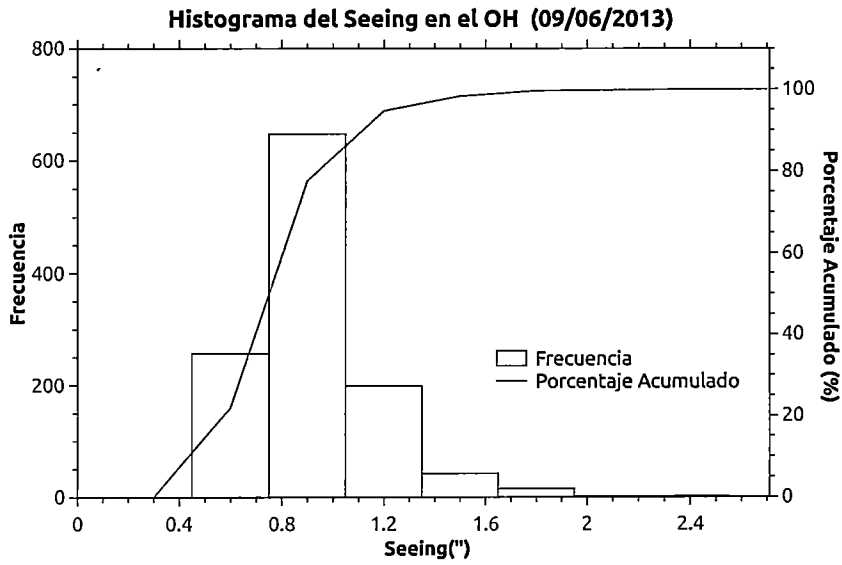


Figura 2.27: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 09/06/2013 en el OH con el OA-UNI DIMM.

Tabla 2.6: Log de observaciones de seeing con OA-UNI DIMM en el OH (09/junio/2013).

Noche	Periodo (horas)	Muestra	Seeing(")						
			promedio	mediana	desviación estándar	min	<0.5" (%)	<1.0" (%)	<1.5" (%)
09	3	1164	1.07	1.02	0.23	0.6	0	44.9	94.84

2.10. Observaciones en Patacancha - Cusco

La figura 2.28 muestra los lugares cercanos al proyecto “Observatorio para el Perú - OPP (Pachatusan) en Cusco” (Quintanilla et al. 2011): la comunidad de Patacancha (distrito de Oropesa) y la comunidad de Huacoto (distrito de San Jerónimo). Estos lugares cuentan con facilidades logísticas como carretera y electricidad. Sin embargo, la comunidad de Patacancha fue elegida para realizar medidas de *seeing* con el OA-UNI DIMM, por ser la más cercana al lugar del proyecto OPP y por contar con las facilidades logísticas antes mencionadas. Imágenes de esta misión se pueden observar en el Apéndice B.

En esta oportunidad el telescopio C8 fue montado sobre su montura ecuatorial, la cual, a su vez se montó en un pilar previamente construido. Una laptop con procesador tipo Cori5 controló el uso de la cámara CCD. Las condiciones atmosféricas durante la hora de observación fueron buenas, sin embargo, fue necesario parar la observación debido a la condensación de agua en la superficie del telescopio. La estrella observada con el OA-UNI DIMM fue Antares (α Sco) con $V = 0,91$ y AR (J2000) 16:29:24.46, dec(J2000) -26:25:55.21.

2.10.1. Resultados de las medidas de SEEING en Patacancha - Cusco

La tabla 2.8 muestra los resultados de las observaciones realizadas con el OA-UNI DIMM en Patacancha el 01 de Junio del 2013. Se muestra el periodo observado (en horas) de esa noche, así como el número efectivo de medidas de seeing obtenidas. Finalmente, la estadística del *seeing* es calculada para esa noche que incluye el promedio, la mediana y la desviación



Figura 2.28: Ubicación geográfica de Patacancha, la comunidad de Huacoto y el lugar del proyecto del Observatorio Pachatusan.

Tabla 2.7: Posiciones Geográficas de Patacancha y Huacoto

Lugar	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
Patacancha	13°33'04" S	71°48'05" O	3879
Patacancha (parte baja)	13°33'18.34" S	71°48'31.21" O	3739
Huacoto	13°30'50.81" S	71°51'33.71" O	4080
Pachatusan	13°33'0.00" S	71°45'41.0" O	4335

Fuente: Google Earth.

Tabla 2.8: Log de observaciones de seeing con OA-UNI DIMM en Patacancha (01/Junio/2013).

Noche	Periodo (horas)	Muestra	Seeing(")						
			promedio	mediana	desviación estándar	min	<0.5"(%)	<1.0"(%)	<1.5"(%)
01	3	4675	0.52	0.50	0.10	0.26	48.5	100	100

estándar. El valor mínimo obtenido también está incluido. Las figuras 2.29 y 2.30 muestran los valores de *seeing* y su respectivo histograma computado durante esta observación. Las medidas de Patacancha muestran un *seeing* promedio bastante óptimo en comparación con las medidas obtenidas en el OH un año antes. La excelente calidad del cielo de Patacancha debe ser confirmada con medidas futuras durante varios periodos estacionales. Esto para descartar una posible sobrevaloración del *seeing* debido a una medida esporádica.

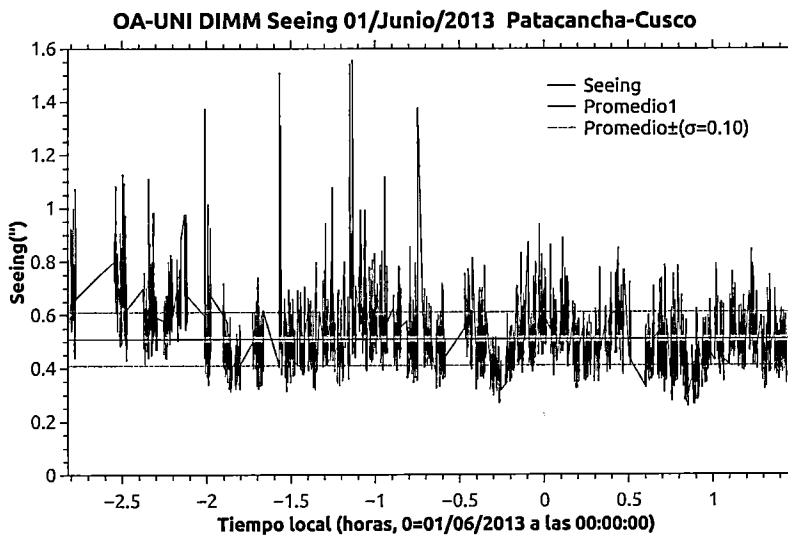


Figura 2.29: Gráfico de Seeing vs Tiempo Local con el OA-UNI DIMM para el 01/06/2013 en Patacancha. Las curvas como en la fig.2.12.

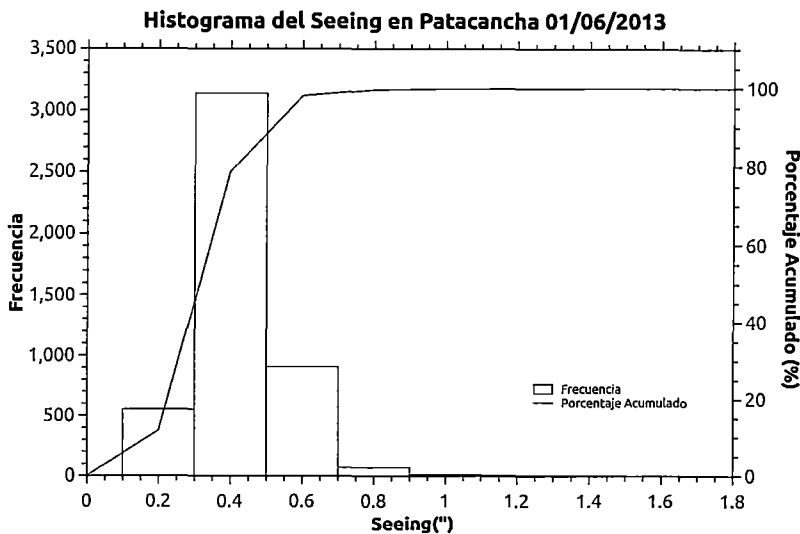


Figura 2.30: Histograma de los valores de Seeing para la noche del 01/06/2013 en en Patacancha con el OA-UNI DIMM.

2.11. Conclusiones

En esta tesis, se realizaron las primeras medidas de *seeing* con el OA-UNI DIMM usando la técnica de monitoreo de movimiento diferencial de imagen en el OH. El dispositivo óptico respondió a las expectativas de manera satisfactoria. Fue monitoreado el *seeing* durante siete noches consecutivas en el OH cubriendo en promedio intervalos de 6-7 horas en cada noche. El valor promedio durante las noches monitoreadas fue de $1.34'' \pm 0.33''$. El mejor valor promedio de *seeing* obtenido para una única noche fue de $1.03'' \pm 0.21''$, en la segunda jornada de observación. Buenos valores de *seeing* ($<1''$) fueron medidos en 14% del tiempo monitoreado. Por otro lado, valores razonables de *seeing* ($<1.5''$) estuvieron presentes en 71% del tiempo observado.

A modo de comparación, los valores de *seeing* promedios en los mejores sitios de observación del planeta (Chile, Hawai, Islas Canarias) se encuentran entre $0.5\text{-}0.8''$. Con esto, las medidas presentadas en este trabajo califican al OH como un sitio con un cielo de mediana

calidad para observaciones astronómicas. En particular, encontramos evidencias de variación del *seeing* en la época de seca en el OH entre los meses de Junio y Agosto, a raíz de la misión extra de Junio del 2013. Con todo, medidas adicionales son necesarias para cuantificar mejor la variación estacional del *seeing* en el OH.

Adicionalmente, se realizó una misión observacional con el OA-UNI DIMM a la comunidad de Patacancha-Cusco. Los resultados de Patacancha merecen ser destacados pues se obtuvo un valor promedio de *seeing* de $0.52 \pm 0.10''$ y muy buenos valores de *seeing* ($<0.5''$) fueron medidos en 48.5% del tiempo monitoreado. Igualmente, medidas adicionales son necesarias para verificar los buenos valores de *seeing* de Patacancha.

Capítulo 3

Observaciones de Ocultaciones Estelares por Cuerpos del Sistema Solar

3.1. Introducción

El estudio de los TNO's está íntimamente ligado al estudio del Sistema Solar. La evolución dinámica pudo haber dejado huellas en la disposición de sus actuales órbitas, densidad y distribución de masa de estos cuerpos. Los elementos primordiales de la nube protoplanetaria también pueden haber sido preservados por estos objetos y son fundamentales para entender las condiciones iniciales del conjunto. Así, es necesario conocer las propiedades físicas, como tamaño, densidad, albedo y composición de estos objetos (Barucci 2008).

Uno de los parámetros físicos fundamentales es el tamaño de cada objeto; sin embargo, como estos objetos pequeños están a más de 30 UA (Unidades Astronómicas¹) del Sol, no hay telescopio que consiga resolverlos a través de imagen directa (Braga-Ribas et al. 2013).

Utilizando la técnica de ocultaciones estelares, que consiste en observar al TNO y/o asteroi-

¹1 UA = 150 000 000 Km.

de cuando pasa delante de una estrella, se busca determinar los tamaños (Sicardy et al. 2011), formas y/o anillos (Braga-Ribas et al. 2014) de estos cuerpos, con una precisión del orden de kilómetros. Adicionalmente, se puede determinar sus densidades y albedos con gran precisión.

En este trabajo se muestra el procedimiento de las observaciones de las ocultaciones de algunos asteroides y TNOs entre ellos Plutón.

3.2. Ocultaciones Estelares

Una ocultación estelar es un evento en el cual un cuerpo menor del Sistema Solar pasa por delante de una estrella. Este fenómeno es semejante a los eclipses de Sol y su efecto es producir una sombra del cuerpo menor en la Tierra. Mientras el cuerpo se mueve a través del cielo, su sombra se mueve a través de la superficie terrestre. Con esto se crea lo que se conoce como "camino de sombra" de la ocultación.

Una ocultación típica sólo puede ser observada desde aquellos puntos en la superficie terrestre por los cuales pasa la sombra del cuerpo. Para cuerpos sólidos con o sin atmósfera, tipo TNO's o asteroides, la duración precisa del fenómeno, observado en diferentes lugares, permite deducir su tamaño y forma con precisión del orden de algunos kilómetros. Un ejemplo de esto lo observamos en la figura 3.1, donde la observación de la ocultación estelar por el Planeta Enano Eris, y la medida de su duración, ha permitido a los astrónomos medir por primera vez el tamaño de Eris con gran precisión (Sicardy et al 2011).

La observación de una ocultación estelar por un asteroide permite al observador obtener importante información sobre los objetos observados, basada en el tiempo que dura la ocultación y en la capacidad del observador de registrar este tiempo. Los detalles del evento, como por ejemplo, el tiempo que tomó a la estrella desaparecer (o disminuir su brillo) o

reaparecer (o recuperar su brillo), pueden dar información sobre la dualidad de la estrella e incluso revelar las dimensiones de una estrella recién descubierta. El tiempo total que dura la ocultación provee mucha información sobre la forma y tamaño del cuerpo menor. Esto último es realmente importante, ya que la otra forma de hacer esto es fotografiando directamente estos cuerpos (usualmente con fotografías enviadas desde sondas espaciales).

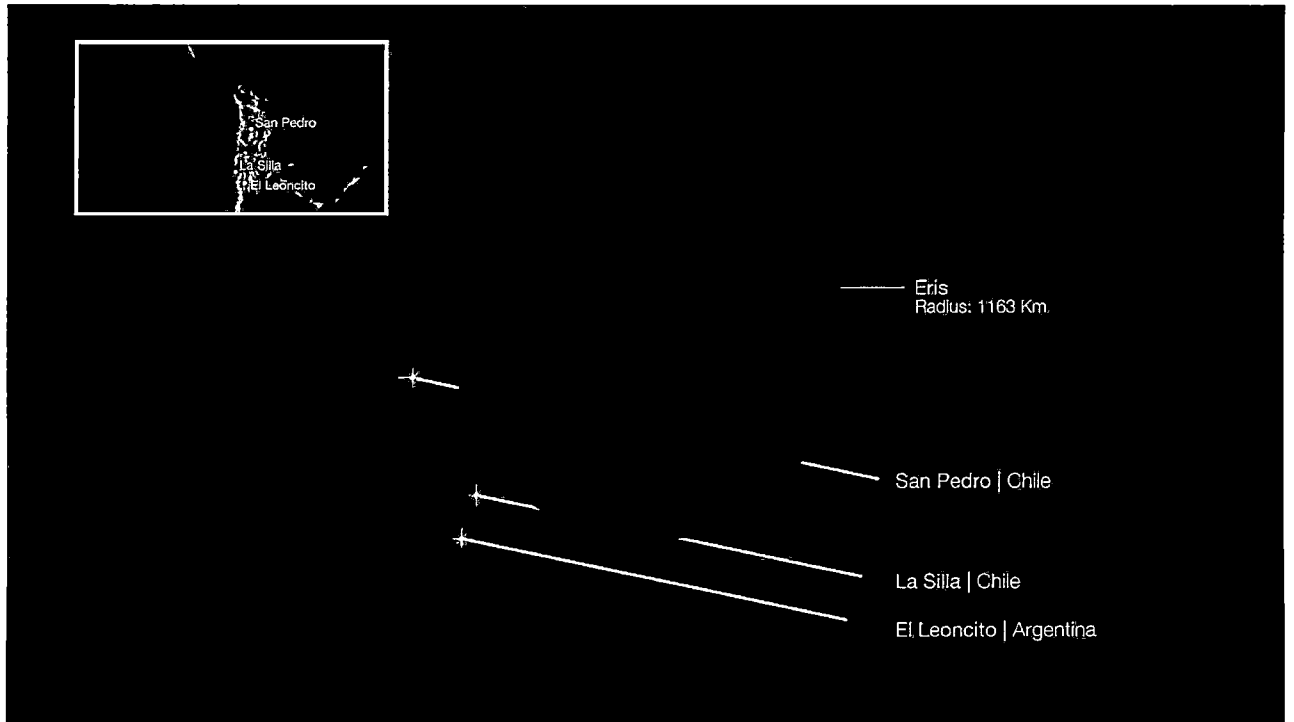


Figura 3.1: Este diagrama muestra la trayectoria de la sombra de del Planeta Enano Eris al pasar frente a una estrella de brillo muy débil (noviembre del 2010). Dos sitios en América del Sur vieron desaparecer brevemente la luz de la estrella que era bloqueada por Eris y un tercer lugar no registró ningún cambio en el brillo. Sorprendentemente, parece que Eris es casi exactamente del mismo tamaño que Plutón y posee una superficie muy reflectante. Créditos: ESO/L. Calçada.

3.3. Predicciones de Ocultaciones

3.3.1. Predicciones Iniciales

Las predicciones de las ocultaciones estelares (ver fig. 3.2) por pequeños cuerpos del Sistema Solar, consisten esencialmente en comparar la posición predicha de un objeto en un instante dado con la posición de estrellas que coincidan con su paso sobre la bóveda celeste. Las posiciones de los cuerpos menores, como los asteroides, pueden ser obtenidas de bases de datos como el MPCORB del *Minor Planet Center*. Por otro lado las posiciones de las estrellas que van a ser ocultadas pueden ser extraídas de bases de datos como VizieR (Ochsenbein et al. 2000), donde decenas de catálogos estelares proporcionan posiciones astrométricas para estrellas de todo el cielo. Entre estos catálogos podemos destacar: HIPPARCOS (Perryman et al. 1997), TYCHO-2 (Hog et al. 2000), 2MASS (Skrutskie et al. 2006), USNO B1.0 (Monet et al. 2003), UCAC2 (Zacharias et al. 2004) y, UCAC4 (Zacharias et al. 2013).

De lo anterior, si las posiciones estelares y del objeto coinciden, entonces, ocurrirá una ocultación. Muchos detalles y a veces dificultades están presentes en este proceso. Para mayores detalles el lector puede consultar Assafin et al. (2010, 2012).

3.3.2. Predicciones de último minuto - Actualizaciones

Las predicciones en muchos casos necesitan ser actualizadas (ver figuras 3.3 y 3.4) ya que son realizadas con muchos años o meses de antelación. Así, se hace necesario realizar una corrección debido al movimiento propio de la estrella para determinar su real posición. La mejor manera para obtener una medida precisa de la posición estelar es realizando observaciones astrométricas de la estrella en una época cercana al evento. De la misma manera, los objetos que producirán la ocultación (TNO's y asteroides) también necesitan de observaciones astrométricas próximos a la fecha del evento. Para el caso de TNO's, varios telescopios, como el 1m del Pic du Midi (OBSBPM/IMCCE), el 1.2m de Calar Alto (IAA), el 1.5m de

Pluto: Star WFI ES02p2, PLU21-DE413/BS

Offset (mas): -75.0 187.0

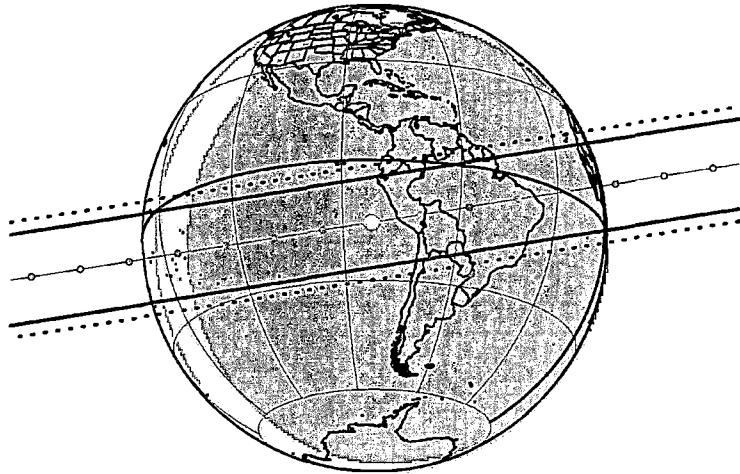


d	m	year	h:m:s UT	ra	dec	j2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
18	07	2012	04 13 45.	18 32	14.6748	-19 24 19.304	0.027	351.12	-22.54	31.30	14.8	11.0	-82.

Figura 3.2: Primera predicción de la Ocultación por Plutón en base al catálogo WFI. Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

Sierra Nevada, o los 1.6m y 0.6m del Observatorio Pico dos Dias (LNA), son utilizados por nuestros colaboradores en esta fase de las predicciones. Finalmente todas estas observaciones necesitan ser procesadas para calcular sus correcciones astrométricas. En nuestro caso, esto fue realizado utilizando la “Plataforma para Reducción Automática de Imágenes Astronómicas” (PRAIA) elaborada por el Grupo Rio (Assafin et al. 2011).

Pluto: Star Pic du Midi June, Buie-DE413/BS Offset (mas): -75.0 187.0



d	m	year	h:m:s	UT	ra	dec	J2000	candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long			
18	07	2012	04	14	58.	18	32	14.6693	-19	24	19.307	0.018	351.10	-22.56	31.30	14.8	11.0	-82.

Figura 3.3: Actualización astrométrica, observada por Fredic Vachier y François Colas en el Pic du Midi. Se observa la semejanza con la predicción realizada con el WFI. Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

Pluto: Star Pic du Midi June, Buie-DE413/BS

Offset (mas): -75.0 187.0



d	m	year	h:m:s UT	ra__dec__J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
18	07	2012	04 14 58.	18 32 14.6693 -19 24 19.307	0.018	351.10	-22.56	31.30	14.8	11.0	-82.

Figura 3.4: Actualización astrométrica observada en el Observatorio Pico dos Dias donde Bruno Sicardy obtuvo el offset de la última observación de ocultación por Plutón del 14 de junio del 2011. Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

3.4. Selección de Ocultaciones

Los grupos de observación de ocultaciones estelares generan centenares de mapas con los datos necesarios para las predicciones. Por lo tanto, es preciso seleccionar los eventos más favorables para ser observados. Los criterios para esta selección incluyen analizar factores como: el interés científico, la rareza del evento, la disponibilidad de la red de colaboradores y la viabilidad del clima. Todas las predicciones para TNO's están disponibles en el internet en la página web de Bruno Sicardy².

No es posible observar todos los eventos previstos, pues cada observación demanda un gran esfuerzo logístico en lo que respecta al desplazamiento del personal, la preparación de observadores, así como, de los telescopios e instrumentos. Esto se refleja en un costo económico de la operación no despreciable. La selección de los eventos más favorables es realizada al final de cada año para el año subsiguiente. En el caso de los TNO's, esta información está disponible en el internet de modo que los pedidos de tiempo puedan ser agenciados en los diferentes telescopios de la red de colaboración.

En este trabajo los objetos a observar fueron seleccionados de acuerdo a la disponibilidad de los telescopios y observadores, los cuales se muestran en la tabla 3.1. Como ejemplo, se puede apreciar en la figura 3.2 la predicción realizada para la ocultación por Pluton del 18 de julio del 2012, y en la figura 3.5 la predicción para la observación del asteroide (177) Irma (predicciones adicionales se encuentran en el Apéndice E).

3.5. Campañas de Observación de Ocultaciones

Cuando se realizan observaciones de verificación de efemérides de último minuto, y si las condiciones de la nueva predicción son favorables, una alerta es lanzada a los colaboradores

²//www.lesia.obspm.fr/perso/bruno-sicardy/

177 Irma occults TYC 1866-01429-1 on 2011 Sep 17 from 3h 3m to 3h 12m UT

Star:
 Mr = 10.8 Mp = 11.4 Mr = 10.5
 RA = 5 51 34.7846 (J2000)
 Dec = 24 51 57.488
 Iof Data: 5 52 19, 24 52 41
 Prediction of 2011 Aug 23.0

Max Duration = 3.6 secs
 Mag Drop = 3.2 (3.0r)
 Sun : Dist = 86 deg
 Moon: Dist = 42 deg
 : illum = 81 %
 E 0.023"x 0.023" in RA 90

Asteroid:
 Mag = 13.9
 Dia = 73km, 0.050"
 Parallax = 4.362"
 Hourly dRA = 3.656s
 dDec = 2.32"

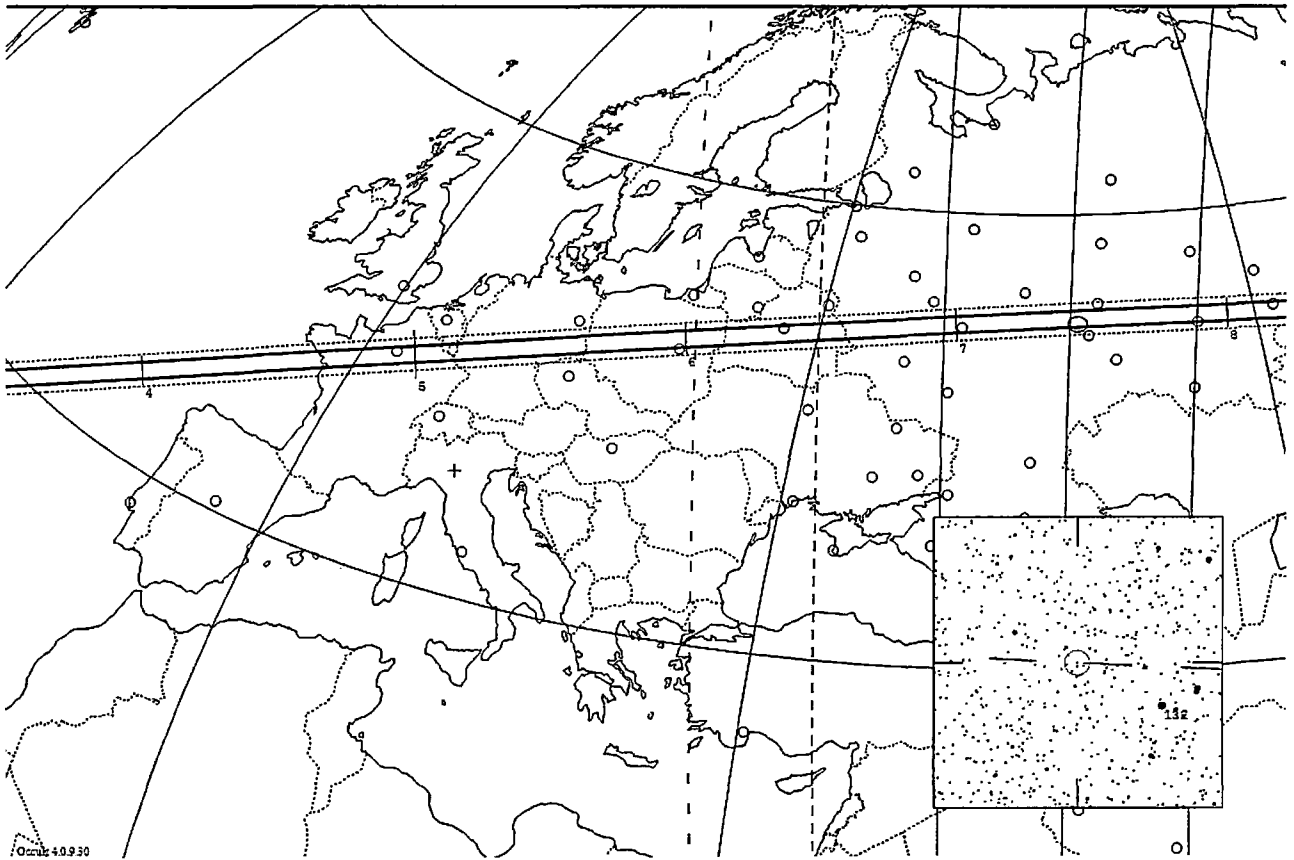


Figura 3.5: Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma. Créditos: Steven Preston.

Tabla 3.1: Resumen de las ocultaciones seleccionadas para observar.

Objeto	Tipo	Lugar de Observación	Tiempo Previsto(TU)
Helio	Asteroide	Observatorio Pic du Midi (Francia)	17 de Agosto del 2011.
(177) Irma	Asteroide	Observatorio de Paris-Meudon (Francia)	17 de Setiembre del 2011.
(177) Irma	Asteroide	Observatorio de Paris-Meudon (Francia)	03 de Octubre del 2011.
Link	Asteroide	Observatorio Pic du Midi (Francia)	13 de Octubre del 2011.
Plutón	TNO	Huayao (Perú)	12 de Julio del 2012.
Zelinda	Asteroide	Planetario Cusco (Perú)	21 de Mayo del 2013.
2002 TC302	TNO	Estacion Solar de Ica (Perú)	10 de Octubre del 2013.
1995 GO Asbolus	TNO	Huayao (Perú)	24 Noviembre del 2013.

en el caso de TNO's. La página de Felipe Braga³ fue consultada para las observaciones en este trabajo. A modo de ejemplo, en el Apéndice F mostramos los llamados para las campañas de las observaciones positivas para las ocultaciones de (177) Irma⁴ y Plutón⁵.

3.6. Observaciones de Ocultaciones Estelares

Teniendo las actualizaciones favorables para las ocultaciones (ver tabla 3.1), y la disponibilidad de telescopios y observadores, se realizaron las observaciones desde los lugares cuyas coordenadas se pueden ver en la tabla 3.2. Imágenes de estas observaciones se pueden ver en el Apéndice C.

El sistema de detección utilizado en todas las observaciones de la tabla 3.2 fue el mismo y está indicado a continuación (ver figura 3.6):

- 1) 01 cámara rápida Watec 120N+.
- 2) 01 Laptop DELL Latitude E6420.

³[//devel2.linea.gov.br/braga.ribas/campaigns/](http://devel2.linea.gov.br/braga.ribas/campaigns/)

⁴[//www.iota-es.de/stmap5.html](http://www.iota-es.de/stmap5.html)

⁵[//www.lesia.obspm.fr/perso/braga-ribas/campaigns/2012-07-18pluto.html](http://www.lesia.obspm.fr/perso/braga-ribas/campaigns/2012-07-18pluto.html)

Tabla 3.2: Posiciones Geográficas de los lugares de observación de las ocultaciones.

Lugar	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Telescopios utilizados
Observatorio Pic du Midi (FR)	42°56'11" N	00°08'34" E	2800	1 y 0.30 m
Observatorio de Paris-Meudon (FR)	48°48'36" N	02°13'40" E	167	1 m
Huancayo (PE)	12°02'12" S	75°19'07" O	3350	0.20 m
Estación Solar de Ica (PE)	14°05'21" S	75°44'12" O	400	0.60 m
Planetario Cusco (PE)	13°30'24" S	71°59'09" O	3562	0.27 m

Fuente: Google Earth.

- 3) 01 GPS Garmin.
- 4) 01 ADC Pinnacle Dazzle.
- 5) 01 Insertador de tiempo.

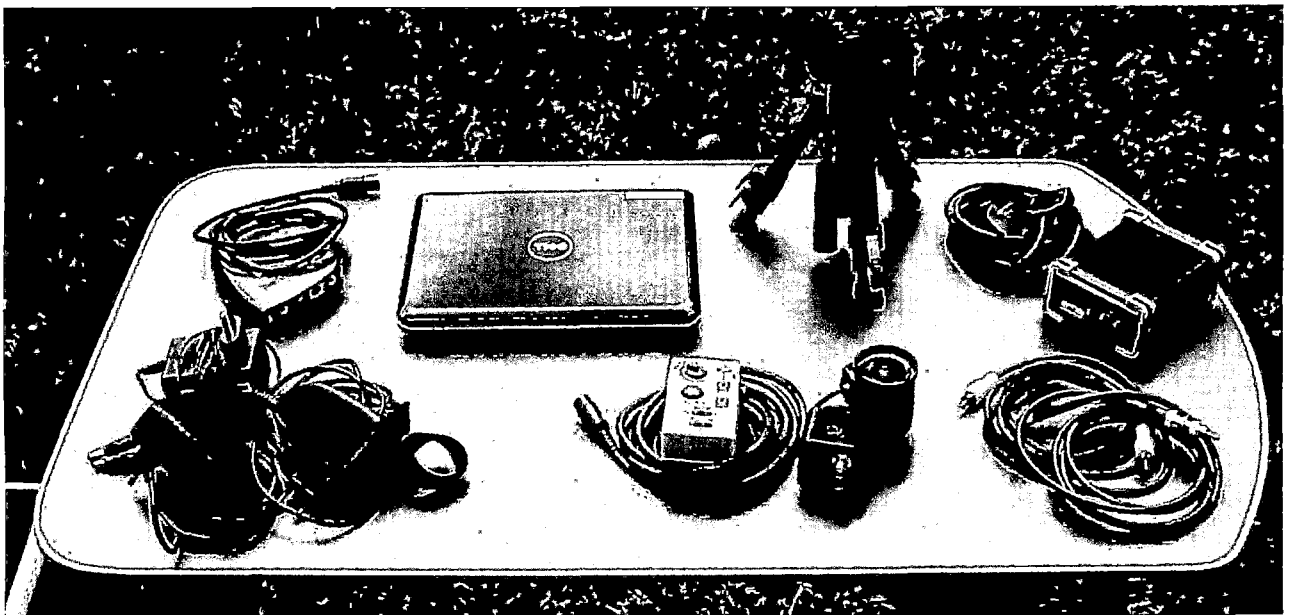


Figura 3.6: Sistema utilizado para la observación de ocultaciones estelares.

Tabla 3.3: Resumen de los Resultados de las Observaciones de Ocultaciones.

Objeto	Tipo	Lugar de Observación	Resultado
Helio	Asteroide	Observatorio Pic du Midi (Francia)	Negativo
(177) Irma	Asteroide	Observatorio de Paris-Meudon (Francia)	Positivo
(177) Irma	Asteroide	Observatorio de Paris-Meudon (Francia)	Negativo
Link	Asteroide	Observatorio Pic du Midi (Francia)	Negativo
Plutón	TNO	Huayao (Perú)	Positivo
Zelinda	Asteroide	Planetario Cusco (Perú)	Negativo
2002 TC302	TNO	Estacion Solar de Ica (Perú)	Negativo
1995 GO Asbolus	TNO	Huayao (Perú)	Negativo

3.7. Resultados

La tabla 3.3 muestra el resumen de los resultados de las observaciones de las ocultaciones realizadas en los diferentes lugares mostrados en la tabla 3.2. Podemos notar que de 8 observaciones realizadas, en sólo dos casos se registraron ocultaciones positivas. De todas las observaciones negativas, sólo una fue por causa de problemas técnicos y en dos casos por factores climáticos. En el resto, se trataron de ocultaciones negativas reales, es decir, no se detectó variación del flujo de la estrella. A continuación relatamos los resultados de las ocultaciones positivas.

3.7.1. Resultados de la Ocultación por (177) Irma

En la figura 3.7 se muestra la ocultación del asteroide (177) Irma ocurrida el 17 de setiembre del 2011 (UT) y observada por nosotros desde el Observatorio de Meudon (Francia) con el telescopio de 1m. Podemos notar que la duración de la interrupción de la señal es 1.375 ± 0.010 seg. causada por la ocultación de la estrella TYC 1866-01429-1 de magnitud visual 10.8. También se muestra la estabilidad de la estrella de referencia usada como comparación, así como, el flujo integrado de Irma y la estrella de comparación. El flujo constante de la estrella de comparación durante el evento nos indica que la ocultación es real y la dismi-

nución del flujo no es debido al paso de nubes o problemas electrónicos del detector. Esta observación se constituyó en la primera ocultación estelar positiva para el autor.

3.7.2. Resultados de la Ocultación por Plutón

En la figura 3.8 se muestra la curva de luz de la ocultación por Plutón ocurrida el 18 de Julio del 2012 (UT) y observada desde el Observatorio de Huancayo (Perú) con el telescopio de 20cm (C8) del Grupo Astronomía (FC-UNI). El tiempo central de la ocultación ocurrió aproximadamente a las 04:13:02 UT y duró aproximadamente 60 seg. En esta observación se utilizaron tiempos de integración típicos de 5.12 y 10.24 seg. por medida individual. En particular, durante la ocultación por Plutón el tiempo menor de integración fue utilizado para intentar mejorar la resolución temporal del evento. Antes y después del evento, el tiempo mayor de integración permitió contrarrestar las condiciones observacionales menos favorables (paso de nubes). Esta observación se constituyó en la primera ocultación estelar positiva dentro del territorio peruano, a nuestro conocimiento.

3.8. Discusiones

En este trabajo todas las curvas de luz fueron obtenidas utilizando la técnica de fotometría diferencial, en la cual, es necesaria una o varias estrellas de comparación además de la fuente a analizar. El proceso de reducción ha sido realizado utilizando el programa de reducción de imágenes astronómicas IRAF⁶ para el caso (177) Irma. Por otro lado, para la reducción de los datos de la ocultación por Plutón se utilizó el programa personal del Dr. Françoise Colas (IMMCE⁷ – Francia). Particular cuidado se tuvo en editar apropiadamente las imágenes de (177) Irma de modo a insertar de manera apropiada el tiempo medio de observación generado por el insertador de tiempo GPS.

⁶IRAF - Image Reduction and Analysis Facility - <http://iraf.noao.edu/>

⁷Institut de mecanique celeste et de calcul des ephemerides - <http://www.imcce.fr/>

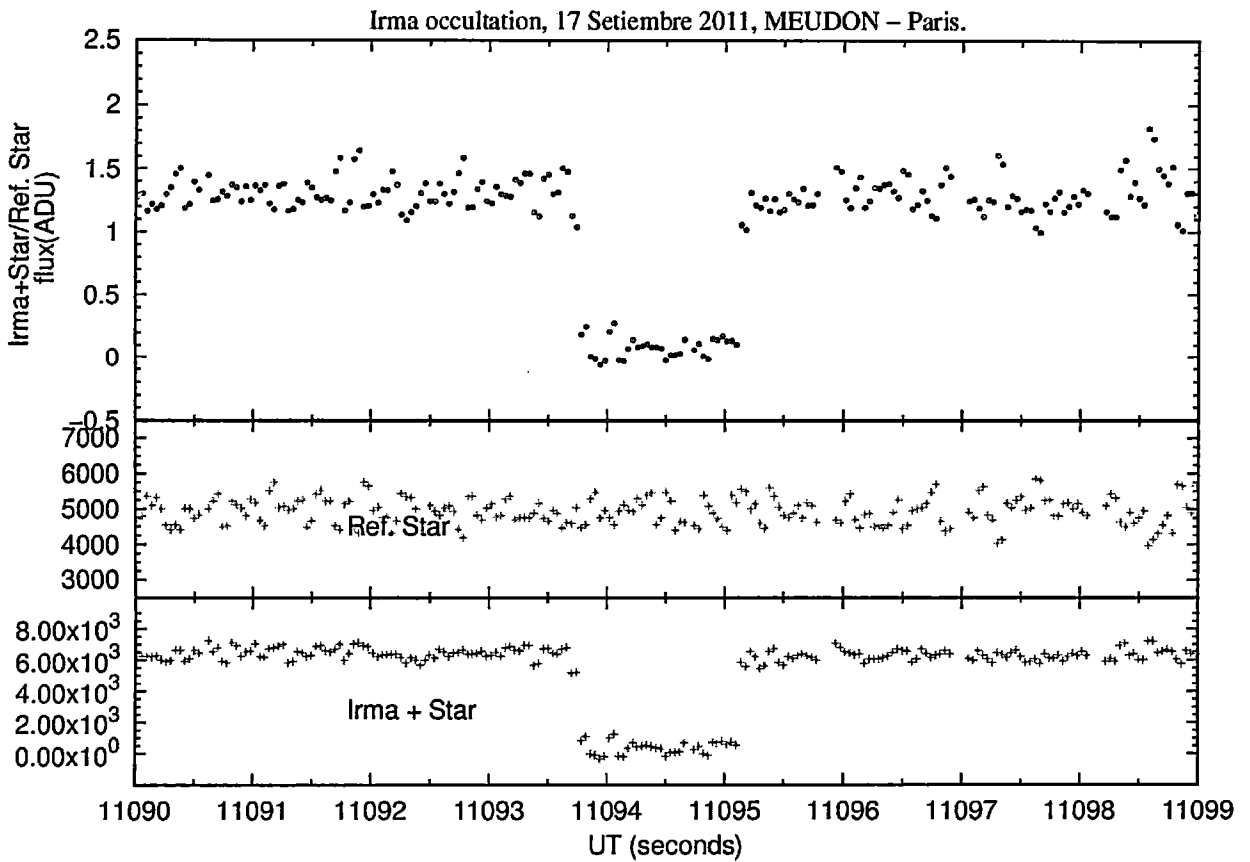


Figura 3.7: Ocultación de (177) Irma ocurrida el 17 de setiembre del 2011 (UT) y observada desde el Observatorio de Meudon (Francia) con el telescopio de 1m. En rojo, se puede observar la interrupción de la señal de aproximadamente 1.5 segundos causada por la ocultación de la estrella por Irma. En verde, la señal de control de una estrella cercana mostrando que la interrupción no es causada, por ejemplo, por el paso de nubes o un problema electrónico. Créditos: Erick Meza & Jean Lecacheux.

Occultation of a $V=15.2$ star by PLUTO
from Huancayo (Peru) by Erick Meza
on 2012 July 18
20-cm scope, Watec 120N+, 5.12 & 10.24 s

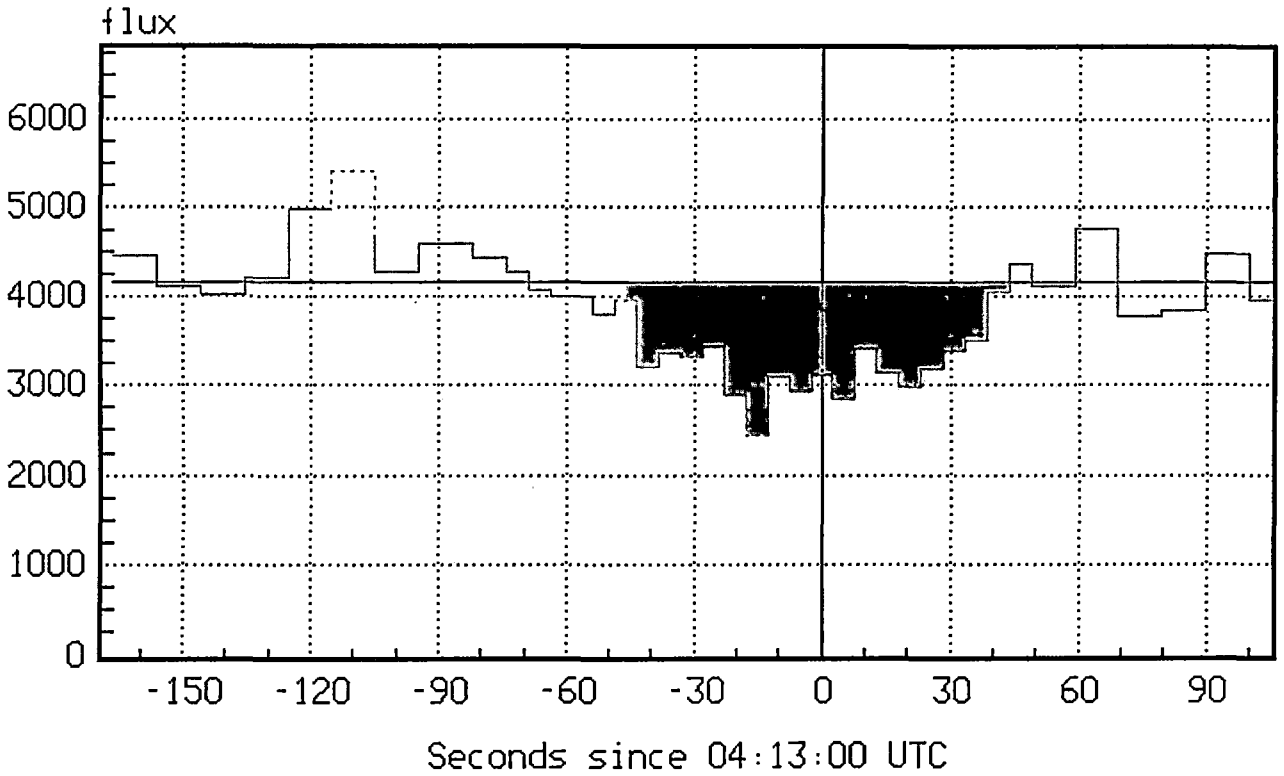


Figura 3.8: Ocultación por Plutón ocurrida el 18 de julio del 2012 (UT) y observada desde el Observatorio de Huancayo (Perú) con el telescopio de 20cm del Grupo Astronomía (FC-UNI). La parte sombreada muestra la interrupción de la señal causada por la ocultación de la estrella por Plutón. Finalmente, la hora central de la ocultación es 04:13:02 UT. Créditos: Erick Meza & Jean Lecacheux.

3.8.1. Ocultación por (177) Irma

Cuatro observaciones simultáneas fueron programadas para registrar este evento. De éstas, 2 resultaron positivas y 2 negativas. Debido al hecho de que sólo se tienen 2 resultados positivos, no es posible medir el tamaño del asteroide Irma (ver figura 3.9). Esto porque para modelar un elipsoide son necesarios por lo menos tres medidas diferentes. Esta medida es una de las pocas medidas registradas para el asteroide (177) Irma. Observaciones anteriores fueron realizadas el 23 de octubre del 2006 y el 13 de setiembre del 2011, ambas realizadas por otros observadores.

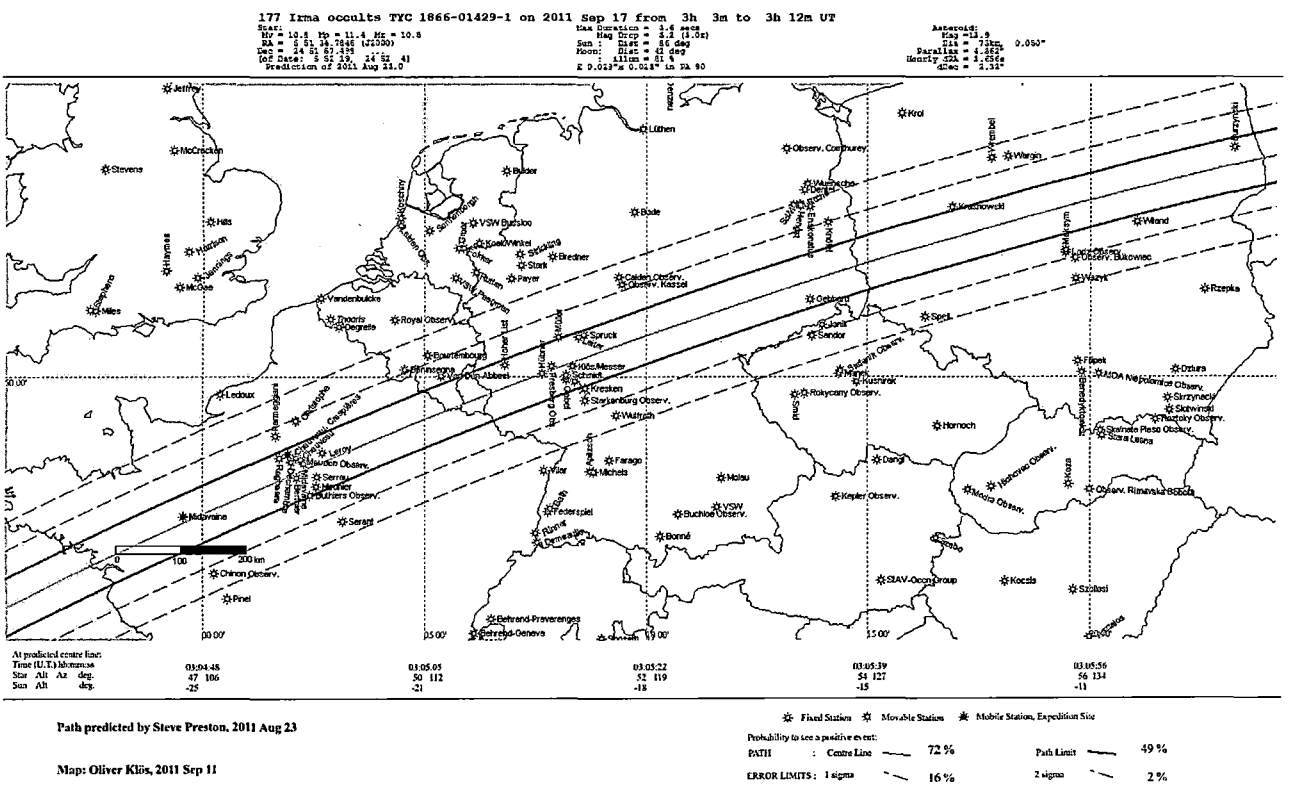


Figura 3.9: En verde: Observatorios donde se realizaron las observaciones de la ocultación por (177) Irma el 17 de setiembre 2011 (UT).

Créditos: Steven Preston & Oliver Kloss.

3.8.2. Ocultación por Plutón

De los 10 observatorios envueltos en la campaña de la ocultación de Plutón, cinco de ellos, distribuidos en Perú, Chile y Argentina, lograron observar el momento preciso de la ocultación (ver figura 3.10). En particular, este evento fue observado en Cerro Paranal (Chile), utilizando el telescopio Very Large Telescope (VLT) de 8.2m de diámetro. Este último es una facilidad astronómica del Observatorio Europeo Austral (ESO). Los detalles de esta campaña de observación están disponibles en la web⁸ (ver apéndice G). En particular, la figura 3.10 muestra una observación días antes del evento realizada por el autor desde el OH, donde se muestra el acercamiento de Plutón a la estrella a ser ocultada. Nuestra medida positiva, junto con las de los otros observatorios, fue incluida en el reporte de esta ocultación elaborado por nuestro colaborador Alex de Oliveira y presentada en la *The Pluto System on the Eve of Exploration by New Horizons: Perspectives and Predictions* realizada en Maryland en Julio del 2013.

3.8.3. Perspectivas

La experiencia observacional adquirida en las ocultaciones estelares permitirá que en el futuro se pueda repetir estas observaciones en el territorio peruano. En este sentido, esfuerzos se vienen realizando por dotar a la Facultad de Ciencias de la UNI de facilidades astronómicas observacionales. En particular, el proyecto del Observatorio Astronómico de la UNI, que incluirá un telescopio robótico Ritchey-Chretien de 50cm de apertura, podrá incluir dentro de sus programas observacionales, medidas rutinarias de ocultaciones estelares. El proyecto del OA-UNI ha completado actualmente su etapa de pre-comisionamiento (ver Apéndice D).

⁸http://www.lesia.obspm.fr/perso/bruno-sicardy/predic_ccn12/Pluto_18jul12/index.html



Figura 3.10: En verde: Observatorios donde se realizaron las observaciones de la ocultación por Plutón el 18 de julio 2012 (UT).
Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

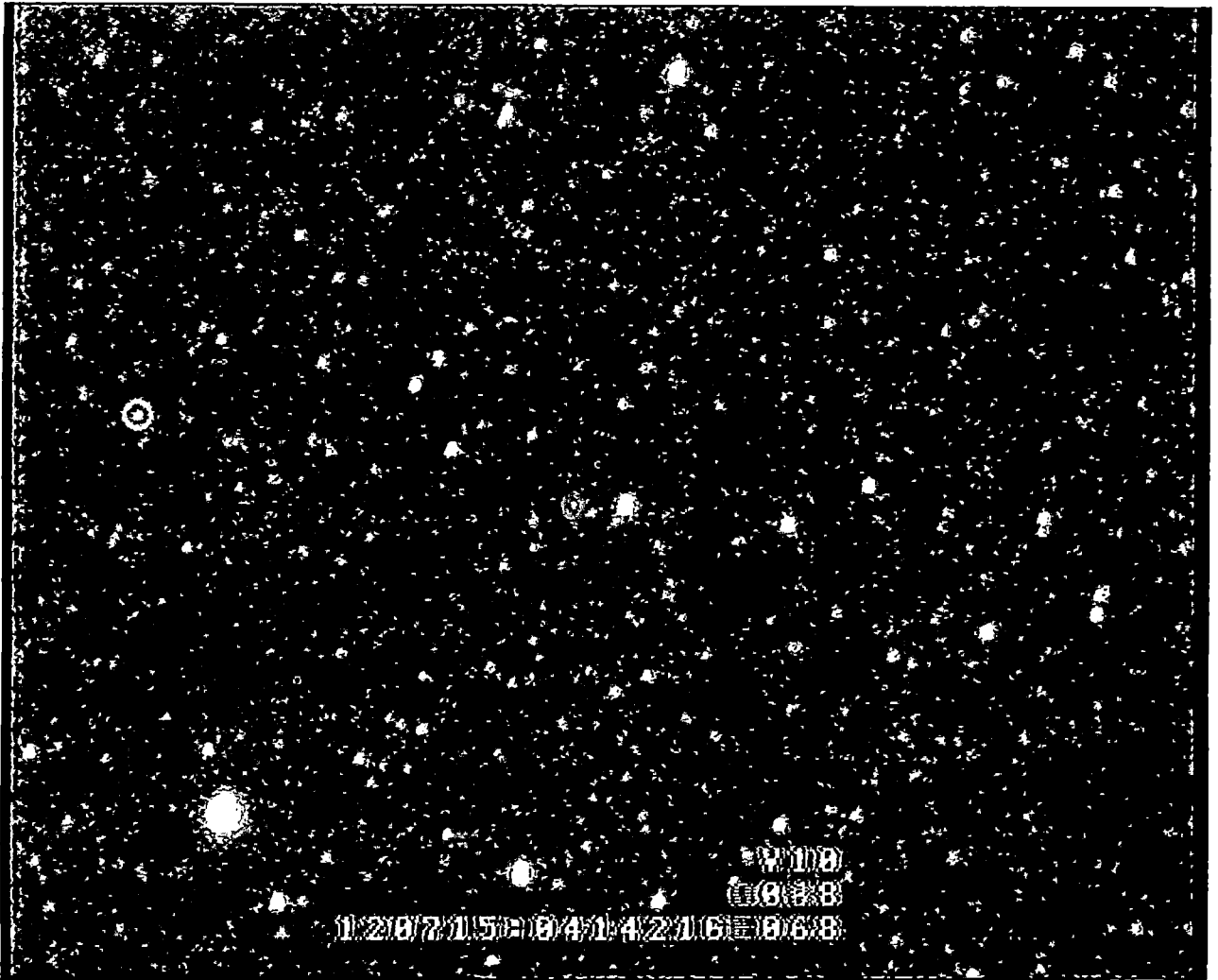


Figura 3.11: En verde, Plutón. En rojo, la estrella a ser ocultada. Ambos objetos celestes fueron observados por el autor el 15 de julio 2012 (UT) desde el OH, durante observaciones previas a la ocultación por Plutón del 18 de Julio 2012.

3.9. Conclusiones

Se observaron 8 ocultaciones estelares por diversos cuerpos del Sistema Solar, de las cuales 4 fueron observados en Observatorio Franceses como Pic du Midi y Meudon; dos desde el Observatorio de Huancayo; una desde la Estación Solar de Ica y una desde el Planetario Cusco. De las 8 observaciones, 2 resultaron positivas.

El tiempo de la duración de la ocultación por (177) Irma desde el Observatorio de Meudon con el telescopio de 1m fue de 1.375 ± 0.010 segundos. Esta experiencia sirvió para adquirir las competencias para la observación de ocultaciones. Así, el 18 de julio del 2012, desde el Observatorio de Huancayo con el telescopio de 0.2m del Grupo Astronomía FC-UNI se observó por primera vez desde el Perú la ocultación estelar por Plutón. Este evento fué simultáneamente observado por varios observatorios en Sudamérica, destacando la observación desde Cerro Paranal (Chile), que es una facilidad astronómica del Observatorio Europeo Austral (ESO), con el telescopio Very Large Telescope (VLT) de 8.2m de diámetro.

Es importante destacar la ocultación por Plutón desde Perú, pues los datos de la curva de ocultación registrados en el Observatorio de Huancayo servirán de complemento para la investigación que viene desarrollando LESIA sobre Plutón.

Finalmente, adquirida la experiencia en la observación de este tipo de eventos, será posible realizar observaciones de TNO's desde Perú. Esto abre nuevas posibilidades de programas observacionales para el futuro Observatorio Astronómico de la UNI que está por ser instalado en el OH. Así mismo, la continuación de las colaboraciones internacionales para futuras ocultaciones permitirá posicionar al Perú dentro de la redes internacionales de observación.

Apéndice A

Imágenes del OA-UNI DIMM en el OH



Figura A.1: OA-UNI DIMM en el OH. Se puede observar en la imagen el OA-UNI DIMM, el cuál esta acoplado al Astrógrafo del OH. Créditos: E. Meza



Figura A.2: En la imagen, el autor, al costado del OA-UNI DIMM durante las medidas del *seeing* con el OA-UNI DIMM en el OH.

Apéndice B

Imágenes del OA-UNI DIMM en Patacancha - Cusco

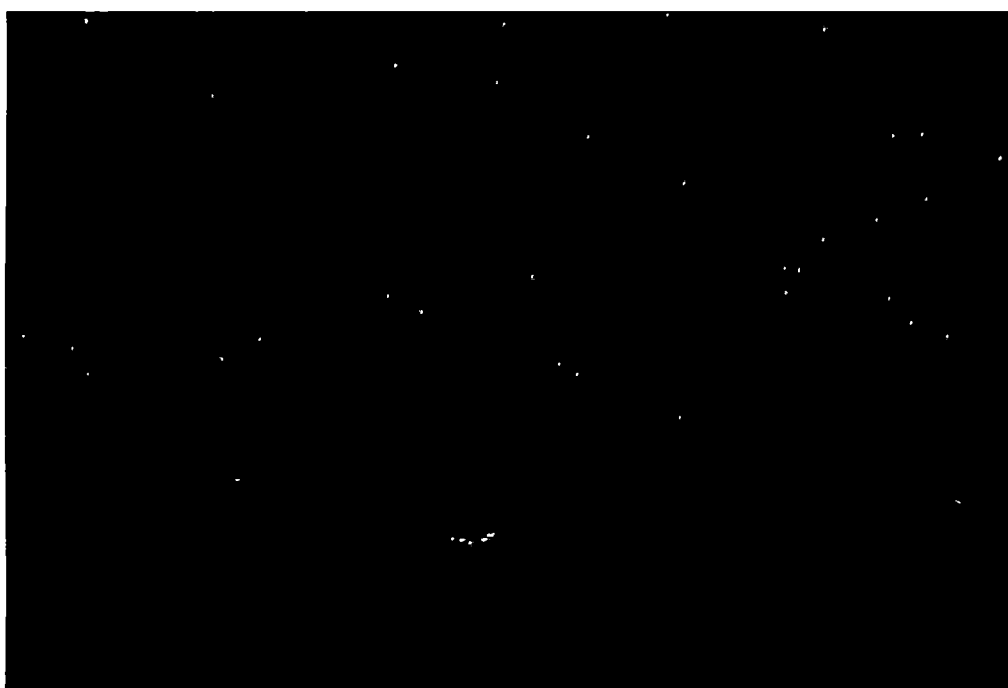


Figura B.1: En la imagen, la montaña Pachatusan vista desde la parte alta de la comunidad de Huacoto.



Figura B.2: En la imagen, se observa a G. Meza y el autor, construyendo un pilar para montar en telescopio C8 del GA de la FC-UNI con el objetivo de medir el *seeing* en la comunidad de Patacancha.



Figura B.3: En la imagen, el OA-UNI DIMM después de la noche de observación del seeing en la comunidad de Patacancha - Cusco.

Apéndice C

Imágenes durante las campañas de observación de Ocultaciones Estelares

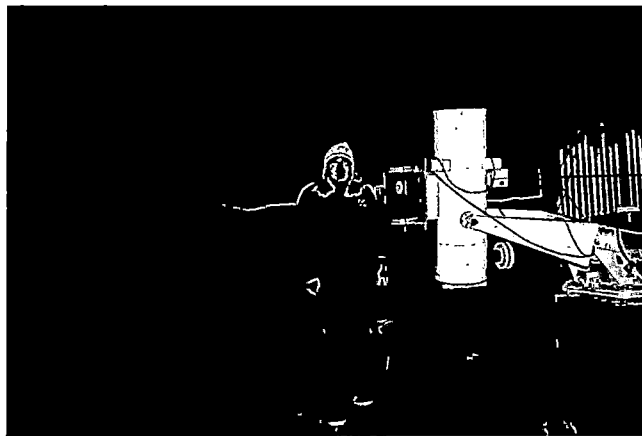


Figura C.1: El autor junto al C8, antes de la observación de la Ocultación por Plutón del 18 de Julio del 2012 en el OH.



Figura C.2: En la imagen, el personal del Planetarium Cusco junto al autor practicando para la observaciones de ocultaciones.



Figura C.3: En la imagen, Philippe Tinajeros y el autor junto al C14 en el Observatorio Pic du Midi, con el cuál, se realizó la observación de la ocultación por el asteroide Link.



Figura C.4: En la imagen, Jean Lecacheux y el autor durante la observación de la ocultación estelar por el asteroide (177) Irma en la cúpula del telescopio de 1m del OBSBPM.

Apéndice D

Imágenes del Pre-Comisionamiento del OA-UNI (Junio/2014)

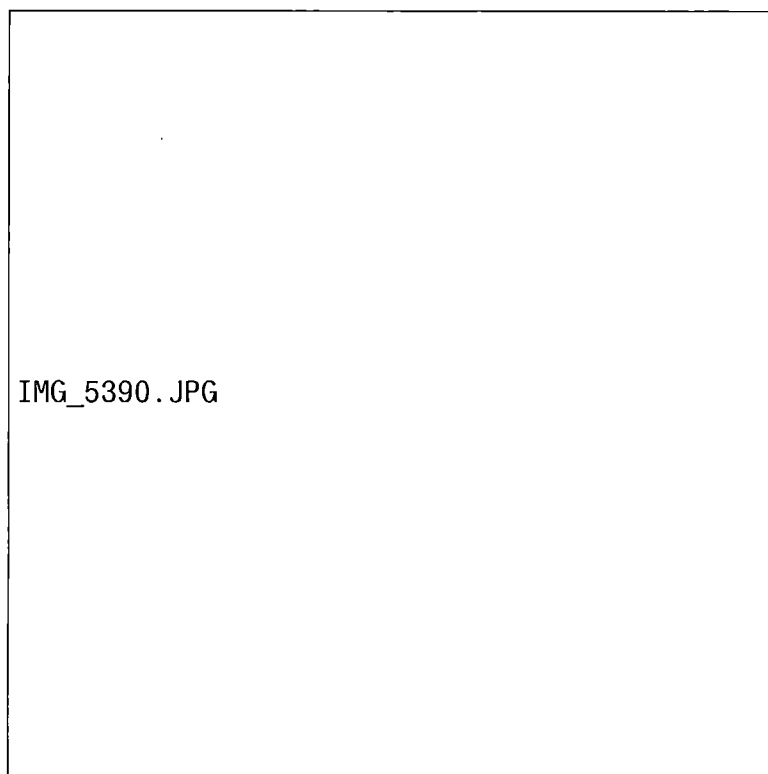


Figura D.1: En la imagen, el autor junto al telescopio RCOS 50cm del OA-UNI. Ésta se realizó durante el pre-comisionamiento del telescopio RCOS de 50cm en la Facultad de Ciencias - UNI. Creditos: A. Pereyra.

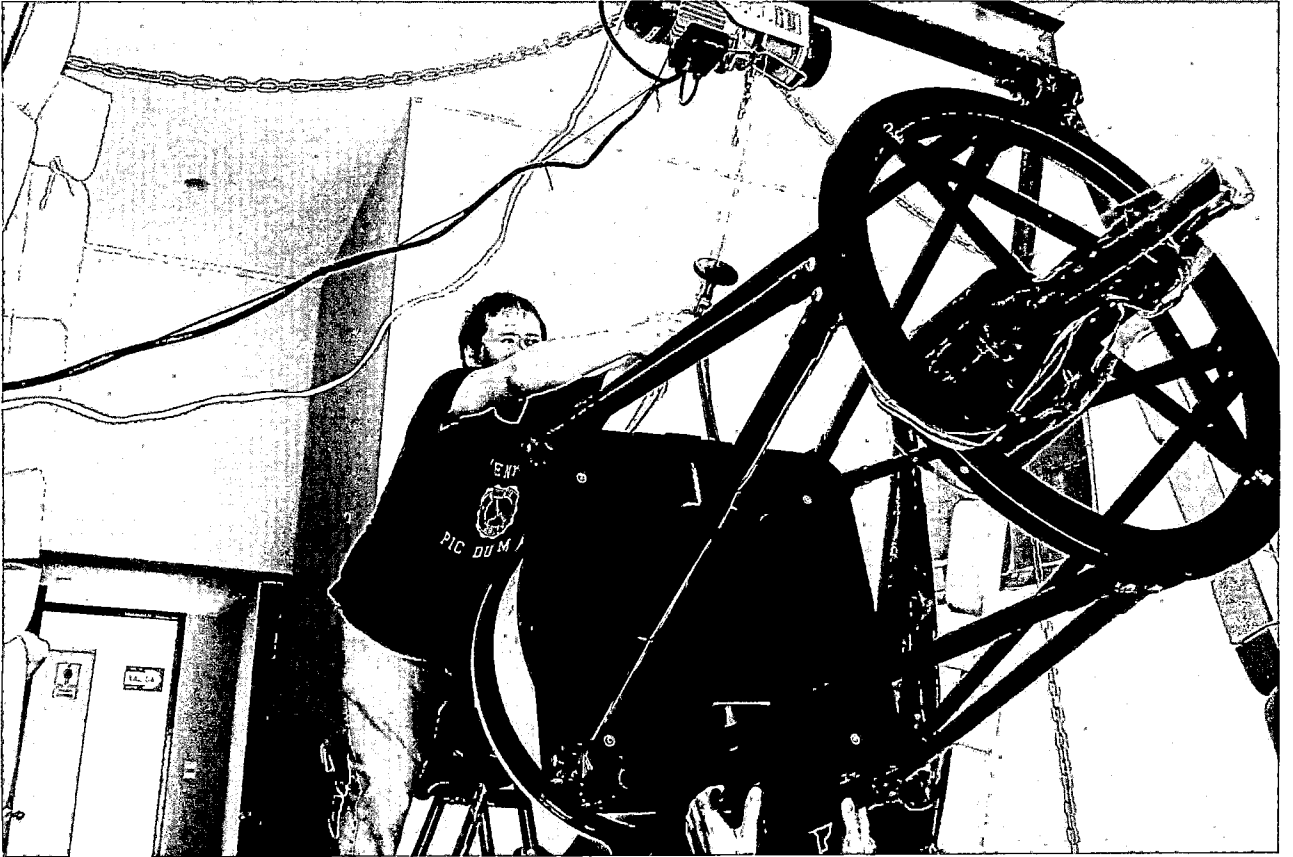


Figura D.2: En la imagen, el autor durante el montaje del telescopio RCOS del OA-UNI en la FC-UNI.

Apéndice E

Predicciones de Ocultaciones Estelares Observadas

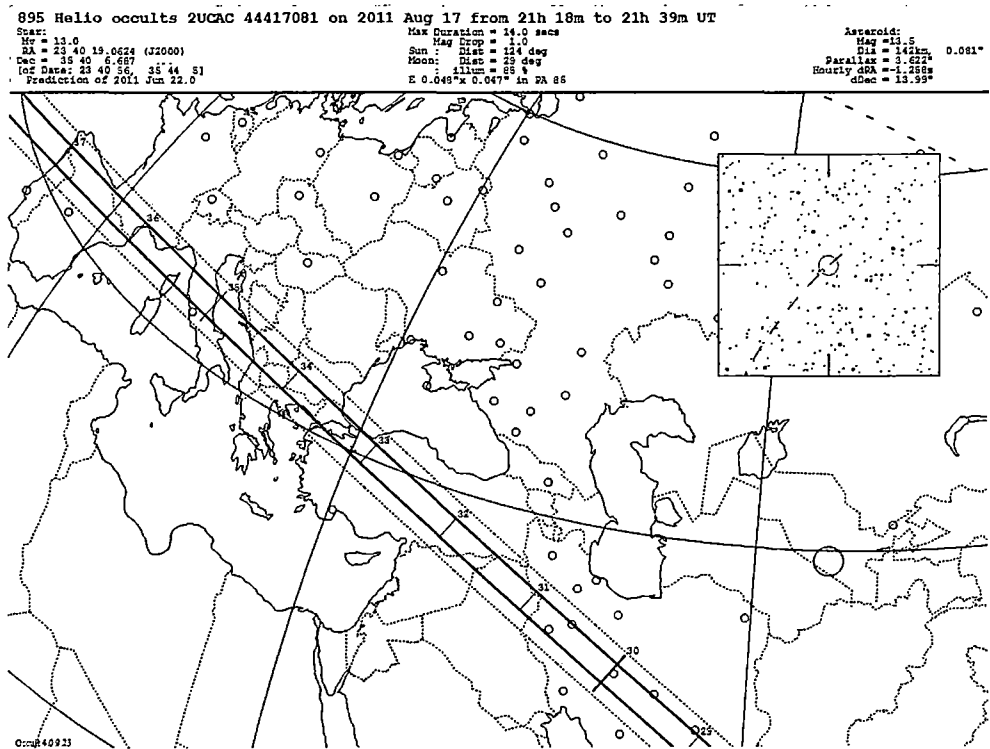


Figura E.1: Predicción de la Ocultación por el asteroide (895) Helio. Crédito: Steven Preston

177 Irma occults TYC 1866-01429-1 on 2011 Sep 17 from 3h 3m to 3h 12m UT

Star:
 Mr = 10.8 Mp = 11.4 Mr = 10.5
 RA = 5 51 34.7846 (J2000)
 Dec = 24 51 37.498
 [of Data: 5 52 19, 24 52 41
 Prediction of 2011 Aug 23.0

Max Duration = 3.6 secs
 Mag Drop = 3.2 (3.0r)
 Sun : Dist = 84 deg
 Moon: Dist = 42 deg
 : illum = 81 %
 E 0.029"x 0.023" in 2A 30

Asteroid:
 Mag = 13.9
 Dia = 73km, 0.050"
 Parallax = 4.362"
 Hourly GRA = 3.656s
 dDec = 2.32"

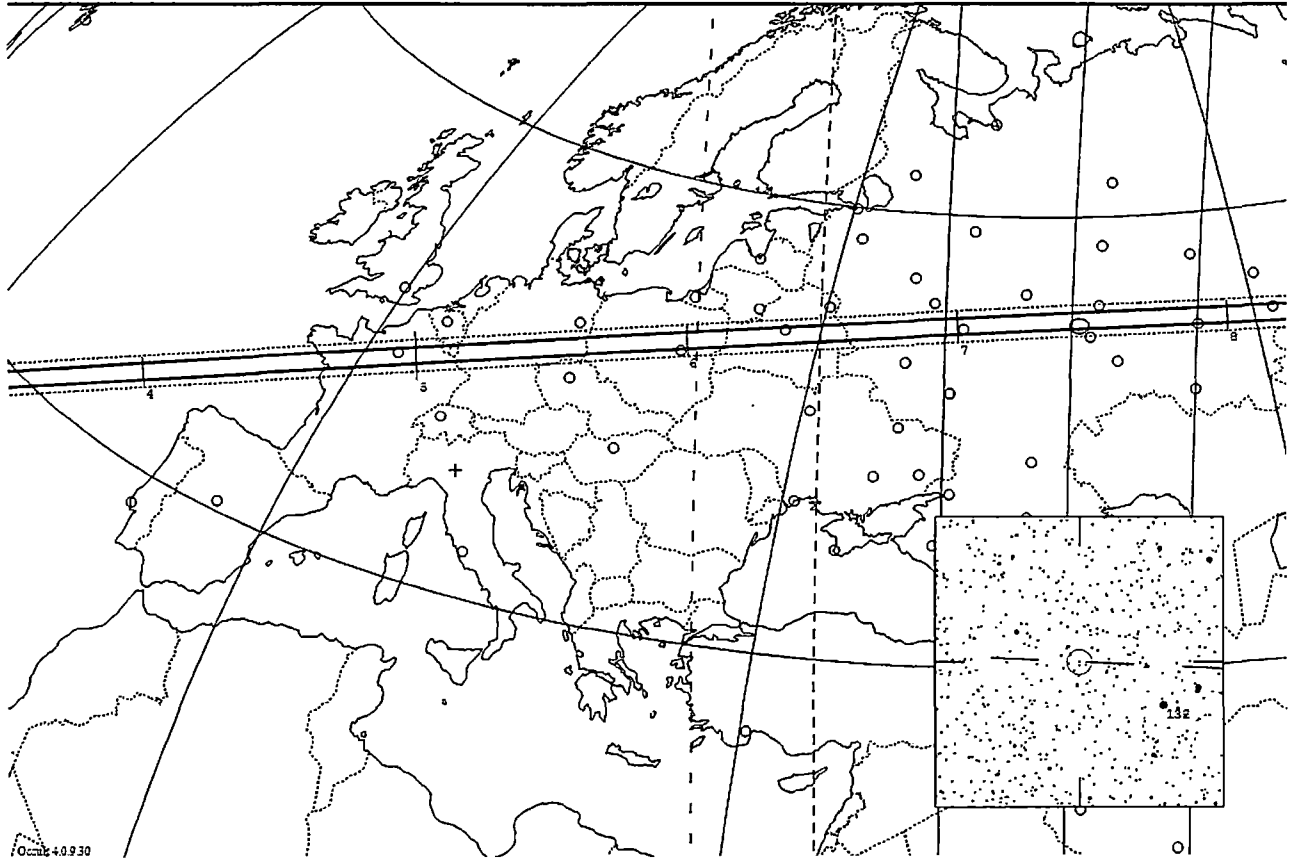


Figura E.2: Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma. Créditos: Steven Preston.

177 Irma occults TYC 1866-01429-1 on 2011 Sep 17 from 3h 3m to 3h 12m UT

Star:
 Mr = 10.8 Mp = 11.4 Mr = 10.5
 RA = 5 51 34.7846 (J2000)
 Dec = 24 51 57.498
 [of Data: 5 52 19, 24 52 4]
 Prediction of 2011 Aug 23.0

Max Duration = 3.6 secs
 Mag Drop = 3.2 (3.0r)
 Sun : Dist = 86 deg
 Moon: Dist = 42 deg
 Illum = E1 4
 E 0.029"x 0.023" in PA 90

Asteroid:
 Mag = 13.9
 Dia = 73km, 0.050"
 Parallax = 4.362"
 Hourly dRA = 3.656s
 dDec = 2.32"

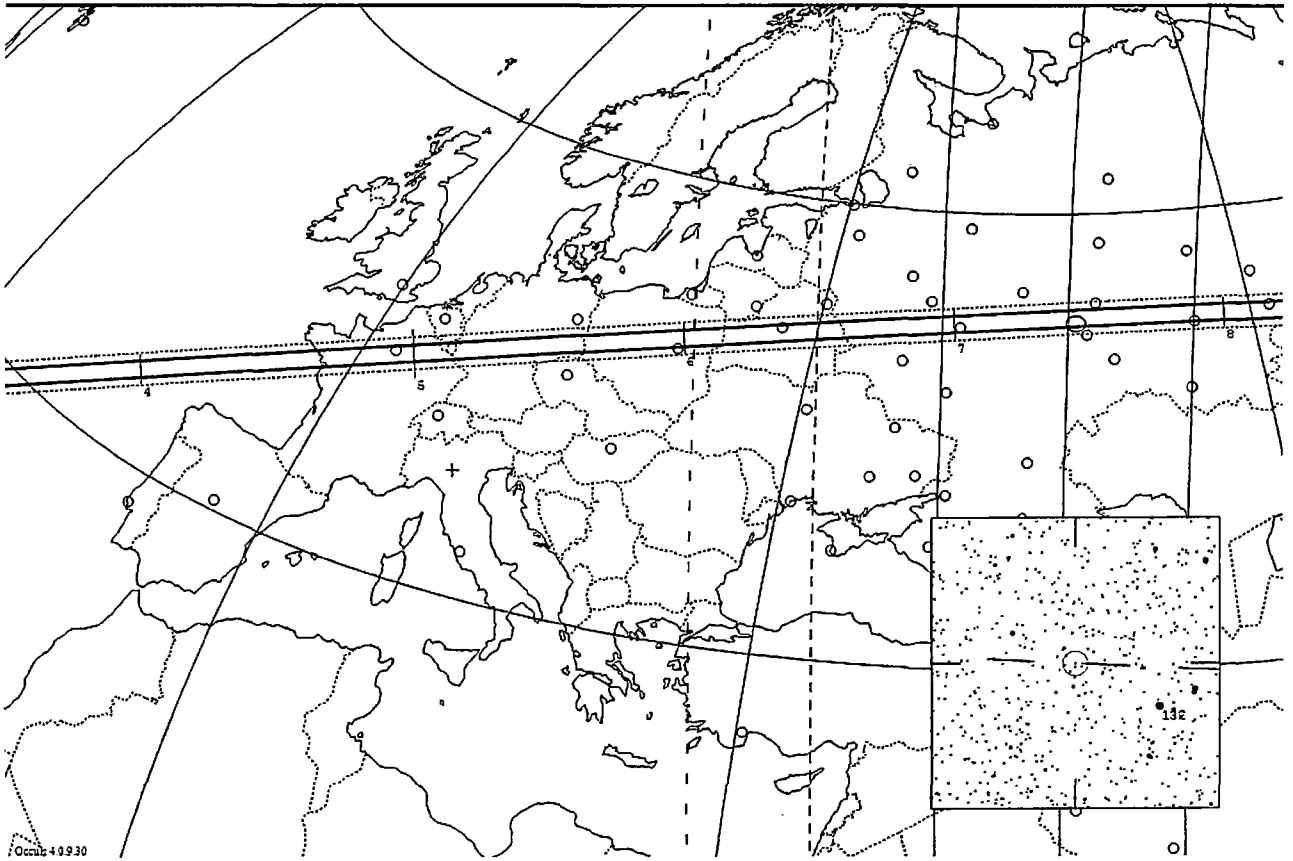


Figura E.3: Predicción de la ocultación del asteroide (177) Irma. Créditos: Steven Preston.

3550 Link occults TYC 1320-00521-1 on 2011 Oct 13 from 23h 32m to 23h 47m UT

Star:
 Mr = 10.3 Mp = 10.7 Mr = 10.1
 RA = 5 58 15.1064 (J2000)
 Dec = 19 10 40.394
 [of Date: 5 59 1, 19 10 42]
 Prediction of 2011 Aug 23.0

Max Duration = 3.3 secs
 Mag Drop = 6.2 (6.0r)
 Sun : Dist = 111 deg
 Moon: Dist = 49 deg
 : illum = 97 %
 E 0.062"x 0.042" in PA 76

Asteroid:
 Mag = 16.5
 Dia = 26km, 0.018"
 Parallax = 4.317"
 Hourly dPA = 1.266s
 dDer = 8.06"

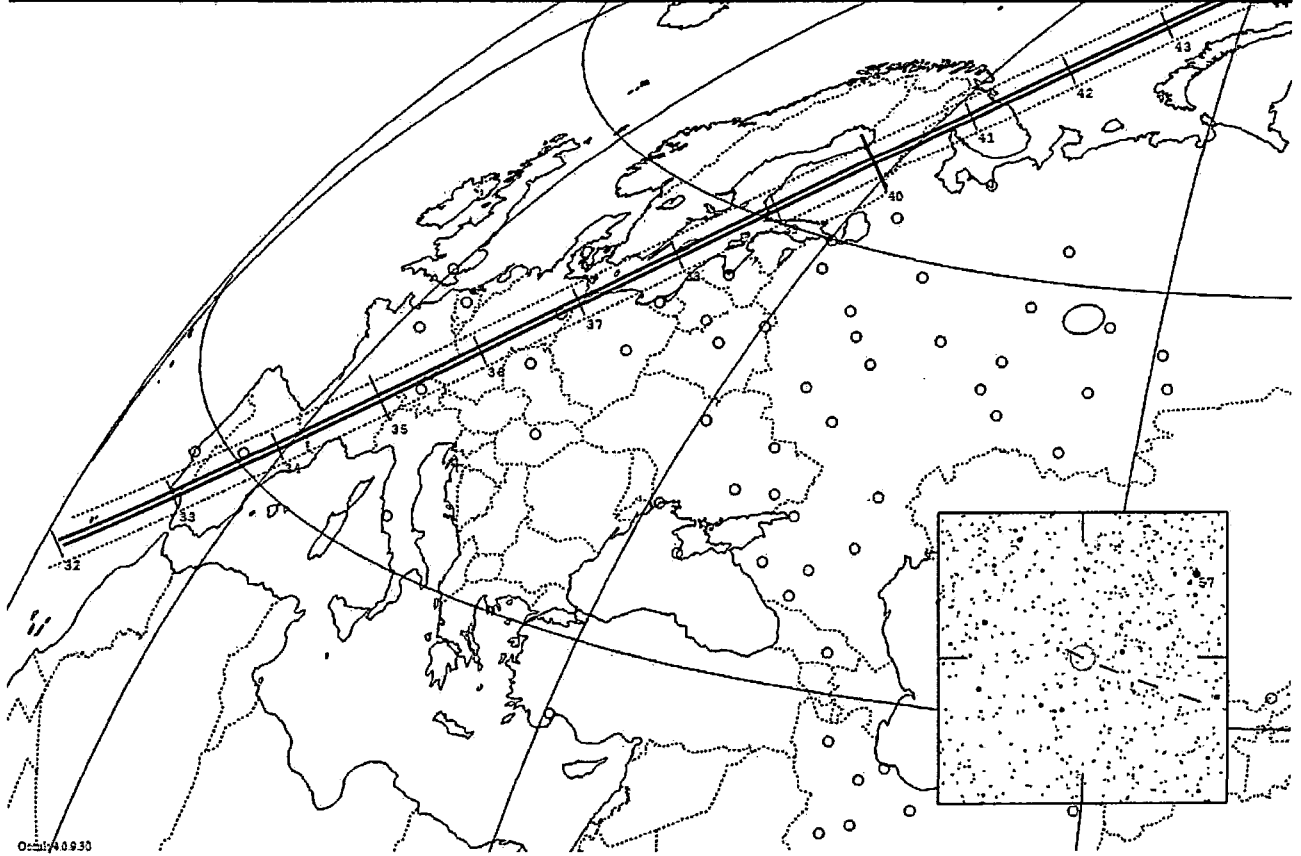


Figura E.4: Predicción de la ocultación del asteroide (3550)Link. Créditos: Steven Preston.

Pluto: Star WFI ES02p2, PLU21-DE413/BS

Offset (mas): -75.0 187.0



d	m	year	h:m:s UT	ra	dec	J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
18	07	2012	04 13 45.	18 32	14.6748	-19 24 19.304	0.027	351.12	-22.54	31.30	14.8	11.0	-82.

Figura E.5: Primera predicción de la Ocultación por Plutón en base al catalogo WFI.
 Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

654 Zelinda occults TYC 7841-00246-1 on 2013 May 21 from 4h 40m to 4h 56m UT

Star:
 Mr = 11.1 Mp = 12.0 Mr = 10.6
 RA = 15 46 7.3465 (J2000)
 Dec = -39 35 54.013
 Epoch Data: 15 47 4, -39 38 23
 Prediction of 2013 Apr 18.0

Max Duration = 10.1 secs
 Mag Drop = 1.0 (1.1x)
 Sun : Dist = 161 deg
 Moon: Dist = 58 deg
 : illum = 80 %
 E 0.043"x 0.031" in PA 90

Asteroid:
 Mag = 11.6
 Dia = 124km 0.125"
 Parallax = 6.447"
 Hourly dRA = -3.120s
 dDec = 26.49"

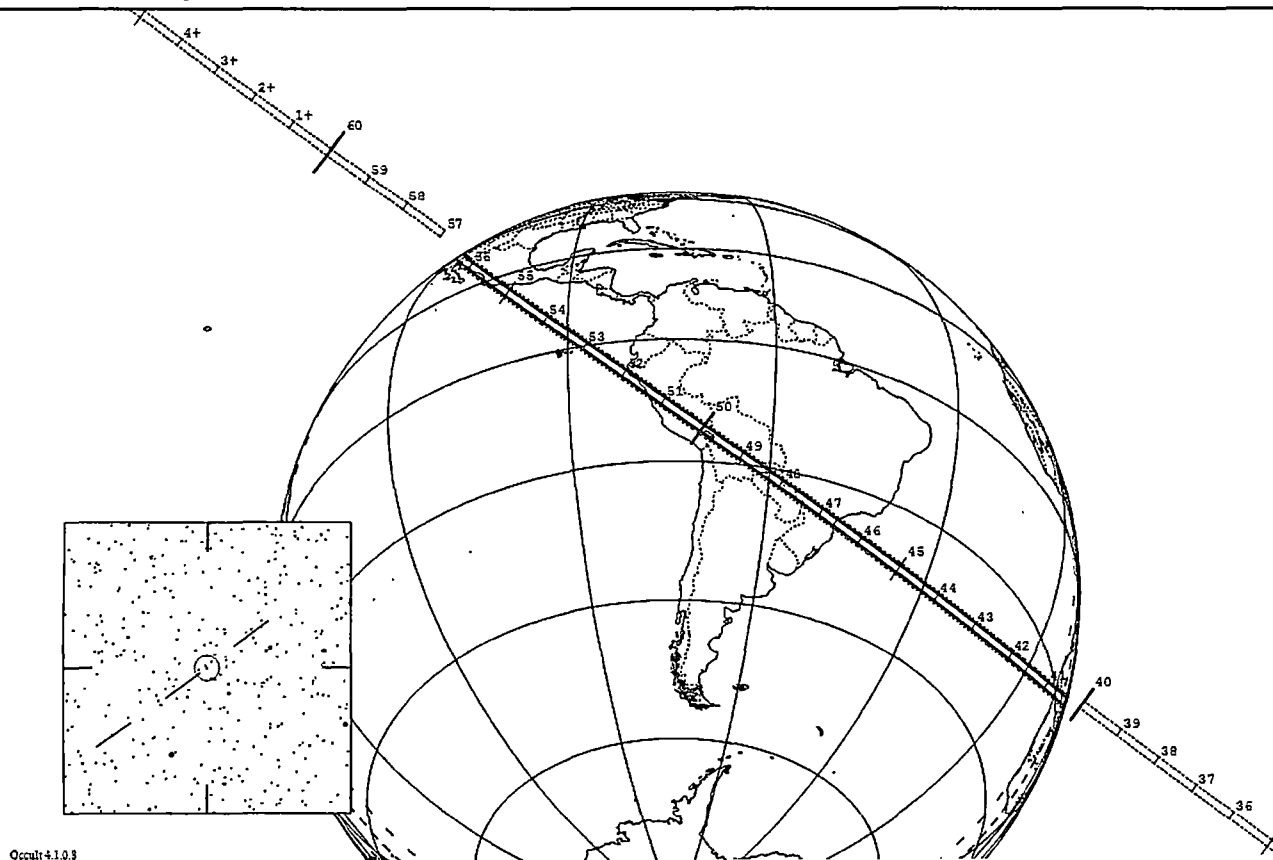


Figura E.6: Predicción de la ocultación del asteroide (654)ZELINDA. Créditos: Steven Preston.

2002 TC302: Star WFI, ESOjun-JPL#10

Offset (mas): -29.0 -158.0

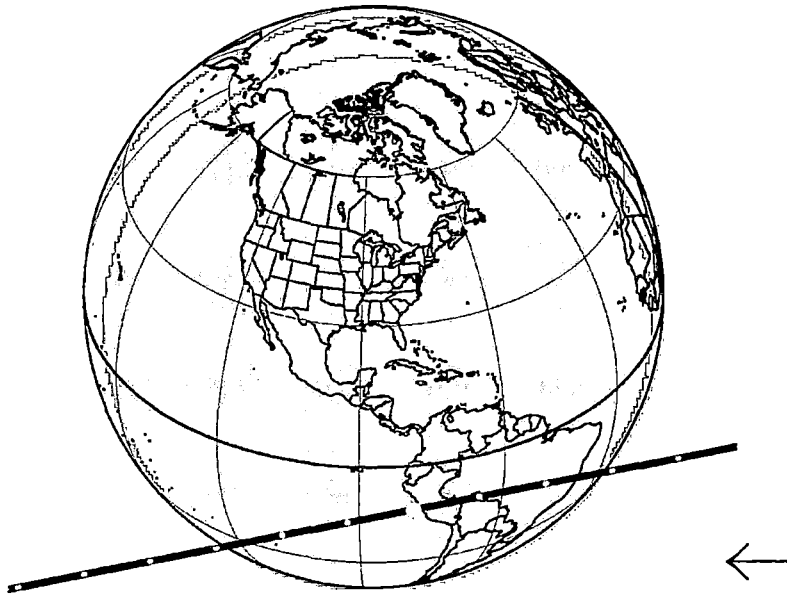


d	m	year	h:m:s UT	ra	dec	J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
10	10	2013	06 40 28.	02 14	16.0089	24 51 18.090	0.134	171.30	-24.26	44.67	16.7	15.0	-86.

Figura E.7: Predicción de la ocultación del TNO 2002 TC302.
 Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

Asbolus: Star WFI, ESOjun-JPL#41

Offset (mas): 228.0 154.0



d	m	year	h:m:s UT	ra	dec	J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
24	11	2013	05 23 35.	03 47 11.7524	36 02 10.511	0.390	168.96	-24.68	16.84	14.9	13.0	-87.	

Figura E.8: Predicción de la ocultación del TNO 1995 GO ASBOLUS.

Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

Apéndice F

Campañas y llamados para observaciones de Ocultaciones Estelares







IOTA · ES		International Occultation Timing Association European Section
Occultations by		Call for Observation
 Moon	Station Map for the Occultation by (177) Irma at Saturday, 2011 September 17 (~ 03:04 UT)	
 Asteroid	V-Magnitude of target star TYC 1866-01429-1: 10.8 mag Johnson B-V Colour Index: + 0.7 UCAC instrumental "pseudo-R" fit-model magnitude: 10.6 mag (data from UCAC3)	
 Planet	The max duration is expected to be 3.6 sec with a max drop of 3.2 mag. The event will take place at an altitude of 52 deg and at azimuth 119 deg. The sun will be at an altitude of -18 deg. (At predicted centre line for longitude E 10 deg)	
 Pluto, TNOs	There is a 1 sigma uncertainty interval of ± 0.46 path widths. The probabilities to see a positive event: Centre line: ~ 72 % Path limits: ~ 49 % 1 sigma limits: ~ 16 % 2 sigma limits: ~ 2 %	
 Astrometry	(Calculation according to Raymond Dasser, E.A.O.N. Circular #10)	
 Sol Eclipse	PLEASE REMEMBER: Predictions are sometimes wrong. Please observe even with a small probability. Let other observers know about your observing plans: Announce your station with OccultWatcher!	
Partners & Friends	More information (coordinates, finder charts) at Steve Preston's prediction: http://asteroidoccultation.com/2011_09/0917_177_24949.htm	
Members login	Table of potential observing stations and cities with distance from center of predicted path (Derek C. Breit): http://www.govintsource.com/News/Google/20110917_24949_Sites.txt	
Contact us :	Map and Coordinates at the web page of E.A.O.N. : http://astrosurf.com/easn/Occultations%20September.htm	
info@iota-es.de	Good luck with your observation! Oliver Klös IOTA-ES	

Figura F.1: Alerta para la observación de la ocultación por (177) Irma.

Créditos: IOTA.ES

2012 stellar Occultations by TNOs Campaigns

Here you find predictions to selected stellar occultations by TNOs, that are under campaign. We will do our best to update the prediction maps, so be alert for changes in this page (). If you can observe (or know who can) any of these occultations, please contact us (felipe.ribas-at-obspm.fr or bruno.sicardy-at-obspm.fr).

More information about the predictions can be found in [Bruno Sicardy's web page](#) and in [Assafin et al. 2010](#) (for Pluto system predictions) and [Assafin et al. 2012](#) (for the TNO predictions). Please, do references about the predictions to Sicardy's web page and/or Assafin et al. 2010 and 2012 paper.

Informations about the maps (please read at least once!):

- The straight and continue lines are the shadow limits considering the estimated radius;
- Each red dot is spaced by one minute, the nominal occultation time is to the big red dot (that is the geocentric closest approach);
- For Pluto and Charon, the error is about 800km, and for the other TNOs it can be as big as 3000km.
- The star R* and K* are the R and K magnitudes, normalized to a body moving at 20km/s.
- The body offset is at the upper left corner.
- Be careful, the dates are from the moment of the event in Universal Time, the night of the event may begin at the date before.

[February](#) [March](#) [April](#) [May](#) [June](#) [July](#) [August](#) [September](#) [October](#)

July

Date	Object	Star/R magnitude	map	other information
10/07	Quaoar	16.5		<p>Click to see updates 04/07</p> <p>save maps and finding charts.</p>
18/07	Pluto	14.6		<p>Updated on July 18.</p>

Figura F.2: Campaña para la observación de la ocultación por Pluton.

Créditos: B. Sicardy y Rio Team.

Apéndice G

Ocultación por Plutón del 18 de Julio del 2012.

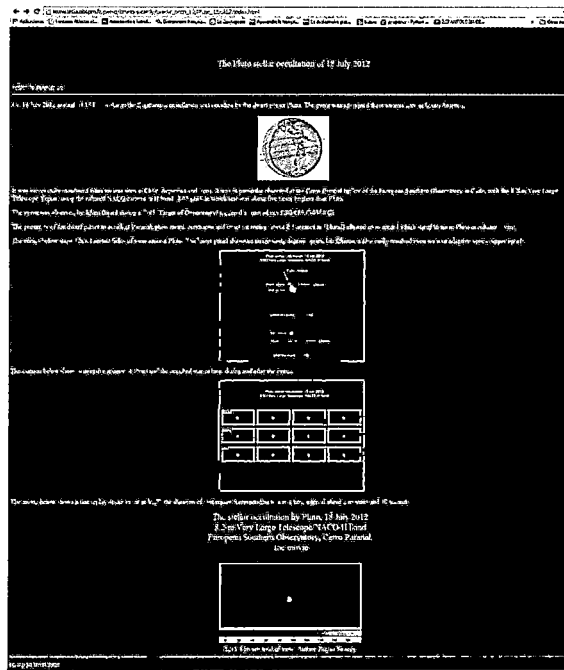


Figura G.1: Ocultación Estelar por Plutón el 18 de Julio del 2012.

Créditos: B. Sicardy

Bibliografía

- Assafin M. et al. (2012), Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 541, A142, 10 pp.
- Assafin M. et al. (2011), PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically, Gaia follow-up network for the solar system objects : Gaia FUN-SSO workshop proceedings, held at IMCCE -Paris Observatory, France, 2010, pp. 85 - 89.
- Assafin M. et al. (2010), Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008–2015, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 515, A32, 14 pp.
- Azouit, M., Vernin, J. (1980), Remote investigation of tropospheric turbulence by two-dimensional analysis of stellar scintillation, *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 37, pp. 1550 - 1557.
- Baella N., Pereyra A. (2003), Calibraciones fotométricas astronómicas en el Observatorio de Huanca-
yo, *Tecnia*, Vol. 13, p. 15 - 23.
- Baella N. (2001), Software IRAF para el análisis de una imagen digital astronómica: cúmulo estelar
abierto M7, *Revciuni*, Vol. 5, pp 1 - 14.
- Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D. P., Morbidelli, A., Dotson, R. (2008), *The Solar System
Beyond Neptune*, University of Arizona Press, pp. 3 - 10.
- Braga-Ribas F. et al., (2014), A Ring System Detected Around the Centaur (10199)Chariklo, *Nature*,
Vol. 508, pp. 72 - 75.

- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Vieira-Martins, R., Ortiz, J. L. et al. (2013), The size, shape, albedo, density and atmospheric limit of transneptunian object (50000) Quaoar from multi-chord stellar occultations, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 773, A26, 13 pp.
- Brosh (1995), Pluto's atmosphere was marginally detected for the first time, *MNRAS*, Vol. 276, p. 571.
- Dalmau A., Pereyra A. (2004), Mediciones fotométricas en el Observatorio de Huancayo, *Tecnia*, Vol. 14, pp. 49 - 58.
- Dennfeld, Fort. (1986), Multi-object spectroscopy with the VLT, Second Workshop on ESO's Very Large Telescope, Proceedings, Italy, 1986, pp. 151 - 164.
- Elliot J. L., Person M. J., Qu S. (2003), Analysis of Stellar Occultation Data. II. Inversion, with Application to Pluto and Triton, *The Astronomical Journal*, Vol. 126, pp. 1041-1079.
- Elliot J. L., Olkin C. B. (1996), In *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, p. 89.
- Elliot J. L., Dunham E. W., Bosh A. S., Slivan S. M., Young L. A., Wasserman L. H., Millis R. L. (1989), Pluto's atmosphere, *Icarus*, Vol. 77, pp. 148 - 170.
- Frederick R., C. (2010), *To Measure the Sky: An Introduction to Observational Astronomy*, Cambridge University Press.
- Fried. (1965), Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 55, pp. 1427 - 1431.
- Hog E. (2000), Tycho Star Catalogs: The 2.5 Million Brightest Stars, *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*.
- Hubbard W. B., Hunten D. M., Dieters S. W., Hill, K. M., Watson R. D. (1988), Occultation evidence for an atmosphere on Pluto, *Nature*, Vol. 336, pp. 452-454.
- Juan Quintanilla del Mar, Bruno Sicardy, Victor Ayma Giraldo, Victor Raul Aguilar Callo (2011), An astronomical observatory for Peru, *Proceedings of the International Astronomical Union - Symposium S260*, 2009, Vol. 5, pp. 616 - 621.

- Kolmogorov, A. (1941), The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, *Doklady Akademiia Nauk SSSR*, Vol. 30, pp. 301-305.
- Léna P., Rouan D., Lebrun F., Mignard F., Pelat D. (2008), *l'Observation en Astrophysique*, p. 72.
- Lombardi G. (2008), *Doctoral Thesis: Astronomical Site Testing in the Era of the Extreme Large Telescopes*.
- Martin, F., Tokovinin, A., Agabi, A., Borgnino, J., Ziad, A. (1994), G.S.M.: a Grating Scale Monitor for atmospheric turbulence measurements. I. The instrument and first results of angle of arrival measurements, *Astronomy and Astrophysics Suppl.* 108, pp. 173-180.
- Meinel. (1960), *Astronomical Seeing and Observatory Site Selection*. Chicago Univ. Press, Vol. I, pp. 154 - 175.
- Meza E., Pereyra A., Sicardy B., Comina G., Ishitsuka J., (2013), MEASURES OF SKY QUALITY(SEEING) USING THE DIMM TECHNIQUE AT THE HUANCAYO OBSERVATORY, *Tecnia*, Vol. 23, pp. 5-10.
- Meza E. et al. (2009), OA-UNI: an Astronomical Observatory at the Peruvian Andes. Abstract Book - Special Session - The International Year of Astronomy - IAU's XXVII General Assembly, Rio Janeiro - Brazil, p. 407.
- Monet D. et al. (2003), The USNO-B Catalog, *The Astronomical Journal*, Volume 125, pp. 984-993.
- Ochsenbein F., Bauer P. y Marcout J., (2000), The VizieR database of astronomical catalogues, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 143, pp. 23 - 32.
- Pereyra A. et al. (2013), OA-UNI: An Astronomical Observatory at UNI, *Revciuni*, Vol. 15, p. 209.
- Pereyra A., Baella N. (2003), Medidas de SEEING en el Observatorio "John A. Fleming" de Huancayo. *Revciuni*, Vol. 7, pp. 103.
- Perryman M.A. (1997), The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission, *ESA Publications Division*, Vol. 1200.

- Roddier, F., Lena, P. (1986), Long-baseline Michelson interferometry with large ground-based telescopes operating at optical wavelengths. I - General formalism: Interferometry at visible wavelengths, *JOSA* , pp. 171-182.
- Roddier. (1981), *The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy*, *Progress in Optics* , pp. 281 - 373.
- Rösch. (1954), *Radium*, *Journal of Physics* , Vol. 15, p. 39.
- Sarazin, M., Roddier, F. (1990), The ESO differential imaging motion monitor, *Astronomy and Astrophysics* , Vol. 227, pp. 294 - 300.
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. (2011), A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation, *Nature*, Vol. 478, pp. 493 - 496.
- Sicardy, B., et al. (2003), Large changes in Pluto's atmosphere as revealed by recent stellar occultations, *Nature*, Vol. 424, pp. 168 - 170.
- Sicardy B., Ferri, F., Roques, F. (1999), The Structure of Titan's Stratosphere from the 28 Sgr Occultation, *Icarus*, Vol. 142, pp. 357 - 390.
- Sicardy B., Roques F., Brahic (1991), Neptune's rings, 1983-1989: Ground-based stellar occultation observations. I - Ring-like arc detections, *Icarus*, Vol. 89, pp. 220 - 243.
- Skrutskie M. F., (2006), THE TWO MICRON ALL SKY SURVEY (2MASS), *The Astronomical Journal*, Volume 131, pp. 1163-1183.
- Stock, Keller, J., Keller, G. (1960), *Astronomical Seeing*, Chicago Univ. Press, Vol. I, pp. 138 - 153.
- Tatarski. (1961), *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, 285 pp.
- Young. (1974), Seeing: its Cause and Cure, *Astrophysical Journal*, Vol. 189, pp. 587 - 604.
- Zacharias N. et al. (2013), The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4), *The Astronomical Journal*, Vol. 145, A44, 14 pp.

Zacharias N. et al. (2004), The second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2), The Astronomical Journal, Vol. 127, pp. 3043-3059.