

SISTEMA TODO CIELO PARA LA DETECCION Y PROCESAMIENTO DE BÓLIDOS Y DETERMINACIÓN DE FRACCIÓN DE NUBOSIDAD DIURNA

Tesis para la obtención del título de
Magíster en Física, opción Astronomía

Autor: Ing. Juan Manuel Caldas

Tutor: Dr. Gonzalo Tancredi

Facultad de Ciencias

Universidad de la República Oriental del Uruguay

Noviembre de 2012

Montevideo, Uruguay

ALL-SKY SYSTEM FOR DETECTION AND PROCESSING OF FIREBALLS AND CLOUD COVER DETERMINATION

Master's Thesis in Physics (Astronomy)

Author: Eng. Juan Manuel Caldas

Mentor: Dr. Gonzalo Tancredi

Facultad de Ciencias

Universidad de la República Oriental del Uruguay

November, 2012

Montevideo, Uruguay

Abstract

The present work describes the development of an all-sky system for cloud cover (CC) determination during daytime, and fireball detection during nighttime. “All-sky” means that the system covers a field of view (FOV) of $\sim 180^\circ$.

The system development involved both hardware and software aspects, including data generation of diurnal CC and detected events.

The system involves a high-sensitivity black and white (BW) CCTV camera. These detectors are in general more sensitive than color detectors, and therefore more suited for fireball detection and processing. The choice of a BW camera against a color one is due to the fact that the detection and processing of fireballs has priority over CC determination, for which a color camera is more appropriate, as shown by most of the work done in this field (eg Calbó and Sabburg, 2007, Heinle, Macke, and Srivastav, 2010, among others). The software developed includes two separate applications, one for image and video acquisition and camera control, and the other for pre- and post-processing of detected meteors.

The prototype developed in this work is currently in operation at the Astronomical Observatory Los Molinos (OALM), Faculty of Sciences, University of the Republic, in the locality Los Molinos, department of Montevideo (Uruguay). The system can be replicated in other parts of the country for building an all-sky network capable of determining original meteoroid orbits and automatic generation of diurnal CC databases.

Keywords: All-sky, fireballs, meteors, cloud cover, videoastronomy, support vector machines.

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema todo cielo (*all sky*), para determinar la fracción de nubosidad (FN) diurna y detectar y procesar bólidos (meteoros igual o más brillantes que Venus) durante la noche. “Todo cielo” significa que el sistema puede abarcar un campo visual (*field of view*, de aquí en adelante FOV) de $\sim 180^\circ$.

El desarrollo incluyó tanto aspectos de hardware como de software, y la generación de datos de FN diurna y de eventos detectados por el software de detección de bólidos.

El sistema incluye una cámara CCTV de alta sensibilidad, blanco y negro. Estos detectores son más sensibles que los detectores color, y por lo tanto más apropiados para la detección y procesamiento de bólidos. La elección de una cámara blanco y negro frente a una color obedeció a que la función de detección y procesamiento de bólidos fue determinada como prioritaria frente a la determinación de FN diurna, para la cual una cámara color es más apropiada, como lo muestra la mayoría de los trabajos realizados en este campo (por ejemplo Calbó y Sabburg, 2007, Heinle, Macke, y Srivastav, 2010, entre otros). El software desarrollado incluye dos aplicaciones independientes, una para la adquisición de imágenes y video, y control de la cámara, y la segunda para el post-procesamiento de bólidos detectados.

El prototipo desarrollado en este trabajo está en operación en el Observatorio Astronómico Los Molinos (OALM), de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, en el paraje Los Molinos, departamento de Montevideo. El sistema puede ser replicado en otros puntos del territorio a los efectos de construir una red de sistemas todo cielo, capaz de determinar órbitas originales de meteoroides y de generar bases de datos de FN diurna de forma automática.

Palabras clave: All sky, todo cielo, bólidos, meteoros, fracción de nubosidad, videoastronomía, support vector machines.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas del Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias, que de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de este trabajo, especialmente a mi tutor, Gonzalo Tancredi, quien me ofreció este proyecto de investigación para mi trabajo de tesis.

Agradezco al Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA), en particular a las áreas de Geociencias y Física, por el apoyo económico brindado para la adquisición de equipamiento, vital para el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer profundamente al personal del Observatorio Astronómico Los Molinos, muy especialmente a Abel, por toda su ayuda invaluable y cariño.

A mi familia, a la que tanto debo.

A Carolina, por su infinita paciencia e incondicional amor, sin lo cual este trabajo no hubiera sido posible.

Índice

1	Introducción.....	7
1.1	Motivación	7
1.1.1	Estimación de FN diurna	7
1.1.2	Detección y post-procesamiento de bólidos	9
1.2	Estado del arte.....	14
1.2.1	Fracción de Nubosidad a partir de imágenes todo cielo	14
1.2.2	Redes todo cielo para estudio de bólidos.....	16
1.3	Estructura del informe.....	18
2	Antecedentes.....	19
2.1	Prototipo 1.....	19
2.2	Prototipo 2.....	23
2.3	Primer prototipo ojo de pez.....	24
3	Construcción y diseño	29
3.1	Gabinete protector.....	29
3.2	Interior de gabinete	31
3.3	Esquema eléctrico	35
3.4	Sistema anti-rocío	35
3.5	Costos del sistema.....	35
4	Determinación de FN.....	36
4.1	Introducción	36
4.2	Descripción del problema	37
4.3	Clasificadores de condiciones de cielo	40
4.3.1	Clasificador de media más cercana (NMC).....	43
4.3.2	Clasificador basado en SVM	47
4.3.3	Evaluación de clasificadores	55
4.3.4	Estimación de error.....	56
5	Captura de bólidos	60
5.1	Descripción del algoritmo.....	60
5.2	Evaluación de desempeño.....	61
6	Calibración astrométrica.....	63
6.1	Crear dark.....	65
6.2	Integrar video	66
6.3	Estrellas de catálogo	67
6.4	Encontrar estrellas.....	71
6.5	Identificación de puntos.....	74
6.6	Ajuste	76
7	Calibración Fotométrica	80

8	Procesamiento de bólidos detectados	84
8.1	Apertura de archivo.....	84
8.2	Astrometría de bólido detectado	87
8.3	Fotometría de bólido detectado.....	89
9	Resultados.....	92
9.1	Nubosidad	92
9.1.1	Introducción.....	92
9.1.2	Junio 2012.....	92
9.1.3	Julio 2012	94
9.1.4	Agosto 2012.....	95
9.1.5	Septiembre 2012	97
9.1.6	Discusión	98
9.2	Captura de bólidos	100
9.3	Astrometría	101
9.3.1	Introducción.....	101
9.3.2	Resultados del 18/01/2012.....	101
9.3.3	Resultados del 23/06/2012.....	109
9.3.4	Resultados del 16/07/2012.....	117
9.3.5	Discusión	123
9.4	Fotometría	124
9.4.1	Introducción.....	124
9.4.2	Resultados del 18/01/2012.....	124
9.4.3	Resultados 23/06/2012	128
9.4.4	Resultados 16/07/2012	130
9.4.5	Discusión	132
9.5	Procesamiento de bólido.....	134
9.5.1	Discusión	137
10	Conclusiones y perspectivas futuras.....	140
11	Referencias	142
12	ANEXOS	145
12.1	Anexo I: Costos de los primeros prototipos.....	145
12.2	Anexo II: Especificaciones técnicas y costos del nuevo diseño.	146
12.3	Anexo III: Estrellas de catálogo Vizier.....	150

1 Introducción

1.1 Motivación

A la hora de diseñar el sistema desarrollado en el marco del presente trabajo, se planteó que debía incluir dos funcionalidades básicas. Por un lado, el sistema debía ser capaz de determinar la FN diurna de forma automática y sistemática, presentando los datos en tiempo real y generando bases de datos para ser procesadas a posteriori. Por otro lado, durante la noche, el sistema debía ser capaz de detectar bólidos, e incluir herramientas para su post-procesamiento.

Las motivaciones de estas dos principales funcionalidades del sistema se exponen a continuación y por separado.

1.1.1 Estimación de FN diurna

Las nubes son uno de los principales fenómenos del ciclo hidrológico y tienen un rol fundamental en el balance energético de la Tierra, por su interacción tanto con la radiación terrestre como la solar (Calbó y Sabburg, 2007).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), entre otros, reconocen que las nubes y la interacción nubes-aerosoles son responsables (al menos en parte) de las incertidumbres en los modelos y predicciones climáticos (Houghton et al. 2001; Carslaw et al. 2002, citados en Calbó y Sabburg, 2007).

La interacción de las nubes con las radiaciones solar y terrestre se esquematiza en la **Figura 1**. La absorción de radiación solar por parte de nubes altas, como por ejemplo cirrostratos, lleva a un incremento en su temperatura de algunos °C/día, mientras que para nubes más bajas (stratus) el incremento es de algunas decenas de °C/día en sus capas más altas. La emisión IR de las capas más altas de nubes bajas o altas lleva a tasas de enfriamiento de hasta ~50 °C/día promediado durante 24 horas (Willace & Hobbs, 2006).

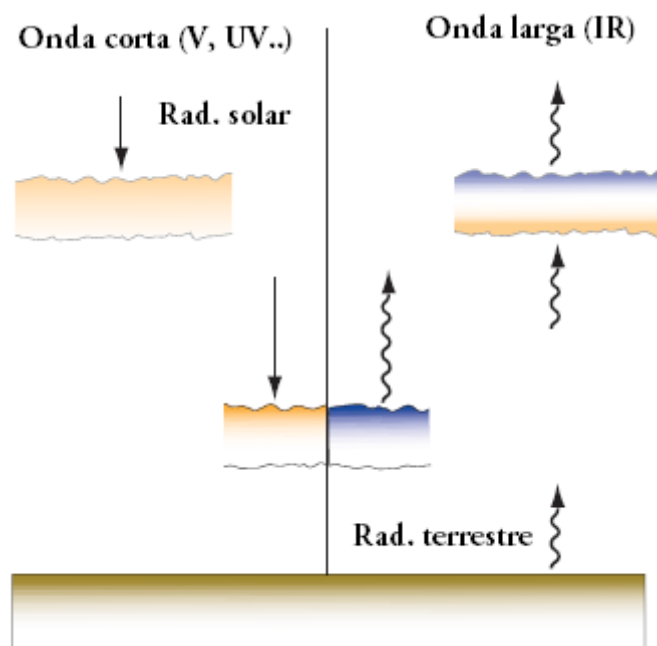


Figura 1: La interacción de una nube con la radiación solar incidente (izquierda), y con la terrestre (derecha). El color azul indica enfriamiento, y el naranja calentamiento (Fuente: Wallace & Hobbs, 2006).

Sin embargo, la correlación entre FN e irradiancia solar a nivel de superficie no es obvia. Si bien, por un lado, y como muestra la figura anterior, las nubes absorben parte de la radiación incidente, por otro lado son reemisoras de radiación térmica. En Pfister et al. (2003) se describe un estudio de la correlación entre medias mensuales de FN y el cociente entre la irradiancia medida y una irradiancia calculada de cielo despejado. Los autores obtienen un coeficiente de correlación de ~ 0.9 , lo cual muestra la importancia de bases de datos de FN para estudios de irradiancia solar.

Existen distintas técnicas y herramientas para el estudio de nubes, desde satélites meteorológicos –que brindan datos de gran escala, particularmente espacial-, pasando por radares para la determinación del movimiento de nubes y detección de partículas, hasta radiómetros de microondas para determinación de la altura de las capas inferiores de nubes (Huo & Lu, 2009). Sin embargo, la determinación en superficie de FN sigue realizándose en gran parte del mundo, incluyendo nuestro país, mediante observadores humanos, que registran la FN y tipos de nubes, con determinada frecuencia. Las ventajas de automatizar este proceso de adquisición de datos resultan obvias: disminución de costos, incremento de la resolución temporal y espacial de los datos, eliminación del factor subjetivo en la determinación de FN mediante el método tradicional, etc.

Por otro lado, se cuenta con experiencia a nivel mundial en la utilización de sistemas todo cielo para determinación de FN, lo cual ha llevado a un constante perfeccionamiento de los algoritmos involucrados, tal como lo atestigua el número de publicaciones existentes en este campo. Incluso, dentro de este campo de investigación, están surgiendo algoritmos para clasificación de tipos de nubes, como el descrito en Heinle, Macke & Srivastav (2010), lo cual amplía aún más las posibilidades de esta técnica.

1.1.2 Detección y post-procesamiento de bólidos

Antes de señalar la importancia del estudio de bólidos y meteoros en general, conviene introducir algunas definiciones. Un *meteoroides* es un objeto sólido interplanetario de entre 100 μm y 100 m de diámetro, o sea, menor que un asteroide o cometa, y mayor que lo que se conoce como *polvo interplanetario*. Cuando un meteoroides ingresa en la atmósfera terrestre puede producir un evento luminoso que denominamos *meteoro*. Si un meteoroides que ingresa a la atmósfera no se desintegra totalmente y logra impactar sobre la superficie terrestre, hablamos de *meteorito*. (Ceplecha et al., 1998).

Un tipo especial de meteoros lo constituyen los *bólidos*, que son meteoros con brillos mayores a -4 magnitudes (brillo medio del planeta Venus). La **Figura 2**, proveniente del trabajo de Ceplecha et al. (1998), muestra la distribución de masas y tamaños de las principales familias de objetos del Universo observable. En particular, nótese el rango correspondiente a los cuerpos menores del sistema solar (asteroides, cometas, meteoroides).

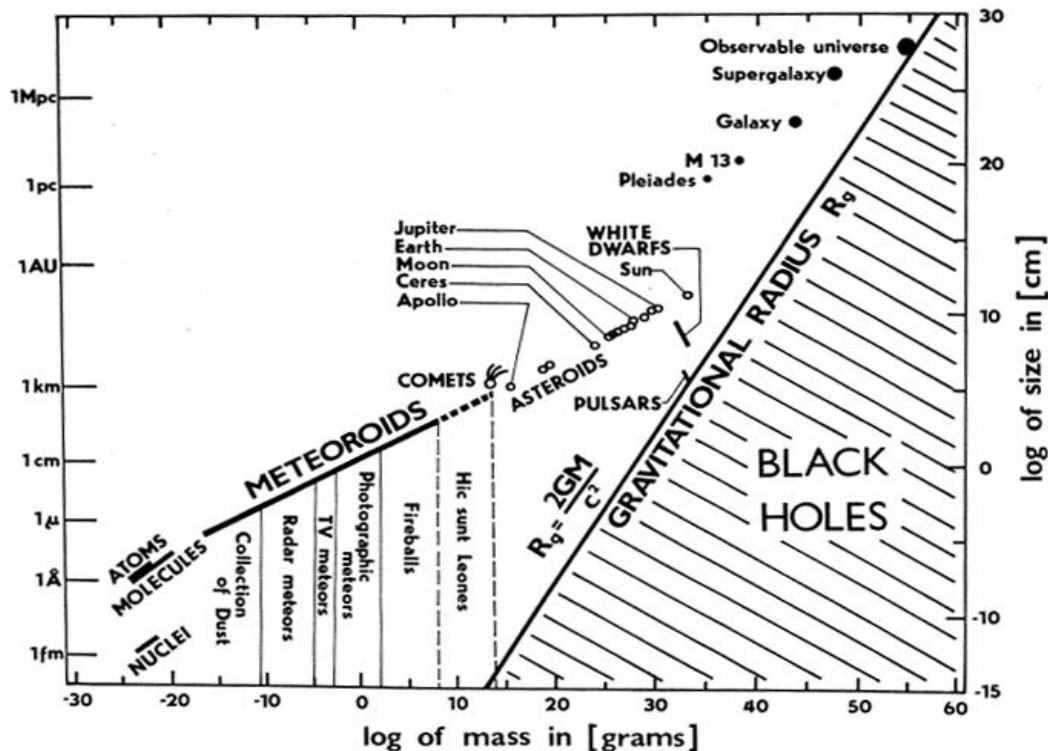


Figura 2: Masas y tamaños de objetos del Universo observable. Nótese el rango que comprende la categoría “meteoroides” (Fuente. Ceplecha et al., 1998).

Una parte de la población de meteoroides está claramente vinculada a cometas. Aun cuando el destino final más probable de estos es la eyección dinámica del sistema solar al espacio interestelar, los que sobreviven a estos procesos se extinguen más por causas físicas que dinámicas. Entre estas causas físicas destacan dos, repetidos eventos de fragmentación y sublimación de volátiles, lo cual da lugar a las llamadas *corrientes meteóricas*. Cuando la Tierra cruza la órbita de una de estas corrientes meteóricas, se produce una *lluvia meteórica*. Existen varias asociaciones establecidas entre distintos cometas y lluvias meteóricas (por ejemplo, las Táuridas están asociadas al cometa 2P/Encke).

Otras lluvias meteóricas están vinculadas a asteroides. Como decíamos más arriba, si un meteoroides –por su tamaño y velocidad- logra sobrevivir los procesos de ablación (pérdida de masa al ingresar a la atmósfera, en la fase y forma que sea) e impacta sobre la superficie terrestre, podemos disponer de un meteorito, el cual puede ser estudiado en un laboratorio y brindar valiosa información sobre su origen, sea como remanente del proceso de formación planetaria, o como el producto de la desintegración de un cometa o asteroide (Ceplecha et al., 1998).

El ingreso de un meteoroides a la atmósfera terrestre, puede dar lugar a cuatro fenómenos distintos, dependiendo de la masa (o tamaño, si asumimos cierta densidad) y la velocidad. Asumiendo una densidad de 3.500 kg/m^3 (densidad típica de rocas condriticas, que constituyen el 84% de los meteoritos), un **meteorito** visible a simple vista (conocido coloquialmente como “*estrella fugaz*”) puede ser generado por meteoroides mayores que 0.01 mm, asumiendo una velocidad $v_{\infty}=15 \text{ km/s}$. Un meteorito de magnitud 0 puede ser generado por un meteoroides de $\sim 2 \text{ cm}$ a 15 km/s , o de $\sim 1 \text{ cm}$ a 30 km/s , o de 0.5 cm a 60 km/s . Por otro lado, los **bólidos** pueden ser generados por meteoroides de $\sim 20 \text{ cm}$ a 15 km/s , o de $\sim 10 \text{ cm}$ a 30 km/s , etc. Para bólidos de magnitud -6 a -8 o más brillantes, el resultado final más probable es un meteorito (Ceplecha et al., 1998).

Los fenómenos y posibles procesos que se generan al ingresar un meteoroides en la atmósfera terrestre se muestran en la **Figura 3**, de Ceplecha et al. (1998).

Al ingresar en la atmósfera, el meteoroides es rápidamente desacelerado, efecto que se acentúa cuanto más penetra el objeto en la atmósfera (debido al incremento de la densidad atmosférica). Al desacelerarse, la temperatura del meteoroides se incrementa, y a partir de cierto punto (típicamente a una temperatura superficial de $\sim 2200 \text{ K}$, a unos 80-90 km de altitud) comienza una intensa volatilización. Los átomos y moléculas de esta nube que se forma alrededor del meteoroides son excitados por colisiones con moléculas atmosféricas, y viceversa, dando lugar a emisión por desexcitación. Las líneas espectrales de esta emisión constituyen una huella de los elementos presentes en la superficie de los meteoroides, y de esta manera se ha podido determinar que las líneas más importantes que aparecen proceden del hierro, magnesio, sodio, y otros (Ceplecha et al., 1998).

En general, la ablación lleva a la desintegración total del meteoroides, típicamente a altitudes de $\sim 80 \text{ km}$. Pero si el tamaño y velocidad del objeto son los adecuados (20 cm a 15 km/s , etc) el meteorito puede dar lugar a un bólido. El proceso de ablación que da lugar a la emisión de luz usualmente termina a altitudes de entre 15-20 km (si el meteoroides no se desintegró antes), punto en el cual comienza el llamado *vuelo oscuro*, a velocidades de entre 2 y 4 km/s, cuyo fin es el impacto contra la superficie terrestre.

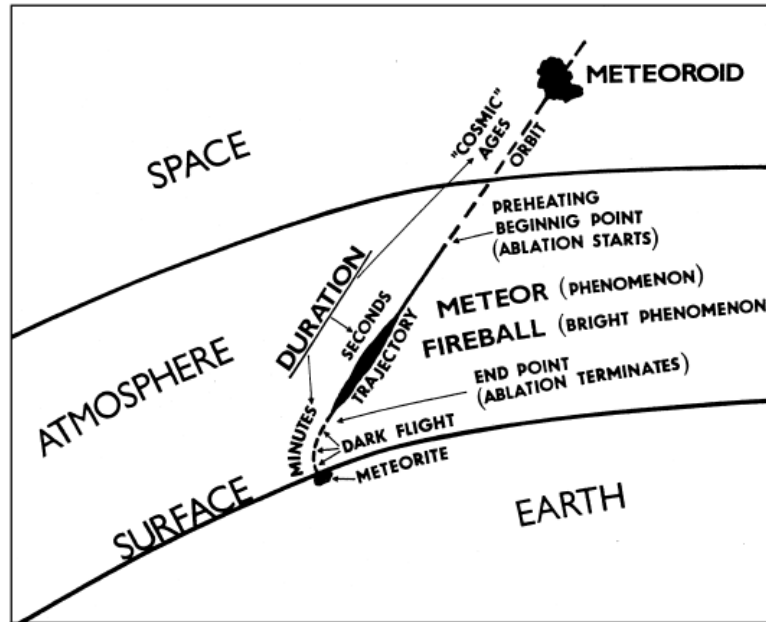


Figura 3: Posibles procesos producidos en la entrada de un meteorioide a la atmósfera terrestre (Fuente: Cep-lecha et al., 1998).

En cuanto a la tasa de ocurrencia de meteoros, en McCrosky (1968) se realiza un ajuste logarítmico a los registros de la *Prairie Network*, entre el 27/8/1965 y el 8/1/1967. El ajuste y los datos obtenidos por esta red se muestran en la Figura 4. La expresión matemática del ajuste obtenido es la **Ecuación 1-1** (McCrosky, 1968):

$$\log N = -19.4 + 0.22 \cdot M_{pan} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

donde N es la frecuencia (normalizada por área de cobertura de la red) de meteoros igual o más brillantes que M_{pan} , la magnitud pancromática¹.

¹ Definida en términos de estrellas tipo A0, es decir, a una estrella A0 cuya magnitud *visual* es m , le es asignada una magnitud *pancromática* igual a m (McCrosky, 1968).

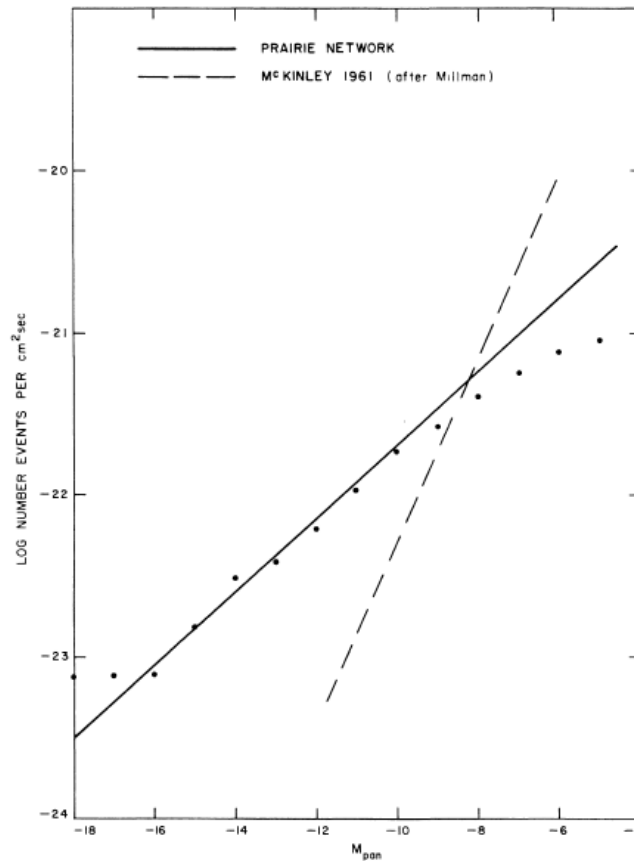


Figura 4: Frecuencia de eventos registrados por la *Prairie Network*, entre el 27/8/1965 y el 8/1/1967 (Fuente: McCrosky, 1968).

Si asumimos un área de cobertura definida por un ángulo de elevación mínimo de 30° , y una altura del bólido de 80 km (ver Figura 5), el área de cobertura es de unos 60.319 km^2 . Con estos valores, se obtiene que son necesarias unas 90 horas de observación (en condiciones adecuadas) para detectar un bólido de magnitud igual o más brillante que -4, mientras que para una magnitud de -6 son necesarias unas 240 horas.

Estos valores coinciden en orden de magnitud con los eventos detectados por la *European Fireball Network*, tal cual se describe en Oberst et al. (1998). Esta red, compuesta por 34 cámaras y con un área de cobertura de 10^6 km^2 , detectó unos 50 bólidos igual o más brillantes que $m=-6$ por año, para unas ~ 1200 h anuales de cielo despejado.

En el sitio web de la *American Meteor Society* (AMS, 2012), se indica que son necesarias unas 200 horas para bólidos de magnitud -6 o más brillantes, lo cual es consistente con los valores de McCrosky (1968), aunque para bólidos de magnitud -4 o más brillantes son necesarias unas 20 horas según la AMS, valor significativamente menor a las 90 horas señaladas anteriormente.

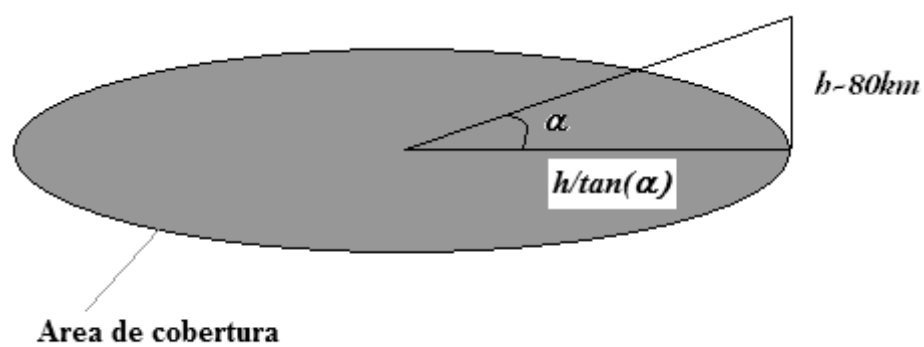


Figura 5: Geometría para el cálculo del área de cobertura.

1.2 Estado del arte

1.2.1 Fracción de Nubosidad a partir de imágenes todo cielo

La obtención de FN a partir de imágenes todo cielo color es un campo de investigación relativamente reciente. Uno de los trabajos pioneros en esta área es el de Long et al. (2001), en el que se describe el uso del instrumento Total Sky Imager (TSI) modelo 800, desarrollado por la compañía YES (Yankee Environmental Systems) para el Programa de Radiación Atmosférica (ARM, por sus siglas en inglés), del Departamento de Energía de los EE.UU. El TSI-800 se muestra en la **Figura 6**, en la que puede apreciarse que se compone esencialmente de un espejo para intemperie y una cámara montada sobre el mismo.



Figura 6: Instrumento TSI-800 desarrollado por YES para el Departamento de Energía de EE.UU. (Fuente: Long et al., 2001).

El TSI-800 captura una imagen por minuto a una resolución de 352 x 288 píxeles, y un campo visual (FOV) de 160°. El instrumento incluye un software que pre-procesa la imagen y calcula posteriormente la FN, en base a un umbral determinado empíricamente, del cociente R/B (rojo sobre azul).

Este instrumento fue ampliamente usado en los años subsiguientes, como lo atestiguan diversos trabajos posteriores al de Long et al. (2001). Uno de estos trabajos es el de Calbó & Sabburg (2007), en el que los autores implementan un clasificador de imágenes usando la técnica de paralelepípedos, para clasificar tipos de nubes. El trabajo hace un estudio comparativo entre un sistema todo cielo (WSI, por sus siglas en inglés)

desarrollado por el Instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de California-San Diego, y el TSI-800. En este trabajo, la FN se obtiene mediante algoritmos basados también en el cociente R/B, en ambos casos. Sin embargo, para el WSI, el umbral no se obtiene empíricamente sino mediante el método de Otsu (que infiere un umbral en base al histograma de la imagen), y su implementación en MATLAB (función *graythresh*).

El clasificador utiliza 7 clases de nubes y emplea 9 características, algunas de ellas obtenidas a partir de la intensidad de la imagen, otras a partir de una imagen R/B y dos vinculadas a la FFT de la imagen. El resultado principal es que el clasificador logra un porcentaje global de aciertos de 70%.

Otro ejemplo de utilización de sistemas todo cielo para determinar FN y tipos de nubes es el trabajo de Heinle et al. (2010), en el que se implementa un clasificador de "k vecinos más cercanos" (denominado clasificador knn en la literatura de reconocimiento de patrones), para clasificar imágenes en 7 condiciones distintas de cielo vinculados a distintos tipos de nubes, en base a 8 características. Una particularidad de este trabajo con respecto a los anteriores es que para la obtención de FN no se utiliza el cociente R/B sino la diferencia R-B. El porcentaje global de aciertos del algoritmo según los autores es de 74.58%. Otra particularidad refiere al hecho que no se utiliza un bloqueador del sol, como se muestra en la **Figura 7**.



Figura 7: Imagen obtenida con el sistema descrito en Heinle et al. (2010) (Fuente: Heinle et al. (2010)).

Finalmente, en Pfister et al. (2003) se estudia la correlación entre la FN y el cociente entre irradiancia solar medida a nivel de suelo e irradiancia solar de cielo despejado, obtenida mediante extrapolaciones de mediciones previas en esas condiciones de cielo. El hardware utilizado incluía un equipo TSI-800, por un lado, y un WSI desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Atmosféricas y de Aguas, de Lauder (Nueva Zelanda), por otro. Este trabajo es fundamental para desarrollar un posible estudio similar en nuestro país.

1.2.2 Redes todo cielo para estudio de bólidos

Actualmente existen varias redes de cámaras todo cielo en el mundo, abocadas al estudio de meteoros y bólidos. Casi todas, con excepción de la *Desert Fireball Network* en Australia, están ubicadas en el Hemisferio Norte. Las más destacadas son la *Nasa All-sky Fireball Network*, en EE.UU., la *Spanish Fireball Network* en España, y la *European Fireball Network*, que incluye a República Checa, Alemania, Austria, Luxemburgo, Bélgica y Suiza.

La red australiana consta de 4 cámaras espaciadas unos 100-150 km una de otra, y ubicadas en el desierto occidental de Australia. En el sitio web del proyecto se informa que se han detectado 7 eventos que pueden haber dado lugar a meteoritos de por los menos 100 g, dos de los cuales han podido ser recogidos (*Desert Fireball Network*, 2012).

El proyecto de la *All-sky Fireball Network* en EE.UU fue desarrollado por la *Meteoroid Environment Office* (MEO) de la NASA. Incluye 8 cámaras ubicadas en los puntos indicados en la **Figura 8**. El objetivo principal del proyecto es construir modelos del ambiente de meteoroides, para el diseño de misiones espaciales. Según se informa en el sitio web del proyecto, el número de cámaras crece constantemente, y la meta es alcanzar las 15 cámaras en escuelas, centros científicos y planetarios en los EE.UU (NASA, 2012).

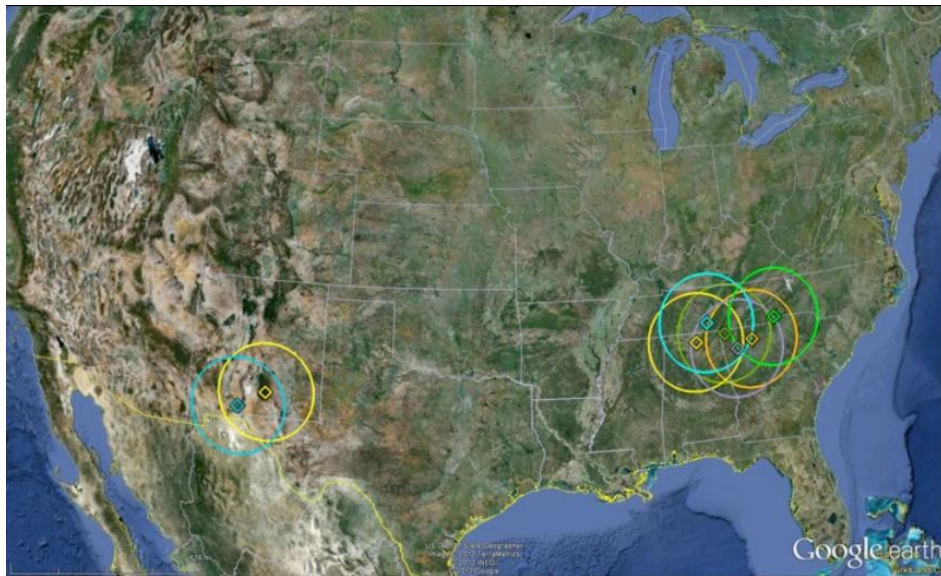


Figura 8: Ubicación de las 8 cámaras que componen la red All-sky Fireball Network de la NASA (Fuente: NASA, 2012).

La **Figura 9** muestra una imagen de una de las cámaras que componen la red. Destaca el diseño basado en componentes de bajo costo. En cuanto al software empleado por esta red, se utiliza ASGARD, desarrollado por Rob Weryk, de la Universidad Western (Canadá) (Weryk et al., 2008).



Figura 9: Una de las cámaras que componen la *All-sky Fireball Network* (Fuente: NASA, 2012).

Existen otras redes además de las ya nombradas, como por ejemplo la *Southern Ontario Meteor Network*, de la Universidad Western de Canadá, o el proyecto CAMS (acrónimo de *Cameras for Allsky Meteor Surveillance*) descrito en Jenniskens et al. (2011).

1.3 Estructura del informe

El presente informe está organizado en diez capítulos, incluyendo la presente Introducción, que conforma el primero.

El segundo capítulo describe los antecedentes inmediatos de este proyecto, desarrollados en el marco de los proyectos de fin de carrera de Freddy Kugelmass y Gabriela Chelle (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República), y de Juan Carlos Tulic (Facultad de Ciencias, Universidad de la República). Asimismo, se aborda el primer prototipo basado en una lente ojo de pez, desarrollado ya en el marco del presente trabajo.

El tercer capítulo desarrolla el proceso de diseño y construcción del prototipo definitivo, en operación actualmente en el OALM.

El capítulo 4 describe el algoritmo de determinación de FN diurna, incluyendo un estudio comparativo de dos clasificadores.

El capítulo 5 describe el algoritmo de detección de bólidos. Los capítulos 6 y 7 detallan los algoritmos de calibración astrométrica y fotométrica, respectivamente, necesarios para el procesamiento de bólidos detectados. Este último punto se describe en el capítulo 8.

El capítulo 9 contiene los resultados de la aplicación de los algoritmos de los capítulos 5 al 8 a situaciones reales, es decir, a imágenes y videos generados por el sistema instalado en el OALM.

Finalmente, el capítulo 10 contiene las conclusiones del presente trabajo, y las perspectivas que se abren a futuro en relación a este campo de investigación en nuestro país.

2 Antecedentes

2.1 Prototipo 1

El hardware de este sistema fue desarrollado por Alberto Ceretta (técnico del OALM). El software fue desarrollado en el marco del Proyecto de grado de Ingeniería en Sistemas de la Facultad de Ingeniería de Freddy Kugelmass y Graciela Chelle (Kugelmass & Chelle, 2004).

Se trata de un trabajo desarrollado en 2004, pensado originalmente para formar parte del proyecto para la búsqueda de objetos cercanos a la Tierra (NEO por sus siglas en inglés -*Near Earth Objects*-) llamado BUSCA (Búsqueda Uruguaya de Supernovas, Cometas y Asteroides).

En el resumen de este trabajo se indican las características que debía tener el sistema:

- “Controlar una cámara tipo “All Sky”.
- Adquirir imágenes periódicas diurnas y nocturnas.
- Procesar las imágenes para el cálculo del porcentaje de nubosidad.
- Procesar las imágenes para el análisis de detección de bólidos.
- Reportar periódicamente a un sitio en Internet los resultados obtenidos del procesamiento y análisis de las imágenes tomadas por la cámara según las funcionalidades” (Kugelmass & Chelle, 2004).

De aquí se desprende que las características del SADNB propuestas originalmente son muy similares a las del sistema desarrollado en este proyecto.

El hardware utilizado incluía una webcam color modificada, de forma tal de poder fijar el tiempo de exposición. La cámara estaba montada sobre un espejo, el cual se encontraba dentro de un gabinete, el cual, a su vez, contenía un mecanismo de apertura y cierre para proteger el espejo y demás componentes al interior del gabinete, de la lluvia. Además, el sistema contaba con un dispositivo automático para ocultar el sol y la luna. La construcción del dispositivo, denominado “Gabinete”, estuvo a cargo de Alberto Ceretta. La **Figura 10** es una imagen del Gabinete en esta primera etapa.



Figura 10: Primera etapa del Gabinete, utilizado para el SADNB (Tancredi & Tulic, 2007).

Algunas funcionalidades del hardware del sistema tuvieron algunas dificultades, en particular el sistema de ocultamiento del sol y la luna:

“Originalmente la cámara se ayuda de un sistema mecánico para ocultar el sol y la luna. El mismo no resultó ni eficiente (se trancaba por ser muy susceptible a las inclemencias del tiempo) ni eficaz (su uso imponía una pérdida de una fracción importante del cielo en las fotos), por lo que se optó eliminarlo lo cual puso límites al análisis nocturno, en tanto se diseñaba un sistema mejor” (Kugelmass & Chelle, 2004).

Más adelante se señala que, debido a demoras en el desarrollo del algoritmo de detección de bólidos, se decidió descartar esa funcionalidad. En cuanto a la determinación de nubosidad nocturna, se limitó a su determinación en “noches sin luna o períodos nocturnos donde la luna no es visible”, determinándose sólo si la FN es 0 o 100%.

El software implementado controlaba además algunas funcionalidades del “Gabinete”, como por ejemplo la apertura y cierre de la tapa de la caja metálica que contenía el espejo y la cámara montada sobre el mismo, y monitoreaba las señales proporcionadas por los sensores de una pequeña estación meteorológica ubicada junto al “Gabinete” (anemómetro, termómetro, detector de lluvias).

El software de adquisición de imágenes y la implementación del algoritmo de determinación de FN fueron desarrollados en ANSI C para un entorno Windows (Kugelmass & Chelle, 2004).

Dado que se utilizó una cámara web color, el algoritmo de determinación de FN se basaba en establecer empíricamente umbrales del cociente del componente rojo con azul y verde (R/B y R/G). Este método es la base de la gran mayoría de los algoritmos implementados para determinar FN a partir de imágenes todo cielo (ver por ej. Huo & Lu, 2009, Calbó & Sabburg, 2008, Pfister et al, 2003), posible únicamente en imágenes tomadas con una cámara color.

La **Figura 11** muestra una captura de pantalla del software. A la izquierda se muestra la imagen diurna original. La imagen de la derecha muestra la identificación de píxeles nubosos (rojo) y de cielo despejado (azules).

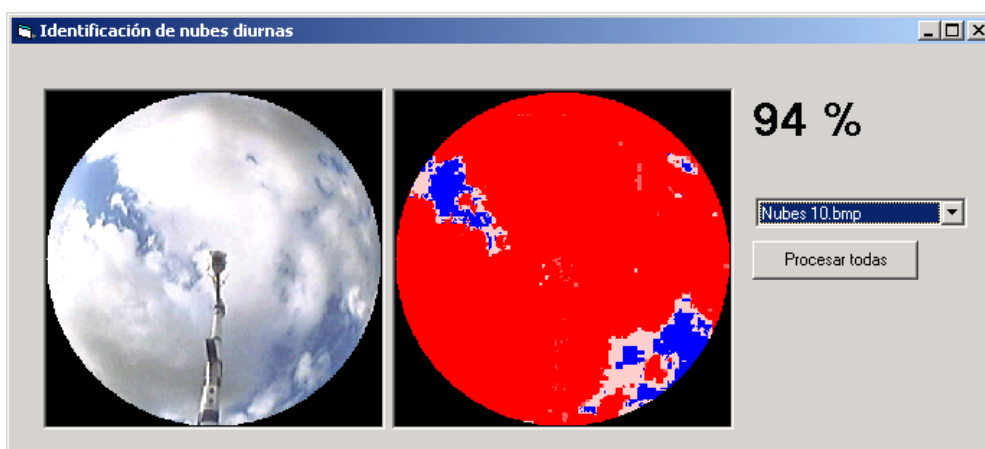


Figura 11: Imagen original y FN obtenida con SADNB (Fuente: Kugelmass y Chelle, 2004).

En el apartado final de Kugelmass & Chelle (2004), titulado “Perspectivas futuras”, se sugiere realizar varios ajustes de hardware (“uso de un anillo de obturación, el tener una disposición tal que mantenga los insectos alejados del calentador del espejo, y a las aves lejos del mismo”), así como “una revisión de algunos de los métodos empleados en este proyecto”, con la perspectiva de un desarrollo ulterior de este sistema, y su replicabilidad en otros puntos del país.

Las ventajas de este primer prototipo están vinculadas a la determinación de la fracción de nubosidad, por cuanto se utilizaba una cámara color, aunque sin un sistema de ocultamiento del sol, que funcionara en forma satisfactoria. Sin embargo, el trabajo no incluye una discusión acerca de los resultados del algoritmo empleado para la determinación de fracción de nubosidad, por lo cual no se dispone de información suficiente como para compararlo con otros trabajos previos y posteriores (por ejemplo Huo & Lu, 2009, Calbó & Sabburg, 2008, Pfister et al, 2003, entre otros).

La principal desventaja refiere a la complejidad del sistema de apertura y cierre del gabinete, lo cual reduce significativamente su replicabilidad en gran escala.

Posteriormente, en el marco de su trabajo especial de Licenciatura en Física (opción Astronomía), J.C. Tulic realizó un desarrollo de software de detección de bólidos, a partir de la detección de trazas en imágenes de larga exposición, utilizando un algoritmo que utilizaba la transformada de Hough.

El algoritmo era capaz de detectar por ejemplo aviones, tal como se muestra en las figuras **Figura 12-Figura 14**.

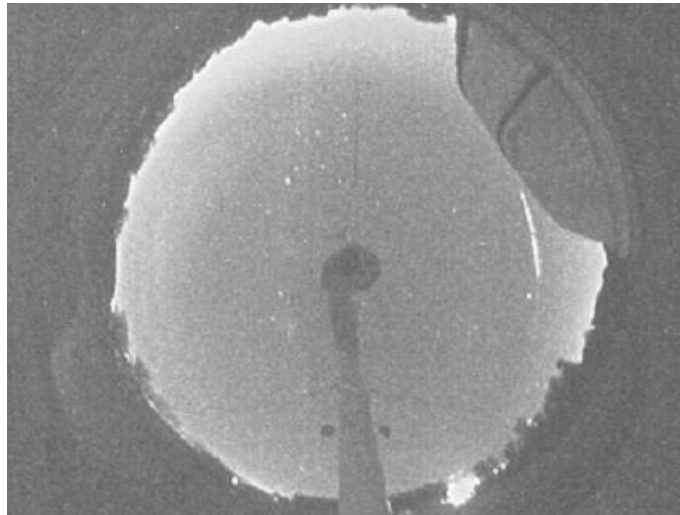


Figura 12: Traza producida por el pasaje de un avión (Fuente: Tulic, 2007).

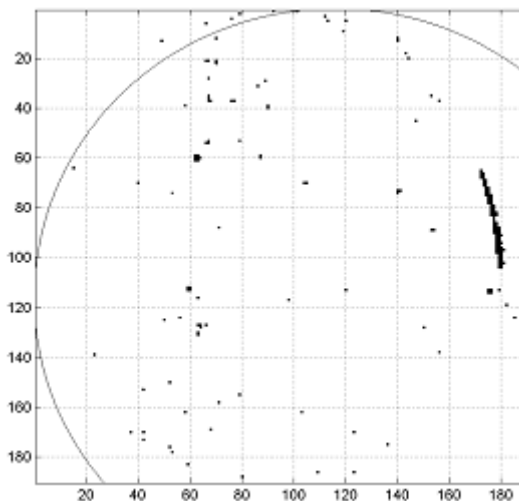


Figura 13: Imagen binaria de la traza de la **Figura 12**, incluyendo estrellas (Fuente: Tulic, 2007).

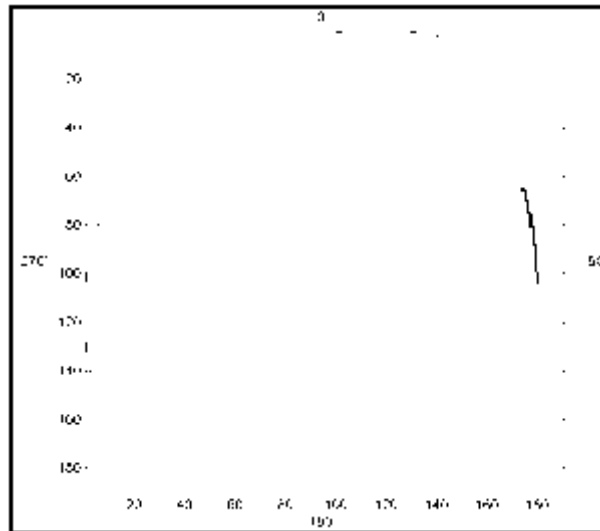


Figura 14: Reconstrucción de la traza de la **Figura 12**, a partir de las coordenadas horizontales del avión obtenidas (Fuente: Tulic, 2007).

El sistema no estuvo operativo durante un lapso lo suficientemente prolongado de tiempo como para evaluar los resultados. De todos modos, cabe destacar que la utilización de imágenes de larga exposición no mejora la sensibilidad en lo que refiere a detección de bólidos, por cuanto éstos son eventos demasiado rápidos como para ocupar el mismo pixel durante un tiempo lo suficientemente largo. Es decir, la complejidad del algoritmo empleado no se justificaba, ya que el utilizar un algoritmo basado en una imagen estática para analizar eventos rápidos no genera ningún beneficio en términos de sensibilidad y consiguiente optimización de la probabilidad de detectar un bolido.

2.2 Prototipo 2

El diseño del Gabinete mencionado en el apartado anterior sufrió varias modificaciones más adelante, a saber:

“El cambio de una cámara web CCD por una cámara CCTV de mayor sensibilidad.

(Empleo de un) “espejo de seguridad para intemperie”, haciéndose innecesario un gabinete protector.

“Se cambió la caja de plástico, por una caja metalizada completamente estanca donde se alberga la PC y componentes electrónicos” (Ceretta, Tancredi & Figueres, 2007).

Esta versión fue desarrollada en 2007, y se concentraba en el registro de bólidos, dejando a un lado la determinación de FN diurna o nocturna. La cámara CCTV empleada tenía una sensibilidad de 0.001 lux, y era en blanco y negro. Se utilizó además “un espejo de poli carbonato para intemperie, de 32 cm de diámetro, de procedencia Norteamericana”. La desventaja que presentaba este espejo era la “reducción del campo ya que abarca 140° de cielo”, aunque se señalaba que esto no presentaba “un gran inconveniente ya que por lo menos 30° alrededor del horizonte los datos no son confiables y por lo general descartados” (Ceretta, Tancredi & Figueres, 2007).

En cuanto al software utilizado en este prototipo, se señala en Ceretta, Tancredi & Figueres, (2007) que se encontraba “en desarrollo”, empleándose el software que incluía la tarjeta de captura (TP-0430, 4 entradas, 30 fps) y que posibilitaba, además de “guardar en video cuando detectaba un evento”, determinar “cuánto tiempo antes que ocurra el evento se guardará el video y cuánto tiempo después de finalizado el evento terminará el video guardado. Además se establece el nivel de sensibilidad al movimiento que iniciara el registro del evento, y se puede limitar el área de sensibilidad, es decir si en el campo de la cámara se encuentra un árbol que se mueve con el viento, una luz intermitente a lo lejos, se pueden excluir esas zonas de las zonas que controla la aparición de algún movimiento” (Ceretta, Tancredi & Figueres, 2007).

En Ceretta, Tancredi & Figueres (2007) se incluye además un rubrado de costos del sistema, los cuales se muestran en la **Tabla 13** del Anexo I: Costos de los primeros prototipos.

Es de destacar el costo de la tarjeta de captura de video, el cual hoy ronda los US\$ 100 (~\$U 2.000) para una tarjeta significativamente mejor a la empleada entonces, y que es la misma que fue utilizada en el presente trabajo. Es importante señalar esto teniendo en cuenta el futuro despliegue de más sistemas similares al propuesto aquí, en otros puntos del país. La **Figura 15** muestra una imagen de este prototipo.



Figura 15: Prototipo basado en cámara CCTV y espejo de policarbonato (Ceretta, Tancredi & Figueres, 2007).

2.3 Primer prototipo ojo de pez

El presente trabajo comenzó a principios de 2009, al definirse el tema de la presente tesis. Poco después, comenzó un proceso de familiarización con los equipos que conformaban la segunda versión del “Gabinete” (ver **Figura 15**), la cámara CCTV y el espejo de policarbonato.

Más tarde, al disponer de dinero para adquirir una cámara de mayor sensibilidad y una lente ojo de pez, se optó por diseñar un sistema todo cielo basándose en este tipo de cámaras, denominado sistema de *refracción* (por involucrar una lente), en oposición al prototipo anterior denominado de *reflexión* (por involucrar un espejo).

Así fue que se comenzó a trabajar en el desarrollo de los métodos y funciones (implementados en MATLAB) que iban a ser empleados en la generación de imágenes de pseudo-larga exposición, obtención de la función de mapeo de un sistema de refracción, y determinación del radiante de un bólido a partir de dos o más registros de un mismo evento. Para este último paso se dispuso de dos videos de un bólido registrado en las ciudades de Yuba y Rocklin, en California, el 7/4/2009. El objetivo que se perseguía, además, era determinar si podía existir un vínculo entre este bólido y el bólido de Pribram, acaecido el 7/4/1958 en la entonces Checoslovaquia (hoy República Checa). Si bien los resultados arrojados no pudieron verificar un vínculo entre el radiante de uno y otro evento, fue la primera experiencia del estudiante en el desarrollo de software vinculado a la temática, y por ello fue de suma importancia.

El principal desafío desde el punto de vista del diseño del nuevo sistema era la necesidad de incluir un domo protector de la cámara y la lente, que, al estar a la intemperie, debía disponer de un sistema que evitara la formación de rocío y condensación sobre las paredes exterior e interior del domo.

Se realizó un primer diseño del gabinete de la cámara, consistente en una base cilíndrica a la cual iría atornillada un domo, según se muestra en la Figura 16:

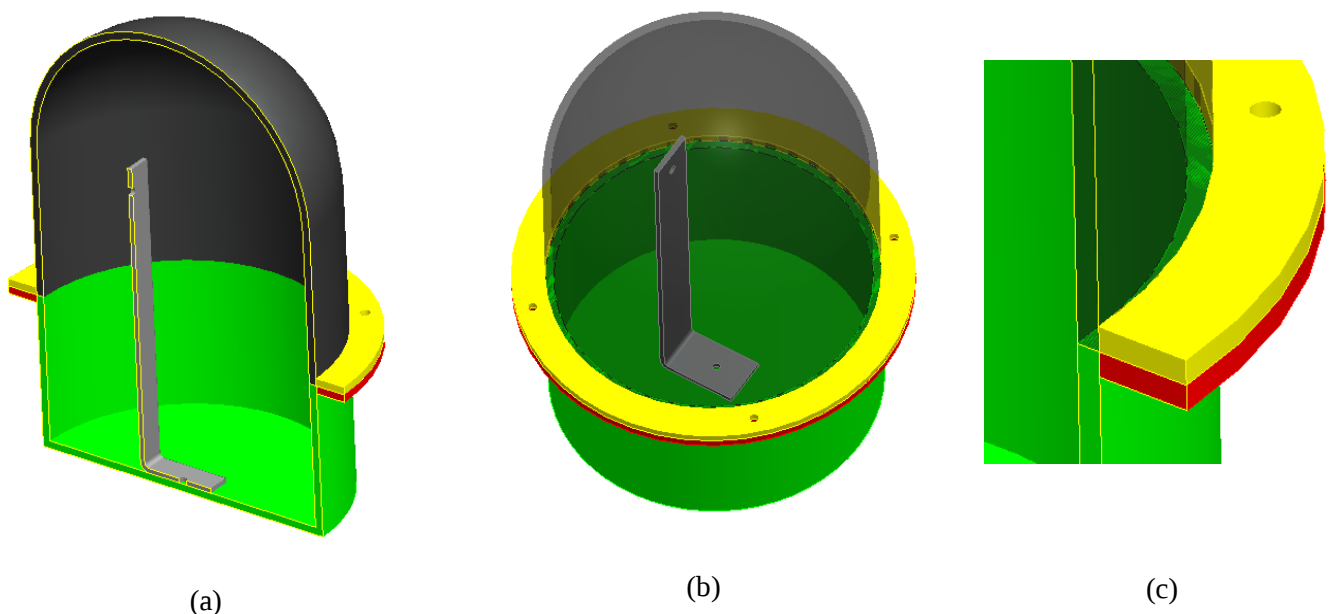


Figura 16: Diseño de gabinete de primer prototipo. (a) Corte transversal, en perspectiva. (b) Vista exterior, en perspectiva. (c) Vista de la unión entre domo y cilindro base.

Se buscaba con este diseño un fácil montaje y desmontaje del domo, que permitiera acceder a la cámara y demás componentes que fueran a ubicarse dentro del gabinete. La pieza en forma de “L” que se observa en las figuras, sería la que sostendría la cámara y la lente, a través del orificio superior y un bulón adecuado.

En la base de la “L” iría ubicado un ventilador de PC, a los efectos de evitar la condensación de agua sobre la pared interior del domo.

Una vez finalizado el diseño, se optó por realizar la base cilíndrica, el domo y la pieza en forma de “L” en acrílico, considerando que es el material más usado en domos protectores de este tipo (ver por ejemplo **Figura 17**).



Figura 17: Gabinete de cámara MASCOT, ubicada en el Observatorio Paranal (Rondi, 2002).

La

Tabla 14 en el Anexo I: Costos de los primeros prototipos. muestra un rubrado de los costos asociados a este primer prototipo:

El principal problema de este diseño lo significó la degradación UV del material. El problema fue tal que al cabo de unos cuatro meses fue preciso cambiar el domo, ya que había adoptado una coloración amarillenta y se observaban algunas rajaduras en la unión entre domo y cilindro.

Dado el relativamente alto costo de mantenimiento que implicaba cambiar el domo de acrílico cada cuatro meses, se optó por utilizar un globo de vidrio, utilizado en faroles exteriores. La Tabla 1 es una tabla comparativa de ambas opciones, de donde se deduce que la principal ventaja del acrílico tiene que ver con una mejor calidad de imagen (menor distorsión de la misma debido a superficie más regular que la del globo de vidrio), a un costo económico mayor.

	Ventajas	Desventajas
Domo Acrílico	• Índice de refracción: 1.491 a	• Degradación UV muy alta.

	589.3 nm (Nordling & Österman, 2002). • Muy poca distorsión de imagen.	• Menor resistencia mecánica que el vidrio.
Globo Vidrio	• Degradación UV nula. • Muy buena resistencia mecánica.	• Mayor distorsión de imagen. • Índice de refracción: 1.510 a 589.3 nm (Nordling & Österman, 2002).

Tabla 1: Tabla comparativa de globo de vidrio y domo de acrílico.

En cuanto a la transmisividad óptica de ambos materiales, ella depende del coeficiente de extinción y del índice de refracción, para un espesor dado. Si solamente consideramos efectos de reflexión, no hay diferencias significativas entre el acrílico y el vidrio, siendo la transmisividad de 85 y 86%, respectivamente (Duffie & Beckman, 2001).

Una vez que se hubo optado por utilizar un globo de vidrio, el siguiente desafío fue cómo adaptarlo al cilindro de acrílico de forma tal que la unión entre ambas piezas garantizara una estanquidad total del gabinete en su conjunto.

Luego de muchas pruebas se logró una estanquidad² aceptable, adhiriendo el aro del domo de acrílico (que había sido despegado de este último) al globo de vidrio, con silicona. La unión al cilindro seguía el mismo principio que antes, es decir, el aro del cilindro se atornillaba al aro del globo y de esa manera se mantenía la posibilidad de desmontar el gabinete para eventuales trabajos de mantenimiento y/o ajustes de la cámara, lente y demás componentes al interior del gabinete.

Se implementó un sistema anti-rocío utilizando trozos de alambre Kanthal (hilo utilizado en resistencias eléctricas), que no estaban en contacto físico con el globo sino en puntos específicos a lo largo de su base, a donde estaba adherido con silicona para altas temperaturas.

La **Figura 18** muestra el sistema montado en el OALM, indicándose las principales partes del sistema. Esta primera versión estuvo operativa, aunque de forma interrumpida por diversas causas, entre setiembre de 2011 y febrero de 2012.

El software que se utilizaba entonces era Active Webcam, un software de video-vigilancia que permite programar distintas tareas, como por ejemplo obtener imágenes durante el día, y detectar movimiento durante la noche.

En este período, hubo que afrontar dos grandes problemas, a saber:

- Desempeño insatisfactorio del software, en particular en lo referente a detección de bólidos: durante los seis meses que estuvo operativo el sistema (de forma interrumpida), se registraron eventos de diverso tipo (sobrevuelo de pájaros,

² estanquidad: cualidad de estanco (definición de la RAE). Una de las acepciones de “estanco”, según la RAE, aplicada a embarcaciones, es “que se halla bien dispuesta y reparada para no hacer agua por sus costuras”. En el presente contexto se utiliza en el sentido de no permitir entrada de agua o polvo.

movimiento de insectos sobre el globo de vidrio, rayos), pero no pudo registrarse un solo bólido. Tampoco fue posible detectar aviones, algo que el Prototipo 2 sí detectaba. Por otra parte, los videos de eventos eran grabados a una velocidad de cuadros muy baja (~ 5 fps), teniendo estos videos varios “drops”, es decir, cuadros no registrados.

- Durante algunas noches frías que hubo en este período, el sistema anti-rocío y anti condensación no funcionó de forma satisfactoria.

Las medidas que se tomaron para solucionar el primer problema fueron:

- Cambio de PC, introduciendo mejoras en el hardware: se pasó de 256 Mb de memoria RAM, a 512 Mb, y de un procesador de 900 MHz a uno de 1.6 GHz, utilizando además dos discos duros físicos.
- Adquisición de tres cámaras CCTV de mayor sensibilidad, marca Watec (origen: Japón). Esta compra fue posible gracias a fondos provenientes de PEDECIBA Geociencias. Lo que se buscaba con esta mejora, era incrementar la probabilidad de detección de bólidos a través de una mayor sensibilidad de la cámara.

Sin embargo, dado que se siguió adoleciendo del problema de la velocidad de cuadros y de “drops”, se concluyó que la principal causa del problema debía estar en el software de video-vigilancia, por lo cual se comenzó a desarrollar una aplicación propia, que se detalla más adelante en el presente informe. En cualquier caso, las mejoras en el hardware sin duda significaron un importante salto cualitativo.

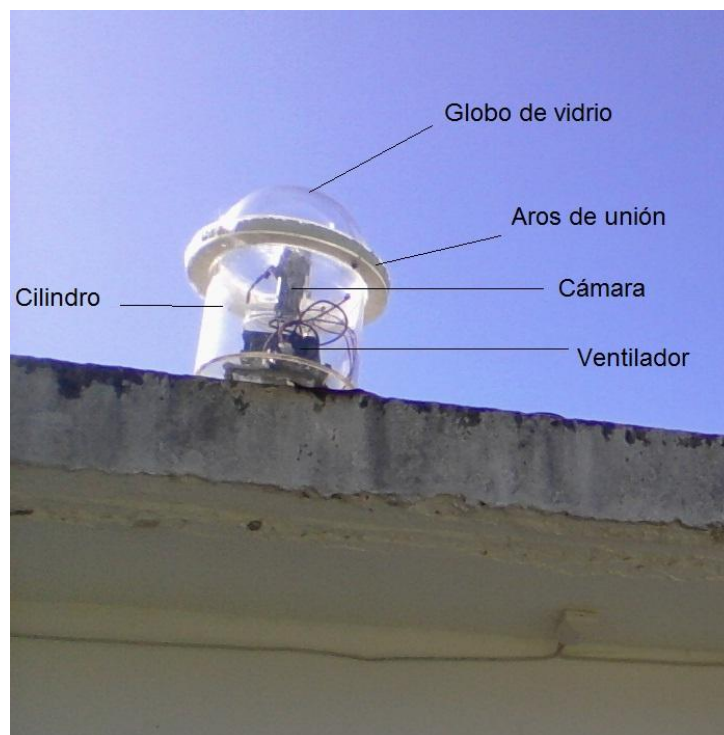


Figura 18: Sistema montado en el OALM entre 09/2011-02/2012.

3 Construcción y diseño

Desde el punto de vista del diseño, la experiencia adquirida con el desarrollo del primer prototipo permitió definir claramente los principales criterios del nuevo diseño. Así fue que se decidió diseñar un nuevo prototipo para las nuevas cámaras adquiridas, cuya principal característica debía ser un alto grado de replicabilidad, teniendo en cuenta el desarrollo de una red nacional de sistemas idénticos al prototipo desarrollado.

Esto ponía un fuerte énfasis en dos aspectos:

- Minimizar costos.
- Utilización de componentes/procesos de fácil adquisición e implementación en la plaza local.

Los criterios que rigieron el diseño del nuevo prototipo son:

- Mayor grado de estanquidad posible.
- Fácil montaje y desmontaje.
- Minimizar mantenimiento.
- Minimizar consecuencias de degradación UV de gabinete.
- Funcionamiento 24-7-365 (las 24 horas del día, 7 días a la semana, los 365 días del año).

El primer punto resulta bastante obvio, ya que tanto el polvo como la humedad deterioran el desempeño de los sistemas ópticos y electrónicos. El segundo punto también es relevante, sobre todo al comienzo del funcionamiento del sistema y su puesta a punto, pero también ante la eventualidad de reponer algún componente dañado en el interior del gabinete. El tercer punto resulta de fundamental importancia, sobre todo para aquellas cámaras que serán instaladas en puntos alejados de la capital.

Los efectos de la degradación UV se pusieron de manifiesto durante el funcionamiento del primer prototipo, con la degradación del acrílico. Finalmente, fue preciso en todo momento tener en cuenta el último punto, vinculado además a todos los anteriores.

3.1 Gabinete protector

El diseño del gabinete protector se ilustra en la **Figura 19**:

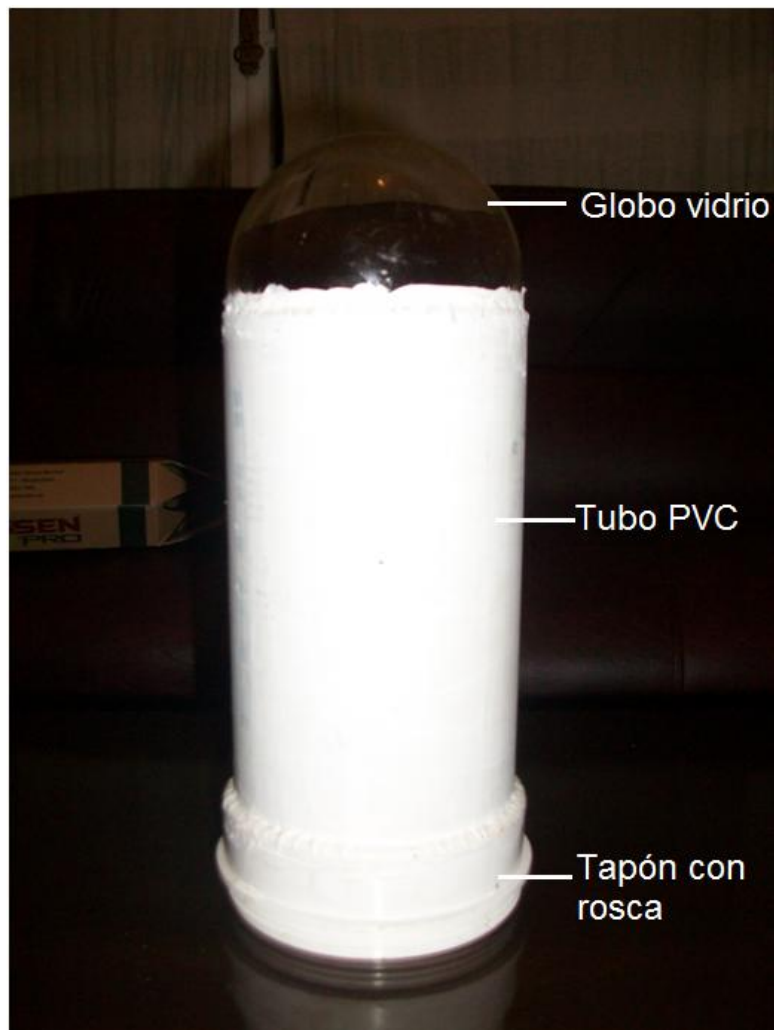


Figura 19: Gabinete de prototipo definitivo, donde se indican sus tres principales partes.

El globo de vidrio es de 7 cm de diámetro de base, y es del tipo utilizado para faroles exteriores. El tubo de PVC es de 100 mm, para exterior, y mide 18 cm de largo. El tapón en la base es una tapa con rosca para caño de PVC-100. Los dos últimos componentes se adquieren fácilmente en cualquier comercio de venta de artículos sanitarios.

El globo de vidrio está pegado al tubo de PVC con membrana líquida aplicada a lo largo de la unión:

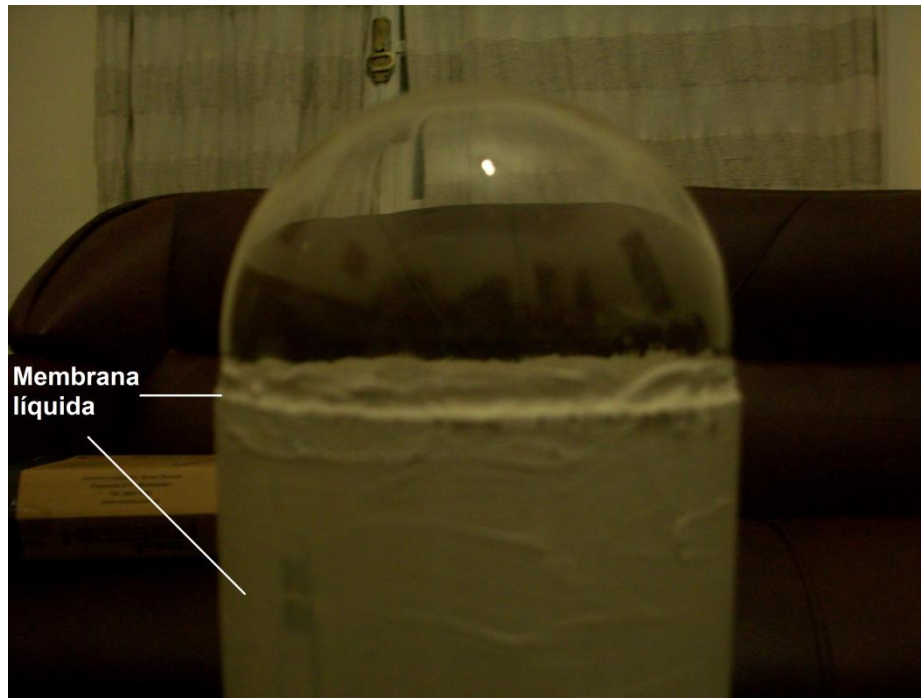


Figura 20: Unión del globo de vidrio con el tubo de PVC.

La estanquidad en esta junta quedó comprobada, rociándosela con agua y verificando que al interior del tubo y del vidrio no ingresó agua.

Considerando el criterio 4 de diseño, se pintó el tubo de PVC con membrana líquida, la cual brinda una protección extra al tubo, aun cuando éste es para exteriores y por ende posee en sí mismo una alta resistencia a la degradación UV. En total se aplicaron tres capas de membrana líquida, tanto en la junta como en el tubo, dejando secar cada mano 24 horas.

El segundo criterio de diseño quedó también garantizado al utilizarse la tapa con rosca, ya que el globo más el tubo, que conforman una sola pieza, son fácilmente desenroscables de la base.

3.2 Interior de gabinete

Los componentes que debían instalarse al interior del gabinete se muestran en la **Figura 21**:

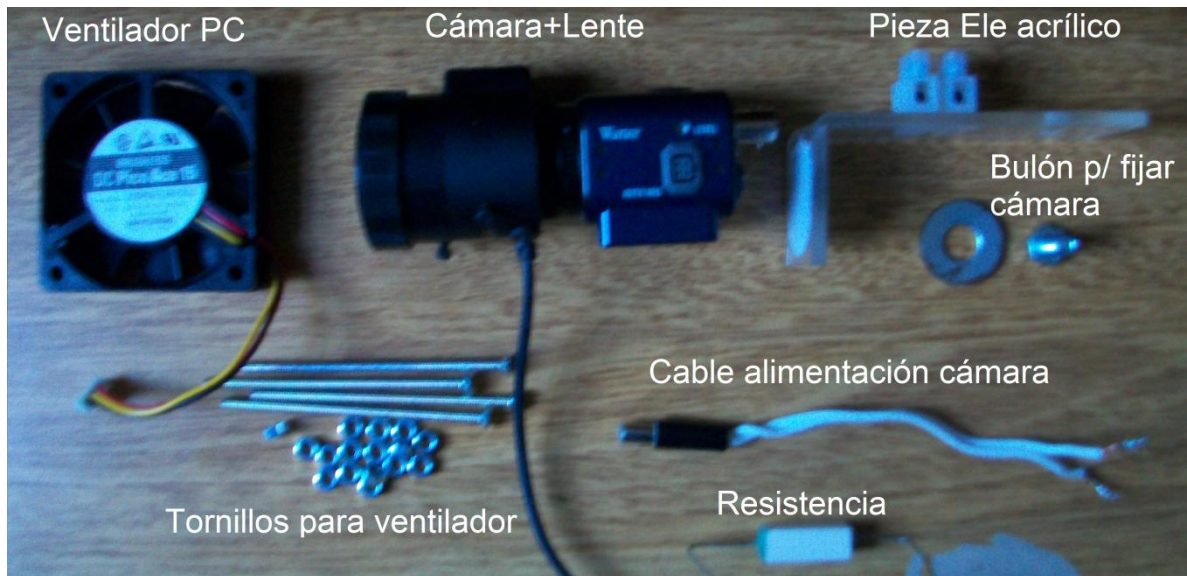


Figura 21: Piezas y componentes instalados en el interior del gabinete.

El ventilador PC utilizado es marca Sanyo-Denki línea Pico Ace 15, y sus dimensiones se muestran en la Figura 108 del Anexo II: Especificaciones técnicas y costos del nuevo diseño.. Las principales características técnicas de la cámara y la lente se indican en las Tablas **Tabla 15** y **Tabla 16**, respectivamente, en el Anexo II: Especificaciones técnicas y costos del nuevo diseño., mientras que sus dimensiones se muestran en las Figuras **Figura 109-Figura 110** del mismo anexo. Las dimensiones de la pieza en forma de “L” de acrílico se muestran en la Figura 111 del citado anexo.

El montaje de estos componentes se muestra en la **Figura 22**:



Figura 22: Montaje de componentes al interior del gabinete.

Si bien en este prototipo las dos resistencias que conforman el sistema de calentamiento del globo de vidrio fueron colocadas sobre éste después de haberlo pegado al tubo de PVC, resultó bastante incómodo manipular esta pieza (globo y tubo), por lo que en las próximas construcciones se colocará primero las resistencias, y luego se pegará el globo al tubo.

Las resistencias se pegaron sobre la pared interior del globo, con adhesivo Poxipol. Los cables de alimentación de las resistencias “salen” del gabinete mediante orificios de 4mm sobre las paredes del tubo de PVC, para que, al desenroscar el tubo (y el globo), los cables de las resistencias no se enrosquen sobre sí mismos y/o sobre la cámara. La **Figura 23** muestra cómo están colocadas las resistencias:

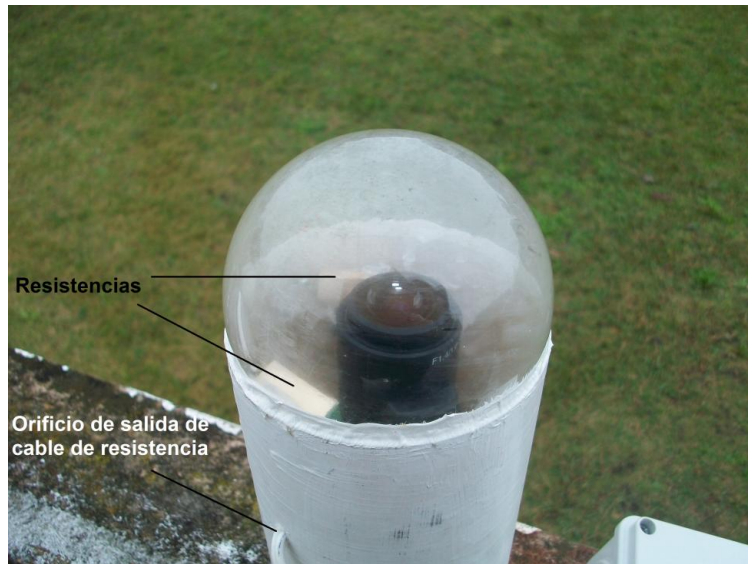


Figura 23: Ubicación de las resistencias, sobre la pared interior del globo de vidrio.

A la bornera (“dado”) pegada sobre la “L” de acrílico (ver **Figura 22**) se conectan, de un lado, el ventilador y el cable de alimentación a la cámara, y del otro un cable de $2 \times 1.5 \text{ mm}^2$ que sale del gabinete hasta una caja exterior estanca. En el interior de esta caja se encuentra otra bornera, donde se conectan los cables de las resistencias más el par de alimentación de cámara y ventilador. Finalmente, de la caja estanca sale un cable de $2 \times 1.5 \text{ mm}^2$ que va hasta la sala donde se encuentra la fuente (rectificador) que alimenta el sistema. La **Figura 24** muestra el sistema montado sobre el techo del OALM. Se puede apreciar la caja exterior estanca y los cables descritos.



Figura 24: Prototipo definitivo montado sobre el OALM.

3.3 Esquema eléctrico

El esquema eléctrico del sistema se muestra en la Figura 112 del Anexo II: Especificaciones técnicas y costos del nuevo diseño.

La medición de las resistencias indicadas en el esquema arrojó valores de $R_1=43.4\ \Omega$ y $R_2=40.4\ \Omega$, con lo cual las corrientes correspondientes (asumiendo un voltaje de suministro igual al nominal) son $I_1 = 276\ \text{mA}$ e $I_2 = 297\ \text{mA}$, con lo cual el consumo total del sistema es de 768 mA. Agregando un 25 % se llega a 960 mA, con lo cual un rectificador de 12 V y 1 A es suficiente.

Es de fundamental importancia utilizar rectificadores de buena calidad, ya que la cámara es particularmente sensible a variaciones de voltaje (*ripple*). En la hoja técnica de la Watec 902 H3 Ultimate se especifica que las variaciones no podrán superar el 10 % del valor nominal, es decir, se deberá mantener en $12\ \text{V} \pm 1.2\ \text{V}$.

3.4 Sistema anti-rocío

El sistema anti-rocío y anti-condensación está compuesto, como ya se ha indicado, por un ventilador de PC más dos resistencias de 39 Ω nominales.

Las características técnicas del ventilador se indican en la Tabla 17 del Anexo II. Cabe destacar la vida media del ventilador, equivalente a 2500 días, o casi 7 años.

La potencia eléctrica de las resistencias es de $P_1=3,32\ \text{W}$ y $P_2=3,56\ \text{W}$, es decir, un total de $P = 6,88\ \text{W}$. Asumiendo una eficiencia del 90%, el sistema entrega una potencia térmica de 6,19 Wth.

De acuerdo a los datos históricos de W-Underground, la temperatura mínima registrada en Montevideo durante el período 1/5/2012-23/6/2012 fue de -1°C , mientras que el punto mínimo de rocío se situó en -4°C (Weather Underground, 2012). Se puede garantizar, pues, que el sistema funciona correctamente hasta al menos estos valores mínimos.

3.5 Costos del sistema

A fin de poder evaluar la replicabilidad del prototipo propuesto en este trabajo, se detalla en el Anexo II un rubrado de sus principales componentes.

Destaca en ese rubrado la notoria reducción de costos en los componentes que conforman el gabinete en la Tabla 18 del Anexo II, vale decir, el globo, el tubo PVC y la tapa con rosca (\$U 450), con respecto a los del primer prototipo (\$U 1.200, ver

Tabla 14 en el Anexo I), o con los del Proyecto B.U.S.C.A (\$U ~3.300, ver Tabla 13). La razón es que como es sabido, el PVC es una opción mucho más económica que el aluminio o el acrílico.

Si incluimos el costo de una PC y un dispositivo de captura de video, el monto total por estación asciende a unos US\$ 953, incluyendo impuestos, tal como se muestra en el rubrado de la **Tabla 19** del Anexo II. Es preciso aclarar que aun cuando la inclusión de

un monitor no es absolutamente necesaria, su impacto en el monto global es despreciable, por lo que se lo incluye en el rubrado.

4 Determinación de FN

4.1 Introducción

Como se señaló en el apartado 2.1, la gran mayoría de los algoritmos existentes para la determinación de FN a partir de imágenes todo cielo, se basan en el cociente R/B (rojo/azul) y/o R/G (rojo/verde) en imágenes color.

La función principal del sistema desarrollado en el presente trabajo es la detección y post-procesamiento de bólidos, por lo que se utilizó una cámara blanco y negro, que en general poseen mayor sensibilidad que las cámaras color. El desafío principal para el desarrollo de un algoritmo de determinación de FN a partir de imágenes blanco y negro, es que resulta imposible encontrar un umbral global, que permita la clasificación de píxeles en nubosos o despejados aplicable a las distintas situaciones de nubosidad.

A esta dificultad se añade el no disponer de un sistema de bloqueo del sol (cuya dificultad de implementación se comprobó en el desarrollo del Prototipo 1), con lo cual las imágenes en las que el sol no se encuentra cubierto por nubes contienen reflejos en el globo de vidrio que “contaminan” la imagen significativamente:

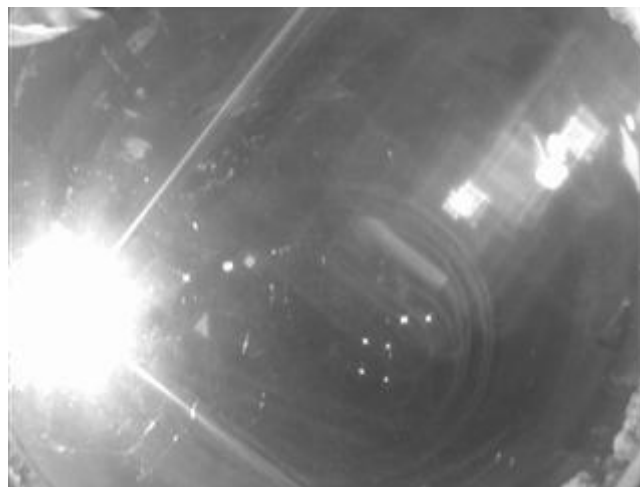


Figura 25: Imagen de cielo despejado, en la que se aprecian claramente reflejos en el globo de vidrio.

Por estas razones, fue necesario el desarrollo de un algoritmo que contemplara estas consideraciones, sin disponer de trabajos previos que pudieran servir como punto de partida.

En la presente sección, se presenta primero una descripción del problema, posteriormente se discuten posibles soluciones y resultados, y finalmente se da una descripción más detallada del algoritmo elegido.

4.2 Descripción del problema

Como se dijo anteriormente, la mayoría de los algoritmos para la obtención de la FN a partir de imágenes todo cielo color, se basan en la obtención de un umbral global, por debajo del cual un pixel es clasificado como cielo, y por encima del cual el pixel es clasificado como nuboso. Este umbral es obtenido empíricamente en base al estudio de imágenes, y en general se utiliza un valor de R/B para nubes opacas y de R/G para nubes ópticamente más finas.

La relativa complejidad en la determinación de FN a partir de imágenes todo cielo blanco y negro, se pone de manifiesto analizando las figuras **Figura 26-Figura 28**. Estas imágenes muestran a la izquierda la imagen original, y a la derecha la obtenida a partir de la aplicación de un clasificador pixel-por-pixel, con un umbral obtenido a su vez mediante el método de Otsu y su implementación en MATLAB (función *graythresh*). El método de Otsu encuentra un umbral que maximiza la separación entre dos clases en el histograma de una imagen blanco y negro, a fin de poder distinguir objetos o figuras del fondo de la imagen. Una descripción completa del método se encuentra en Otsu (1979).

Como se puede ver en las imágenes, el método resulta satisfactorio en la situación de cielo parcialmente nublado, pero da resultados con un error inadmisiblemente alto en situaciones de cielo despejado o cubierto.

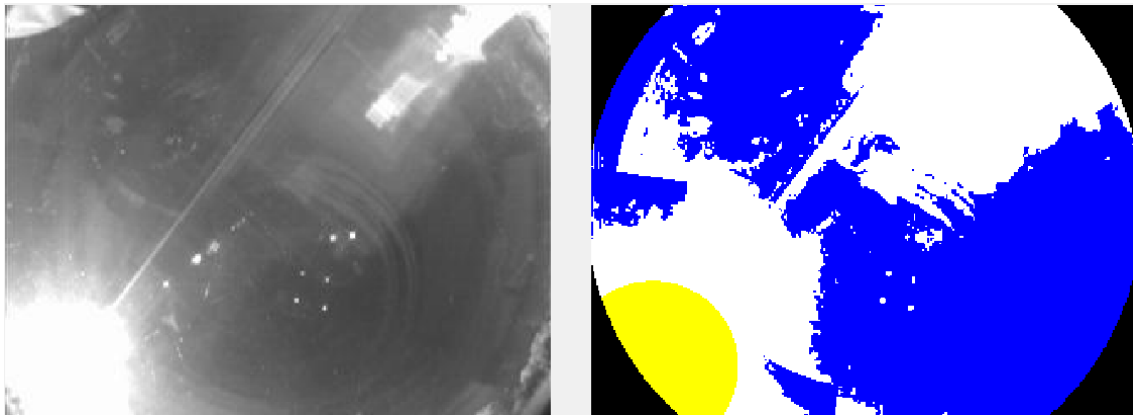


Figura 26: Imagen de cielo despejado. FN = 42%.

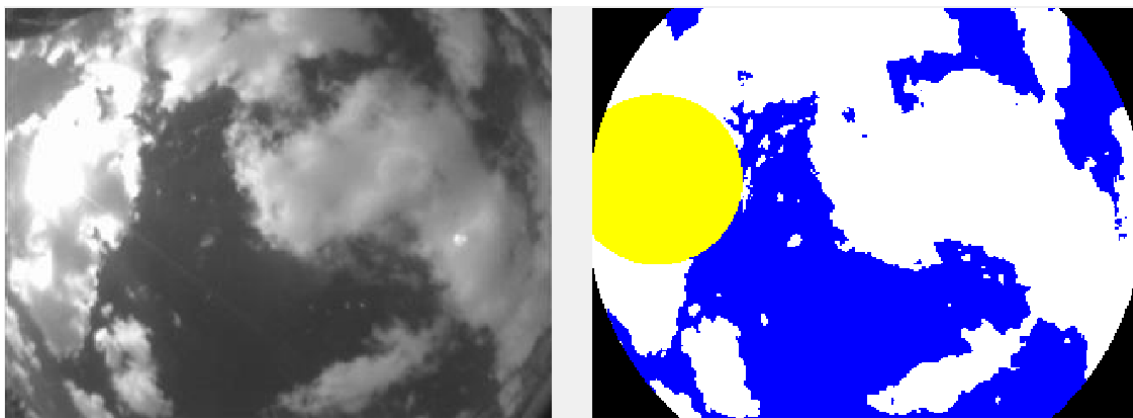


Figura 27: Imagen de cielo parcialmente nublado. FN = 57%

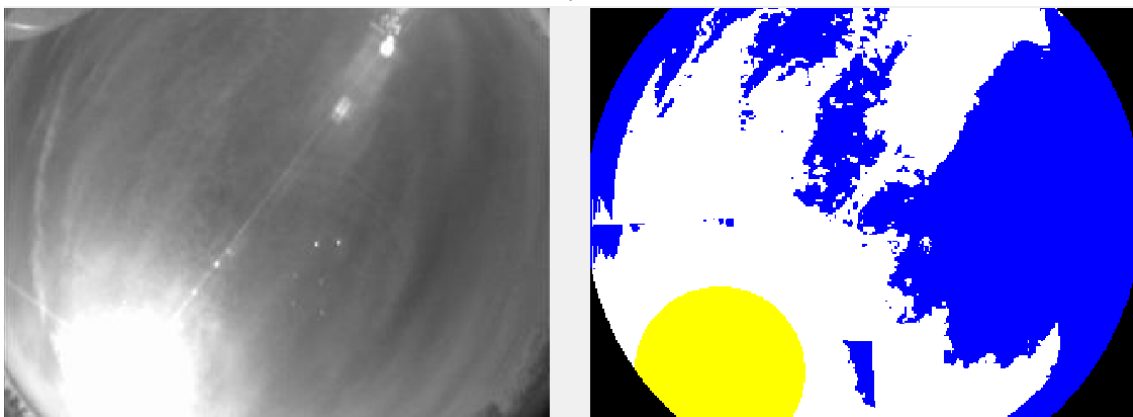


Figura 28: Imagen de cielo cubierto (nubes Cs). FN = 53%.

Resulta pues conveniente que el algoritmo empleado sepa discernir en primera instancia si la imagen es de cielo cubierto, despejado o parcialmente nublado, y en función de esa clasificación asigne una FN de 100%, 0% o la obtenida a partir de la utilización del umbral global, respectivamente.

Se trata entonces en primera instancia de un problema de reconocimiento de patrones, en los cuales identificamos tres clases: cubierto, despejado o parcialmente nublado. Antes de describir los dos clasificadores evaluados para realizar esta clasificación, es preciso hacer dos precisiones vinculadas al umbral global aplicado a imágenes de cielo parcialmente nublado.

En primer lugar, se encontró empíricamente que un umbral de 0.65 veces el valor arrojado por la función *graythresh* de MATLAB se adaptaba satisfactoriamente a la mayoría de las imágenes de la clase “parcialmente nublado”. En segundo lugar, se encontró también que resulta conveniente dividir la imagen dada en cinco zonas distintas, como muestra la **Figura 29**:

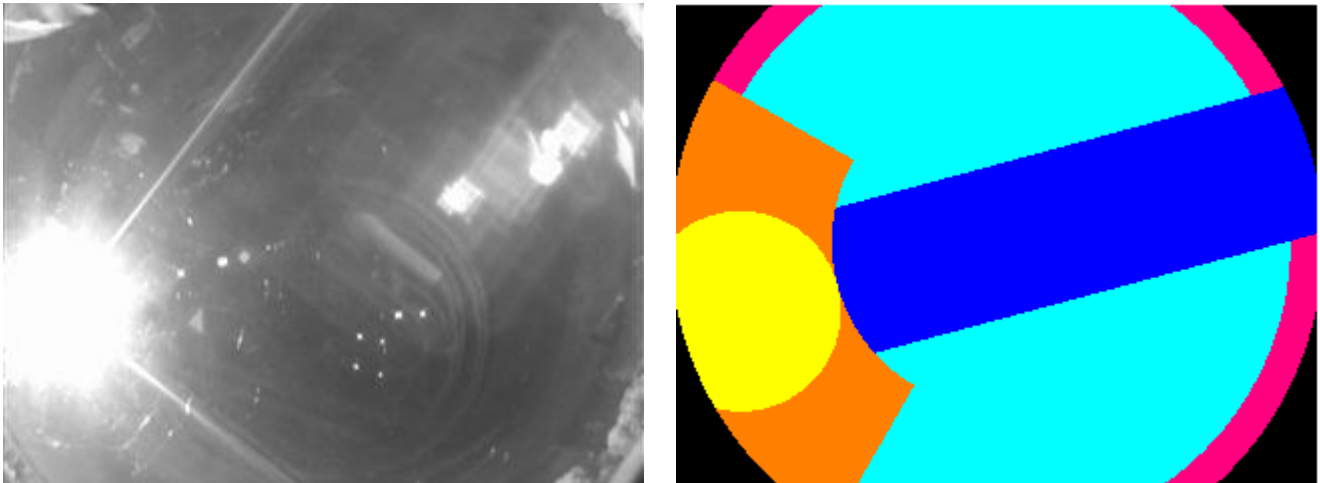


Figura 29: Imagen de cielo despejado (izquierda) y figura que muestra las distintas zonas consideradas de la imagen original (derecha).

En la Tabla 2 se describe el nombre de las distintas zonas, su color en la **Figura 29** y la condición geométrica que cumplen sus puntos. Para clarificar la última columna, se definen las siguientes variables:

- (i,j) son las coordenadas matriciales del pixel, es decir, las utilizadas por MATLAB en la matriz que representa la imagen.
- (x,y) son las coordenadas del punto: $(x,y)=(i,j)$.
- (xc,yc) es el centro de la circunferencia que conforma toda la porción de cielo en la imagen. El radio de esta circunferencia es R .
- (r,Az) son las coordenadas polares del punto en un sistema de coordenadas con el origen en (xc,yc) , el eje y orientado hacia arriba en la imagen, y el eje x orientado a la derecha.
- $(rSol, AzSol)$, son las coordenadas polares del sol.
- (xs,ys) son las coordenadas (x,y) del Sol.

Zona	Color	Condición geométrica.
Disco solar	Amarillo	$(i - y_s)^2 + (j - x_s)^2 \leq 50^2$
Solar	Naranja	y $r \geq r_{sol} - 50$ $ Az - Az_{sol} \leq 45^\circ$
Plano Solar	Azul	Sea sc la recta determinada por el centro del sol (x_s, y_s) y el cenit (x_c, y_c) . Los puntos $P(x, y)$ de esta zona cumplen: $d(P, sc) \leq 0.75 \cdot 50$
Horizonte	Magenta	$0.9 \cdot R_{min} \leq r \leq R_{min}$ donde R_{min} es el radio correspondiente al ángulo de elevación mínimo considerado.
Resto	Cian	$r \leq R_{min}$
Descartada	Negro	$R_{min} < r \leq R$

Tabla 2: Descripción de zonas consideradas por el algoritmo de determinación de FN

Es relevante el orden de las distintas zonas, pues es el seguido por el algoritmo, de manera que si un punto cumple una condición determinada, en seguida es asignado a la zona correspondiente, independientemente que pueda cumplir alguna de las condiciones que siguen a continuación en la tabla.

El motivo fundamental por el que se subdivide la imagen en distintas zonas es para poder introducir factores de corrección al umbral global para cada zona, dado que los pixeles de cielo despejado en las zonas próximas al sol y en el plano solar son en general más brillantes que los de la zona resto u horizonte.

Pero además, la subdivisión en estas zonas cumple un rol fundamental en los dos clasificadores de condiciones de cielo evaluados, como se ve en los apartados que siguen.

4.3 Clasificadores de condiciones de cielo

El algoritmo empleado, en líneas generales sigue el esquema de la Figura 30:

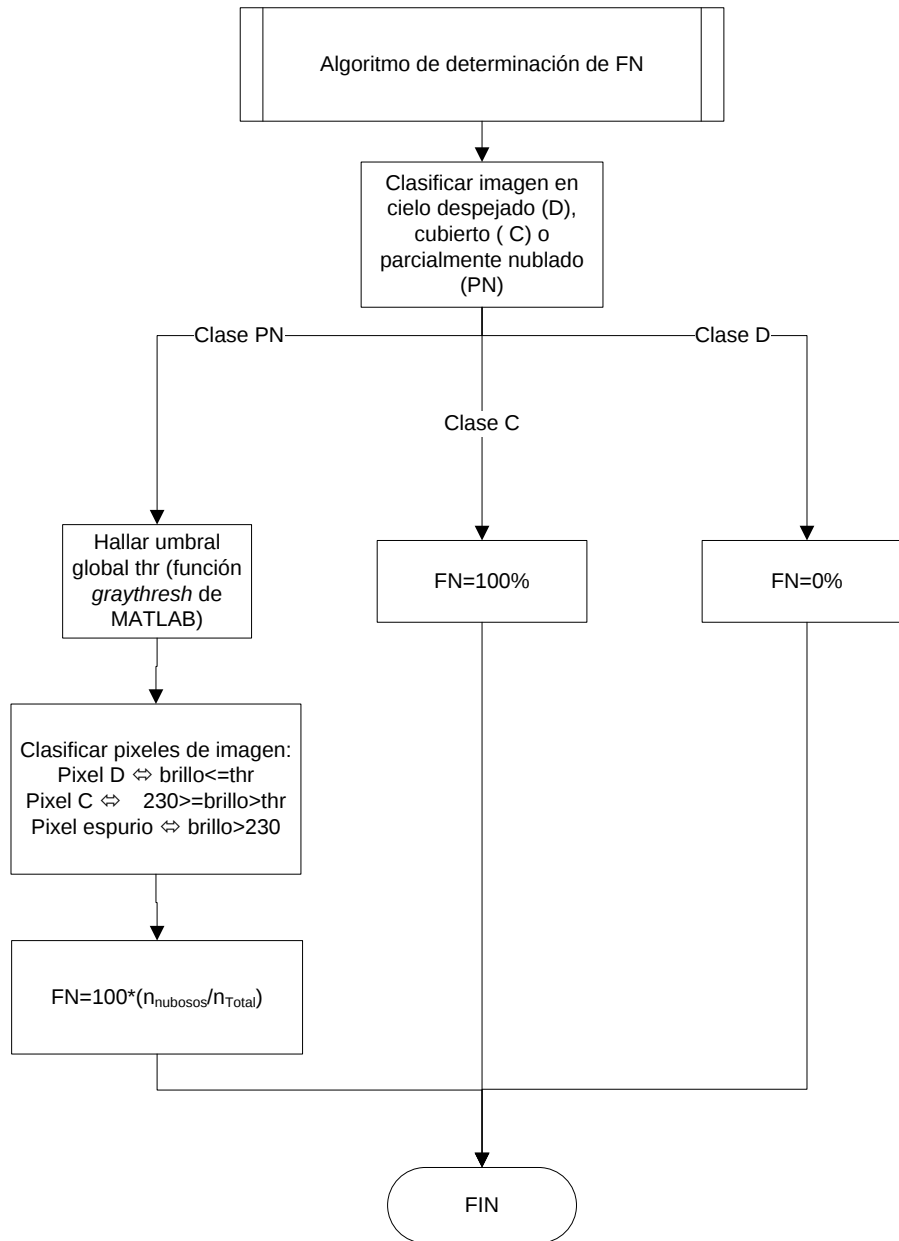


Figura 30: Esquema del algoritmo de determinación de nubosidad.

La clasificación de la imagen en cielo despejado (clase D), cubierto (C) o parcialmente nublado (PN) se basa en considerar el siguiente vector de características $\mathbf{x}$, que conforman el espacio de características Ψ del clasificador:

$$\mathbf{x} = [\mu \ \sigma \ N_r \ N_p] \in \Psi,$$

donde:

μ es la media de la imagen.

σ es la desviación estándar de la imagen.

N_r es el número de elementos distintos de cero en la zona “resto” de la imagen binaria obtenida a partir de la detección de bordes, mediante la función *edge* de MATLAB (ver más adelante).

N_p es el número de elementos distintos de cero en el plano solar de la imagen binaria obtenida a partir de la detección de bordes, mediante la función *edge* de MATLAB (ver más adelante).

Las dos primeras son *características espectrales*, que describen el brillo medio y las tonalidades de la imagen (Heinle, Macke, y Srivastav, 2010). Las dos últimas son características que refieren a la textura de la imagen, y están vinculadas al gradiente de la misma.

La **Figura 31** es una de estas imágenes binarias obtenidas mediante la función *edge* de MATLAB, aplicada a una imagen PN. Esta función engloba una familia de algoritmos que permiten la detección de bordes en una imagen blanco y negro. El algoritmo escogido en este trabajo es el detector de bordes Canny, que debe su nombre a John Canny, quien lo desarrolló en 1986. En líneas generales, el método Canny encuentra bordes mediante la búsqueda de máximos locales del gradiente de la imagen dada. El gradiente se calcula utilizando la derivada de un filtro gaussiano, y es menos susceptible a errores inducidos por ruido que otros algoritmos de detección de bordes. Una descripción completa del algoritmo se brinda en Canny (1986).

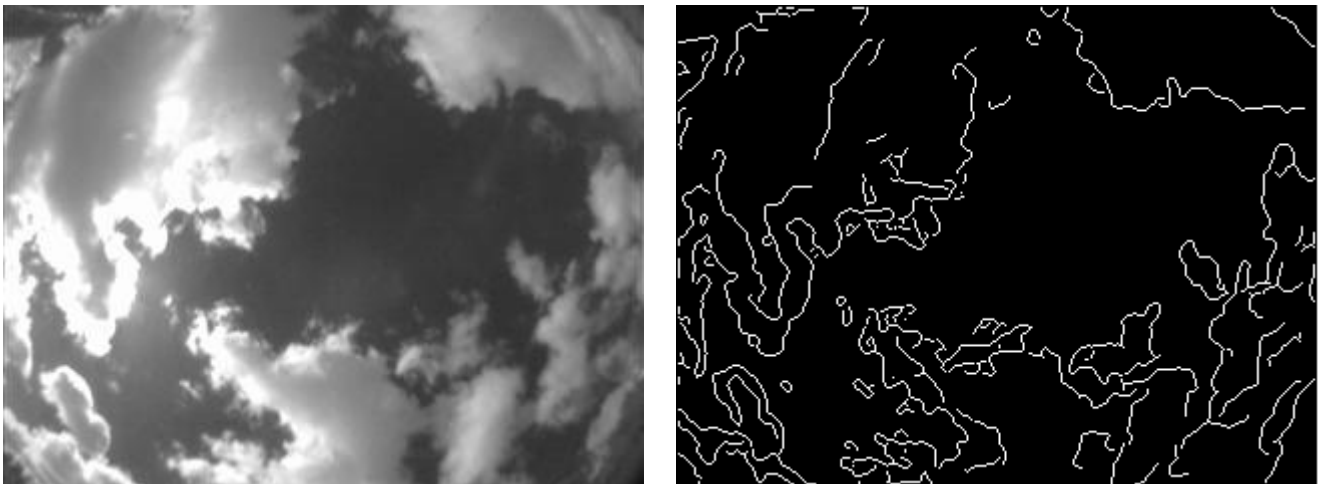


Figura 31: Imagen PN original (izquierda) y binaria (derecha) obtenida mediante la función *edge* de MATLAB, aplicado a la primera.

Es de esperar que una imagen binaria de un cielo PN (o D) en general posea más elementos distintos de cero (unos) que la imagen binaria de un cielo C, por cuanto esta última tiene una textura más homogénea que las primeras.

La FN para un cielo clasificado como PN se calcula simplemente mediante la **Ecuación 4-1**:

$$FN = 100 \cdot \frac{n_{Nube}}{n_{Sol} + n_{Horizonte} + n_{PlanoSolar} + n_{Resto}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

donde:

n_{Nube} es el número de pixeles nubosos contabilizados,

n_{Sol} es el número de pixeles de la zona solar,

$n_{Horizonte}$ es el número de pixeles del horizonte,

$n_{PlanoSolar}$ es el número de pixeles del plano solar,

n_{Resto} es el número de pixeles de la zona resto.

Se observa pues que no son contabilizados los pixeles correspondientes al disco solar en el cálculo de FN.

También se computa una incertidumbre en todos los casos, definida del siguiente modo:

$$\Delta \equiv 100 \cdot \frac{n_{Espurios}}{n_{Sol} + n_{Horizonte} + n_{PlanoSolar} + n_{Resto}} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

donde $n_{Espurios}$ es el número de pixeles espurios contabilizados (aquellos cuyo brillo sea mayor a 230).

Cabe agregar que no se incluye una corrección geométrica por ángulo sólido del pixel considerado.

En los siguientes dos apartados, se presentan dos clasificadores distintos, ambos basados en estas características, y se evalúan los resultados de clasificación de cada uno para una misma muestra de test.

4.3.1 Clasificador de media más cercana (NMC)

El primer clasificador evaluado utiliza el principio del Clasificador de Media más Cercana (NMC, por sus siglas en inglés), también denominado Clasificador de Distancia Mínima (Duda & Hart, 2001).

Se trata de un método de aprendizaje supervisado, dado que es preciso en primer lugar entrenar al clasificador, a partir de una muestra de entrenamiento previamente clasificada. A partir de esta muestra se obtiene, para cada clase “i”, su vector medio de características, μ_i . La regla de clasificación de un vector de características $\mathbf{x}$ es simplemente asignarle la clase “i” si se cumple:

$$\|\mathbf{x} - \mu_i\| < \|\mathbf{x} - \mu_j\|, \forall j: j \neq i$$

En otras palabras, se calcula la distancia euclídea entre $\mathbf{x}$ y el vector medio de características de cada una de las clases. Aquella clase cuyo vector medio de características está a la menor distancia euclídea de $\mathbf{x}$ es la asignada a este.

El clasificador implementado aquí sigue el diagrama de flujo de la Figura 32:

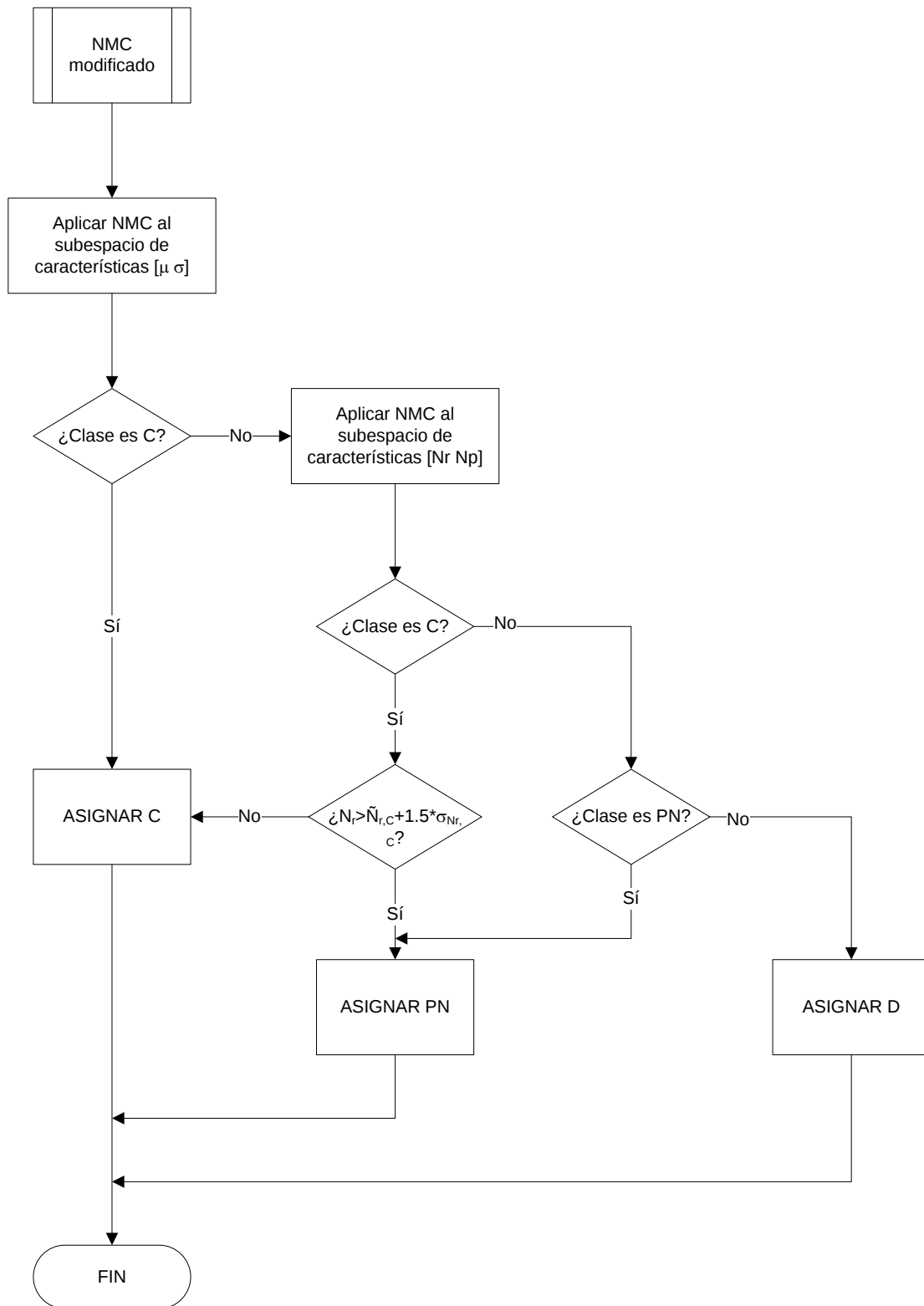


Figura 32: Diagrama de flujo del NMC modificado.

Como se ve, no se trata de un único NMC, sino de dos NMC, uno clasificando en el subespacio de características $[\mu, \sigma]$, y el segundo en el subespacio $[N_r, N_p]$. Además,

incorpora una corrección después del segundo NMC, en el caso que la clase asignada sea C. En este caso, antes de asignar esta clase, evalúa si el N_r del $\mathbf{x}$ dado es mayor que el N_r medio de la clase C, $\tilde{N}_{r,C}$, más 1.5 desviaciones estándar de los $N_{r,C}$ de la muestra de entrenamiento. Este paso es necesario para corregir algunas clasificaciones erróneas de cielo PN como C. Al imponer la condición mencionada, se disminuye la probabilidad de que esta clasificación errónea ocurra.

Las figuras **Figura 33-Figura 34** contienen las muestras de entrenamiento de cada clase, en los subespacios de características mencionados. Cada muestra contiene 50 puntos, con lo cual la muestra total de entrenamiento es de 150 puntos.

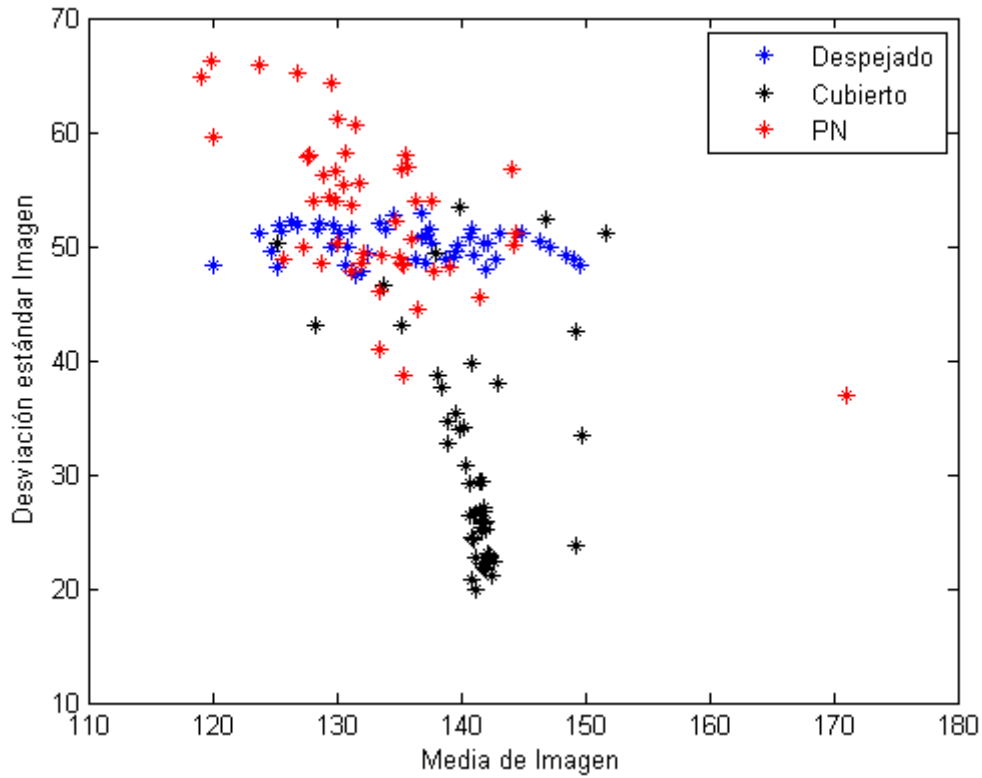


Figura 33: Muestras de entrenamiento en el subespacio de características $[\mu, \sigma]$.

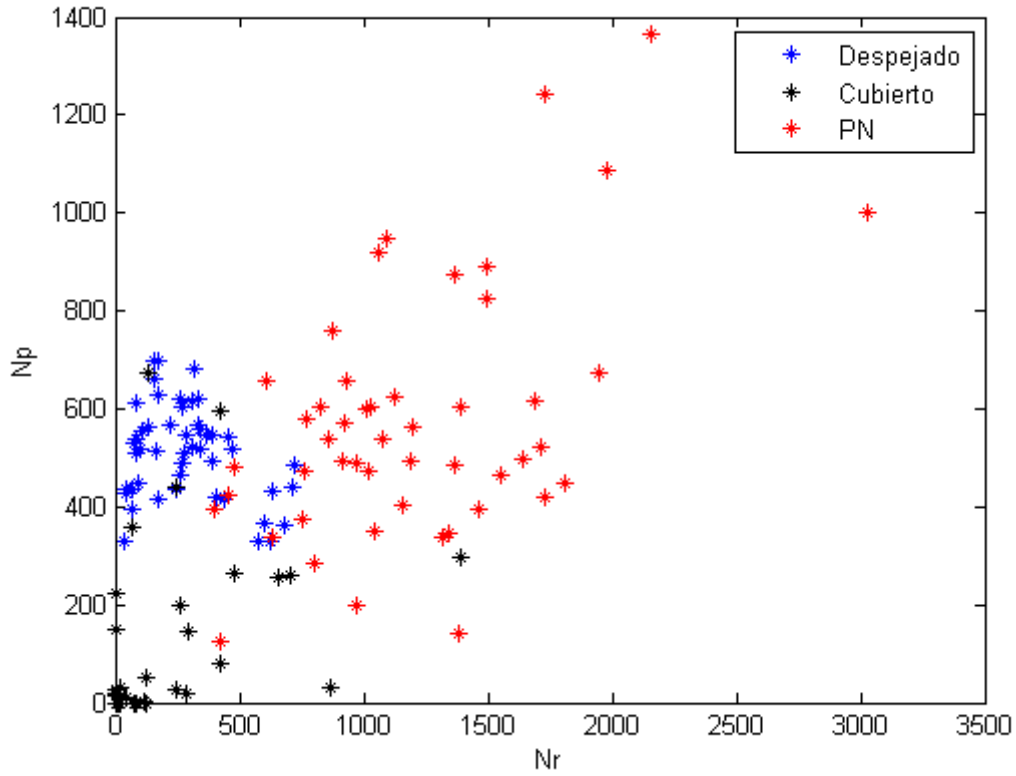


Figura 34: Muestras de entrenamiento en el subespacio de características $[N_r, N_p]$.

4.3.2 Clasificador basado en SVM

4.3.2.1 Clasificación SVM

Antes de describir el segundo algoritmo de clasificación evaluado, es preciso brindar una descripción del método *Support Vector Machines* (SVM), puesto que aquel se basa en éste.

El método SVM se describe detalladamente en Cortes & Vapnik (1995), aquí se brinda una descripción genérica.

En el campo de reconocimiento de patrones, se define la *función discriminante* $g_i(\mathbf{x}): \Psi \rightarrow \mathbb{R}$, donde $\mathbf{x}$ es un vector de características, $i=1, \dots, c$ (c es el número de clases del problema). Esta función determina la asignación de un vector $\mathbf{x}$ dado a una clase y_i de acuerdo a la siguiente regla (Duda & Hart, 2001):

$$\text{asigne } y_i \Leftrightarrow g_i(\mathbf{x}) > g_j(\mathbf{x}), \forall j \neq i \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Si conocemos o asumimos determinada forma paramétrica para la función discriminante, el objetivo del entrenamiento del clasificador pasa a ser encontrar los parámetros de la función. Aquí asumimos una función discriminante lineal en $\mathbf{x}$ o en

alguna función $\Phi(\mathbf{x})$. Además, asumiremos un clasificador binario (dos clases), de modo tal que $y = \pm 1$.

Nuestra función discriminante lineal en $\mathbf{x}$ es:

$$g(\mathbf{x}) = \text{sgn}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b) \quad \text{Ecuación 4-4}$$

donde $\mathbf{w} \in \Psi, b \in \mathbb{R}$.

Esta función nos dice que se divide el espacio de características Ψ , mediante el hiperplano $\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b$, en dos semi-hiperplanos, uno correspondiente a la clase $y=1$, y el otro a la clase $y=-1$. La Figura 35 muestra el caso de un Ψ bidimensional, en donde los “hiperplanos” pasan a ser rectas:

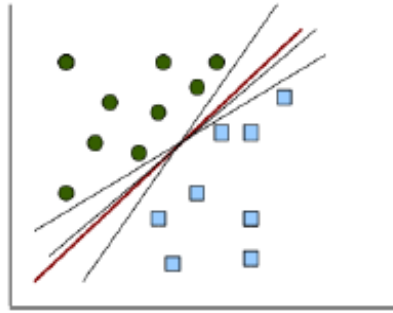


Figura 35: Espacio de características bidimensional, donde se muestran distintas rectas que separan las dos clases dadas, representadas por los cuadrados y círculos.

Como se ve en la figura anterior, no existe una única recta (hiperplano) que logra separar las muestras satisfactoriamente. En el método SVM elegimos el que logra el máximo margen de separación entre las m muestras de entrenamiento (Scholkopf & Smola, 2001):

$$\max_{\mathbf{w}, b} \min\{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|, \mathbf{x} \in \Psi, \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0, i = 1, \dots, m\} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

El criterio establecido puede visualizarse claramente en la Figura 36, para el caso bidimensional:

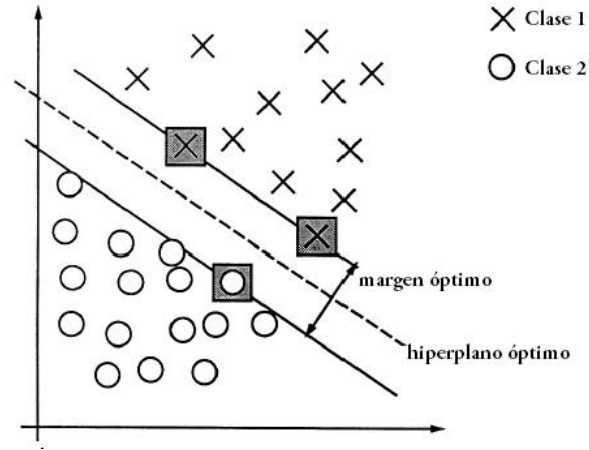


Figura 36: Hiperplano establecido en base al criterio de la **Ecuación 4-5** (Fuente de imagen: Cortes & Vapnik, 1995).

Se puede demostrar que esto se logra hallando (Scholkopf & Smola, 2001):

$$\min_{\mathbf{w}, b} \tau(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2$$

sujeto a:

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1, i = 1, \dots, m$$

Este problema de optimización con restricciones se resuelve introduciendo el Lagrangiano $\mathcal{L}(\mathbf{w}, b, \alpha)$ (Scholkopf & Smola, 2001):

$$\mathcal{L}(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 - \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot (y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1) \quad \text{Ecuación 4-6}$$

donde $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m), \alpha_i \geq 0$.

Utilizando las condiciones de optimización descritas en Kuhn & Tucker (1950), conocidas como condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), se obtienen las expresiones de las ecuaciones Ecuación 4-7 a Ecuación 4-9:

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{w}, b, \alpha)}{\partial \mathbf{w}} = 0, \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{w}, b, \alpha)}{\partial b} = 0 \quad \text{Ecuación 4-7}$$

$$\sum_{i=1}^m y_i \cdot \alpha_i = 0 \quad \text{Ecuación 4-8}$$

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^m y_i \cdot \alpha_i \cdot \mathbf{x}_i \quad \text{Ecuación 4-9}$$

La última ecuación nos dice que el parámetro $\mathbf{w}$ puede expresarse como una combinación lineal de aquellas muestras $\mathbf{x}_i$ de entrenamiento, cuyo α_i correspondiente sea distinto de cero. Estas $\mathbf{x}_i$ son los *support vectors* (SV), que dan el nombre a este método.

Los puntos marcados dentro de un cuadrado en la Figura 36 indican los SV obtenidos para ese caso.

Puede demostrarse que la función discriminante para el caso lineal es (Scholkopf & Smola, 2001):

$$g(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^m y_i \cdot \alpha_i \cdot (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \right) \quad \text{Ecuación 4-10}$$

Para el caso en que las clases no sean linealmente separables en el espacio n -dimensional Ψ , es posible pasar a un espacio N -dimensional ($N > n$) en el que las clases sean linealmente separables, como se ilustra en la **Figura 37**. Para ello, se utiliza un denominado *kernel* $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \Phi(\mathbf{x}) \cdot \Phi(\mathbf{x}_i)$, donde $\Phi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^N$. En este caso, la función discriminante es:

$$g(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^m y_i \cdot \alpha_i \cdot (K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)) + b \right) \quad \text{Ecuación 4-11}$$

En el presente trabajo, se utilizó un *kernel* gaussiano:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = e^{-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{\sigma^2}} \quad \text{Ecuación 4-12}$$

Como en muchos casos tenemos una superposición de muestras que no permite hallar un hiperplano, se admiten errores $\xi_i > 0$, de manera tal que el problema se vuelve minimizar la función:

$$\tau(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \cdot \sum_{i=1}^m \xi_i$$

sujeta a:

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, i = 1, \dots, m$$

A este caso se le suele denominar C-SVM, debido a la constante C que expresa un compromiso entre maximizar el margen de separación y minimizar el error de entrenamiento.

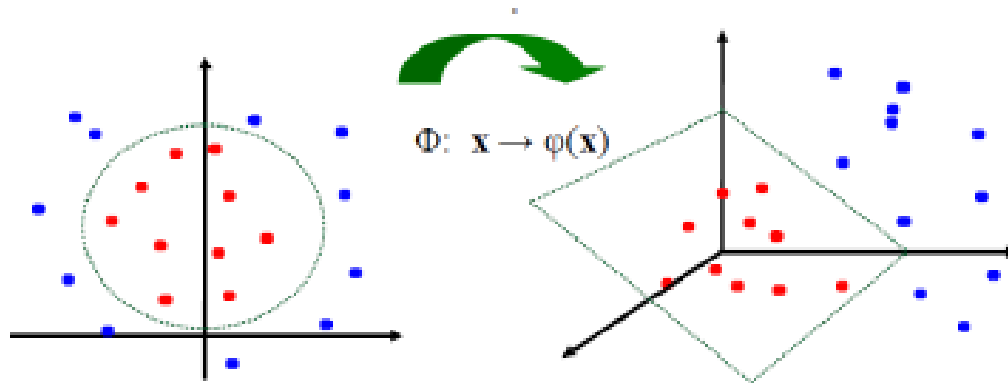


Figura 37: Ejemplo de problema no separable linealmente en dos dimensiones (izquierda), pero separable linealmente en un espacio de mayor dimensionalidad (derecha).

4.3.2.2 *Clasificador basado en SVM*

Dado que SVM es una técnica de clasificación binaria, vale decir, que clasifica únicamente en una de dos clases, y dado que en nuestro problema tenemos tres clases, fue necesario aplicar la clasificación en varios pasos sucesivos, siempre entre dos clases.

Este clasificador emplea tres clasificadores SVM, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 38:

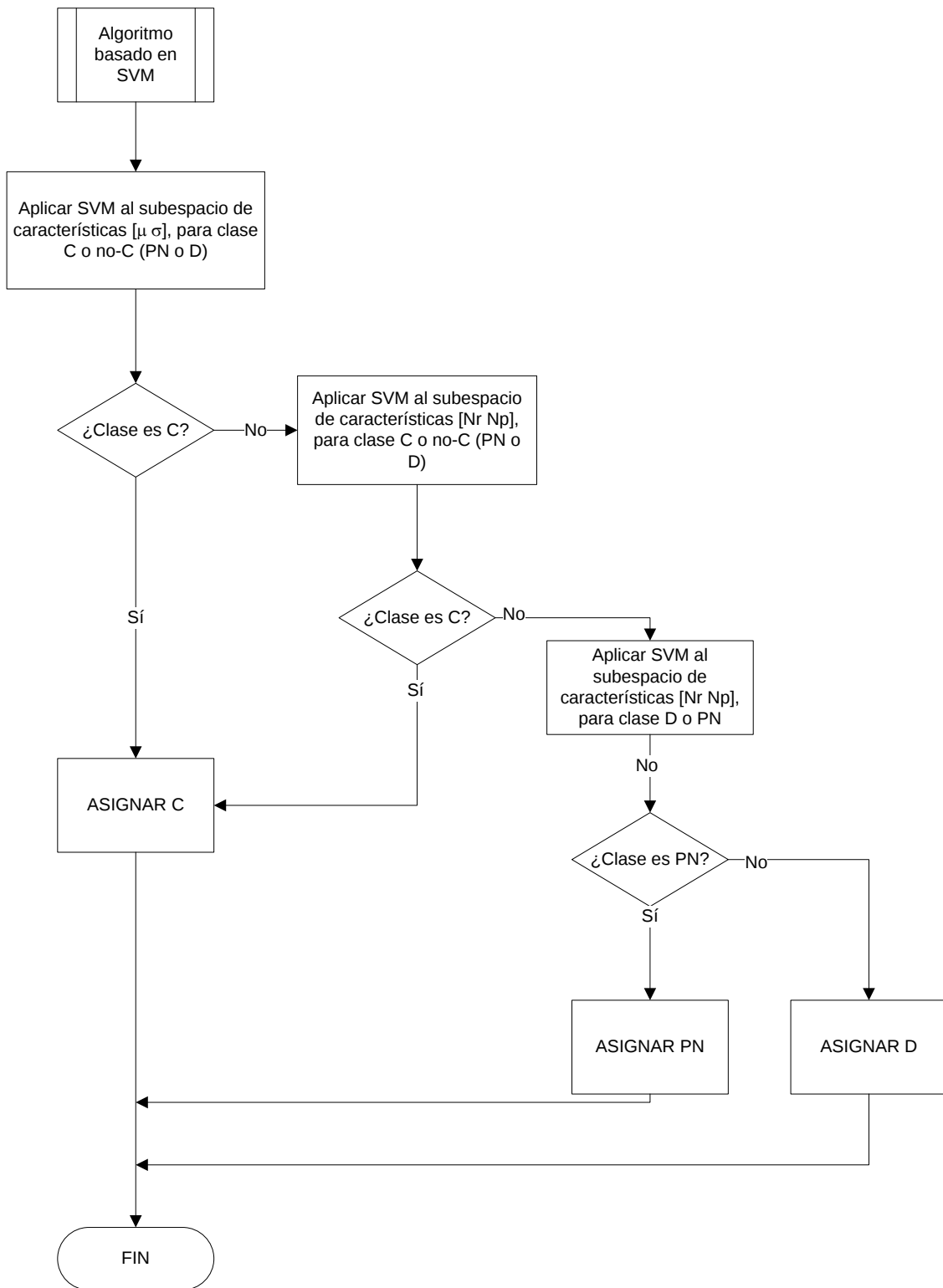


Figura 38: Diagrama de flujo de algoritmo basado en SVM.

En primer lugar cabe aclarar que si bien pudo haberse utilizado un clasificador que operara en todo el espacio de características, se encontró que se obtenían mejores

resultados subdividiendo el problema en clasificadores SVM operando en subespacios de Ψ .

Como muestra la Figura 38, en primer lugar se clasifica en “cubierto” o “no-cubierto” (es decir, PN o D), en el subespacio $[\mu, \sigma]$. Si el resultado de dicha clasificación es C, inmediatamente asigna esa clase. En caso contrario, se pasa al segundo clasificador que clasifica en “cubierto” o “no-cubierto” (de nuevo, PN o D), en el subespacio $[N_r, N_p]$. Si el resultado de dicha clasificación es C, asigna esa clase. En caso contrario, se pasa al tercer y último clasificador que clasifica en PN o D, en el subespacio $[N_r, N_p]$.

Una de las ventajas que presenta este algoritmo, es que MATLAB ya tiene implementado los métodos tanto de entrenamiento del clasificador (función *svmtrain*), como de clasificación (*svmclassify*), el cual utiliza como parámetro de entrada, además del vector a ser clasificado, una estructura que a su vez es la salida del método anterior. De este modo, resulta muy sencilla su implementación en MATLAB.

Además, el método de entrenamiento permite graficar las muestras utilizadas y visualizar la función de mapeo obtenida, como se muestra en las figuras Figura 39-Figura 41:

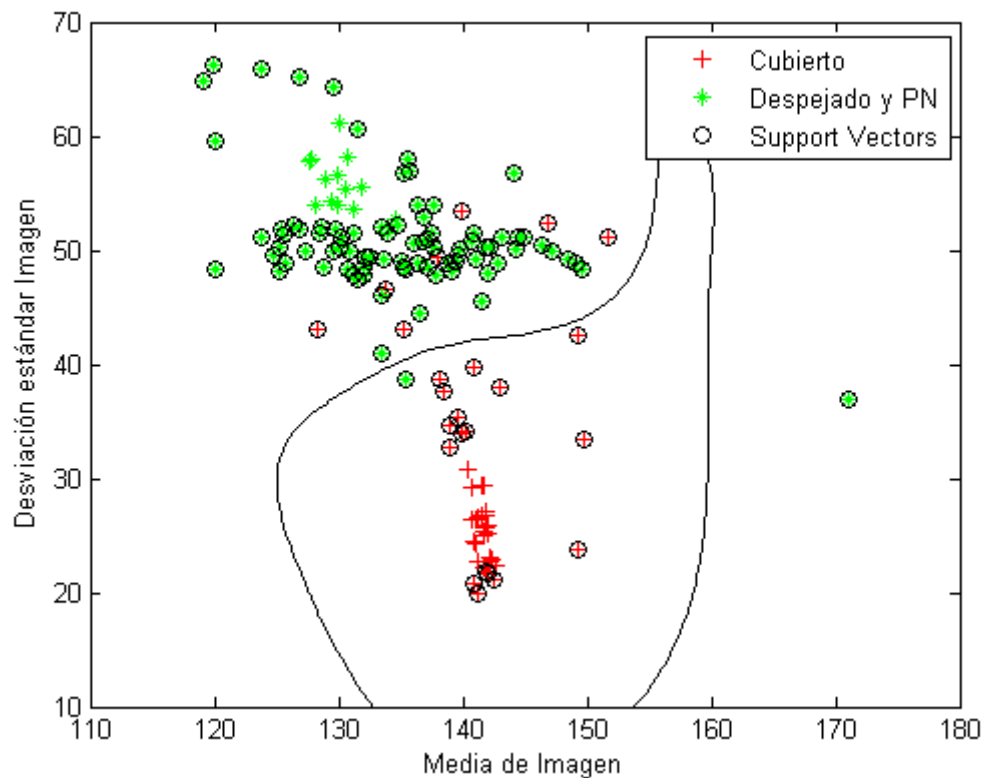


Figura 39: Muestras de entrenamiento en el subespacio de características $[\mu, \sigma]$, donde se grafica además la función de mapeo (o discriminante) y los vectores de soporte. En este caso, la clasificación es entre C y no-C (PN o D).

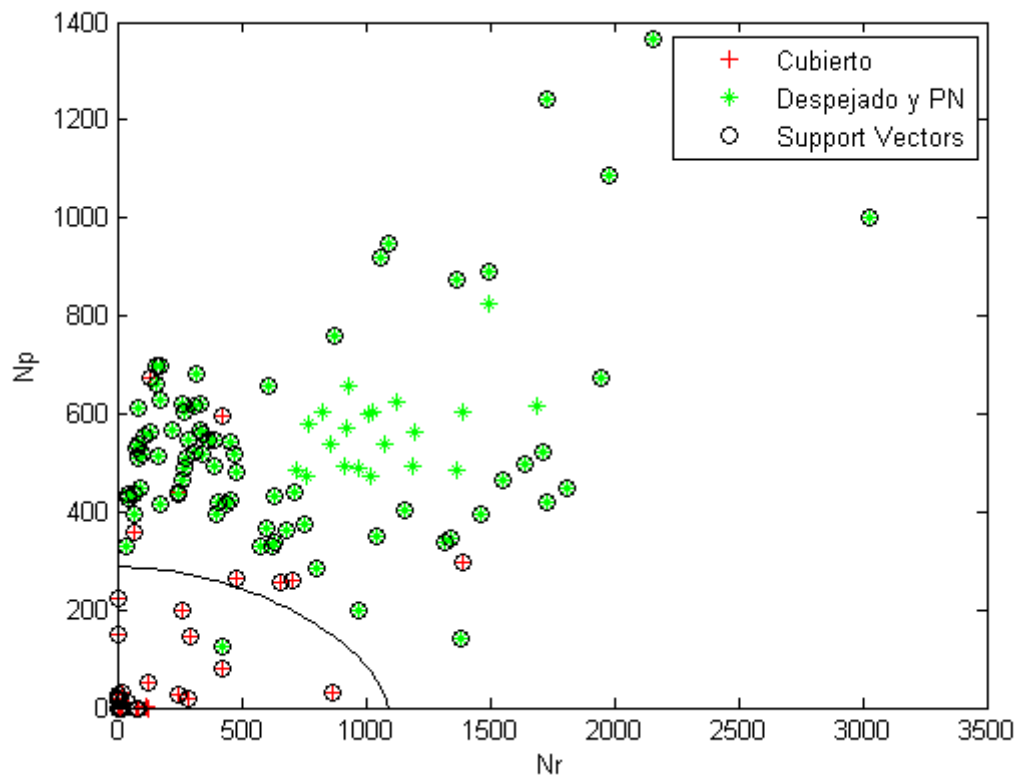


Figura 40: Muestras de entrenamiento en el subespacio de características $[N_r, N_p]$, donde se grafica además la función de mapeo (o discriminante) y los vectores de soporte. En este caso, la clasificación es entre C y no-C (PN o D).

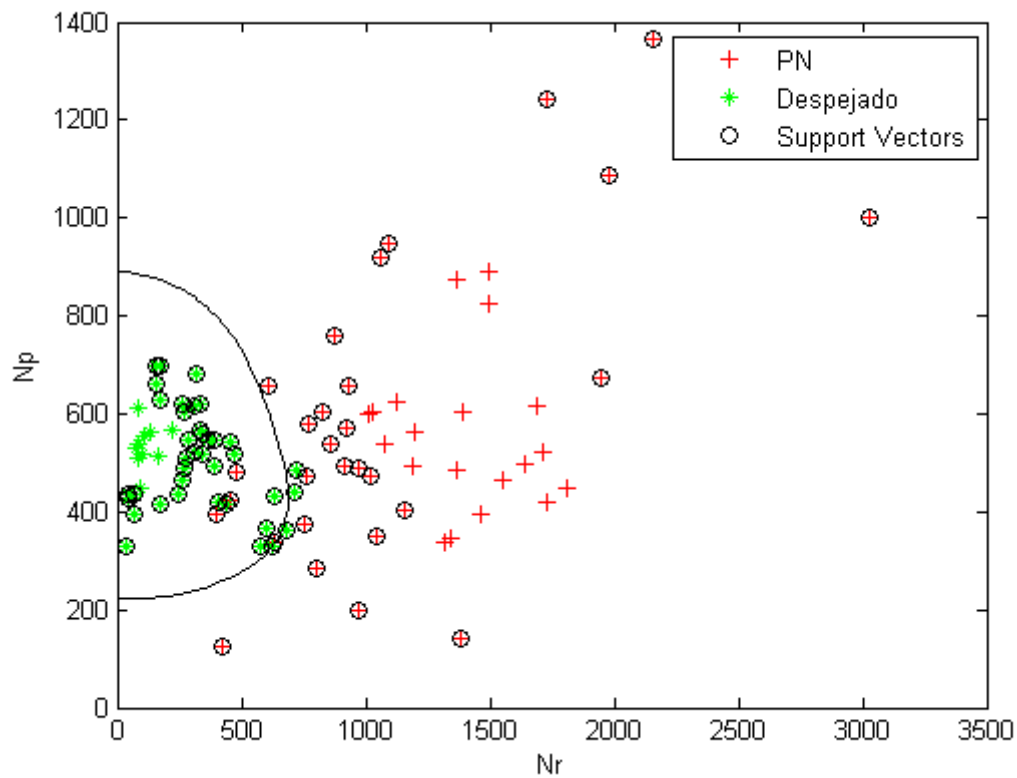


Figura 41: Muestras de entrenamiento en el subespacio de características $[N_r, N_p]$, donde se grafica además la función de mapeo (o discriminante) y los vectores de soporte. En este caso, la clasificación es entre PN y D.

4.3.3 Evaluación de clasificadores

La evaluación de los clasificadores descritos en los apartados anteriores fue realizada con una muestra de 150 imágenes, es decir, igual en cantidad a la muestra de entrenamiento. Se utilizó la misma muestra para ambos clasificadores.

Los resultados se sintetizan en las tablas Tabla 3 y Tabla 4:

		Clasificada como...		
		D	C	PN
Clase Real	D	98	2.0	0.0
	C	4.0	94	2.0
	PN	22	2.0	76
Porcentaje global de aciertos: 89.4%				

Tabla 3: Resultados (en porcentaje) de evaluación de clasificador basado en NMC.

		Clasificada como...		
		D	C	PN
Clase Real	D	100	0.0	0.0
	C	0.0	98	2.0
	PN	16	6.0	78
Porcentaje global de aciertos: 92.1%				

Tabla 4: Resultados (en porcentaje) de evaluación de clasificador basado en SVM.

Los resultados indican que si bien el porcentaje global de aciertos del clasificador basado en NMC es apenas un 3% inferior al clasificador basado en SVM, el segundo implica una mejora sistemática en todas las clasificaciones. Sumado a esto, y como ya se indicó anteriormente, el clasificador SVM presenta la ventaja de ya estar implementado en MATLAB, con la consiguiente simplificación en el código de implementación del algoritmo. Por estas razones, se optó por este segundo clasificador.

4.3.4 Estimación de error

De acuerdo a los resultados de la Tabla 4, solamente un 2% (1 imagen en 50) de las imágenes de la clase C es clasificado como PN. Sin embargo, en este caso, la FN obtenida es 87%, con lo cual se trata de una clasificación que, si bien es errónea, el error en la FN es aceptable (13%), como lo muestra la **Figura 42**:

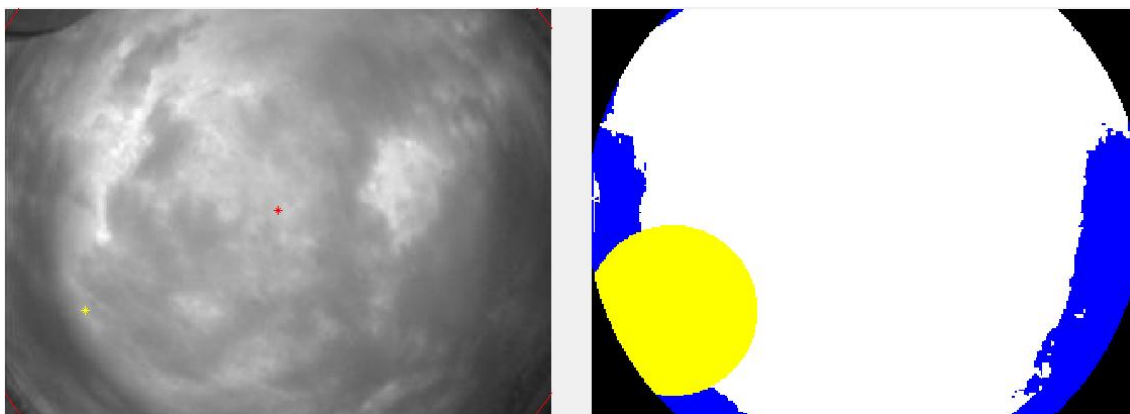


Figura 42: Imagen de cielo cubierto clasificada erróneamente como PN. La FN obtenida es de 87%. El punto amarillo en la imagen original indica la posición del sol.

Nótese en la **Figura 42** cómo las nubes muy oscuras son clasificadas como cielo despejado, especialmente en la zona del horizonte.

En cuanto a las clasificaciones erróneas de la clase PN, la Tabla 4 muestra que un 16% (8 imágenes) son clasificadas como D, y un 6% (3 imágenes) como C.

De las imágenes clasificadas como D, dos tienen una FN de entre 10-15%, con lo cual el error es aceptable. De las 6 restantes, solamente una posee una FN opaca mayor que 15%. Las restantes cinco poseen la característica común de ser cielos con relativamente alta FN delgada (nubes altas, tipo Ci, Cs, y similares) pero baja FN opaca ($< \sim 15\%$). De aquí puede inferirse que el algoritmo es incapaz de determinar FN de entre 0 y 15%, particularmente si consideramos solamente FN opaca.

En cuanto a las imágenes clasificadas como C, dos poseen una FN de $\sim 80\%$, mientras que la restante tiene una FN de $\sim 30\%$. De aquí puede inferirse que el algoritmo es incapaz de determinar FN de entre 80 y 100%.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y aceptando como “correctas” clasificaciones que arrojan FN con un error menor al 20%, el porcentaje global de aciertos asciende a 94.7%.

Finalmente, podemos concluir también, a partir de esta discusión, que para imágenes clasificadas como D (FN=0%) el error máximo es de 15% (la FN real se encuentra entre 0 y 15%), mientras que para imágenes clasificadas como C (FN=100%), el error máximo es de 20% (la FN real se encuentra entre 80 y 100%). Estos errores son sumados a la incertidumbre expresada en la **Ecuación 4-2**, que contempla el número de píxeles espurios en la imagen.

Para las imágenes de cielo PN, se obtuvo una estimación del error a partir del siguiente método. Primero, se eligió una de las imágenes de test, y se varió los factores de corrección del umbral global para las distintas zonas manualmente, hasta lograr una clasificación de píxeles evaluada como “correcta”, a partir de una estimación visual:

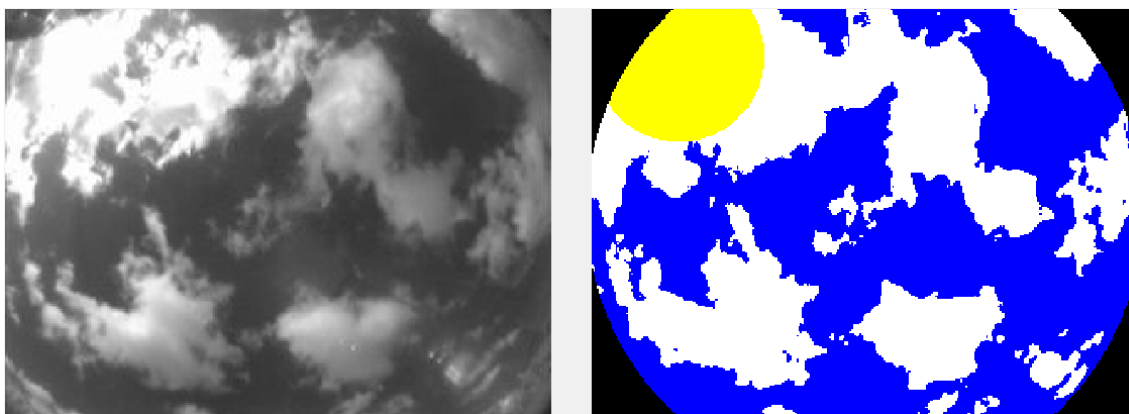


Figura 43: Imagen de la muestra de test, utilizada como patrón inicial en la estimación de error de imágenes PN (ver texto).

Los factores de corrección obtenidos son los que se muestran en la **Tabla 5**:

Zona	Factor de corrección de umbral global
Zona sol	1.4
Zona horizonte	1.2
Zona plano sol	1
Zona resto	1

Tabla 5: Factores de corrección del umbral global mediante los cuales se obtiene la clasificación de píxeles de la **Figura 43**.

Luego de haber obtenido el set de factores de corrección que muestra la tabla anterior, se calculó, para 10 imágenes de la muestra de test (de la clase PN), la FN con el mismo set de factores de corrección, $FN_{i,0}$, y luego se varió manualmente estos factores para cada una de las imágenes, hasta obtener una clasificación evaluada visualmente como “correcta”, obteniéndose una nueva FN, $FN_{i,c}$. Finalmente se computó el valor RMS de las diferencias entre $FN_{i,0}$ y $FN_{i,c}$, y se adoptó este valor como el error asociado a la FN de una imagen PN. La incertidumbre total de una determinada imagen PN es la suma de este error y el número de píxeles espurios dado por la **Ecuación 4-2**.

La Figura 44 muestra los errores absolutos $|FN_{i,c} - FN_{i,0}|$:

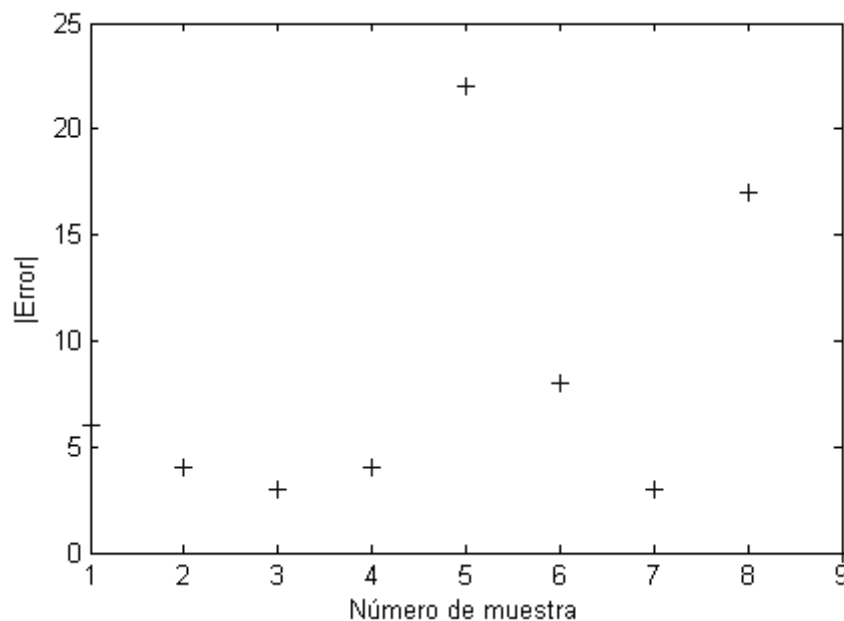


Figura 44: Estimación de errores asociados a la FN obtenida de imágenes PN.

El valor RMS de estos errores es de 10.1.

A modo de conclusión, la **Tabla 6** resume las incertidumbres que se asocian a cada tipo de imagen, en base a lo expuesto hasta aquí:

Tipo de imagen	Estimación de error asociado	Incertidumbre
C	20.0	$20.0+\Delta$
D	15.0	$15.0+\Delta$
PN	10.1	$10.1+\Delta$

Tabla 6: Errores asociados a las FN obtenidas para cada clase, e incertidumbre total (Δ viene dada por la **Ecuación 4-2**, ver texto).

Los resultados del algoritmo descrito en esta sección, y aplicado a imágenes de los meses junio a septiembre, se incluyen en la sección 9.1.

5 Captura de bólidos

5.1 Descripción del algoritmo

El algoritmo de captura de bólidos es muy similar al implementado en el software ASGARD, de la Southern Ontario All-sky Meteor Camera Network, aunque con algunas diferencias (ver por ejemplo Weryk et al, 2008).

El algoritmo, al igual que el de ASGARD, opera en tiempo real, hallando la diferencia entre un frame n y uno $n+9$. Esto implica que a un framerate de 30 fps, la diferencia en tiempo entre uno y otro frame es de unos 0.3s.

Posteriormente, se cuenta el número de píxeles cuya intensidad ha aumentado más de un determinado umbral ($\Delta_{\min}$), especificado por el usuario en la ventana principal de la aplicación “Bólidos”. Si este número de píxeles excede un número también especificado por el usuario (n_{pix}) se activa la detección de un evento, es decir, comienza la adquisición de video durante un tiempo especificado por el usuario, por ejemplo 10 s.

Este evento se guarda en el disco duro, siguiendo el formato “Evento-DD-MM-YY-HH-MM-SS.avi”. Cabe aclarar aquí que el tiempo indicado en el nombre del archivo corresponde al instante inmediatamente anterior al comienzo de la adquisición de video, realizada con la función `getdata` de Matlab.

Una vez grabado el evento, se comienza una segunda adquisición de video, de un tiempo especificado por el usuario en la parte superior de la ventana principal de la aplicación “Bólidos”, por ejemplo 30 o 60 segundos. El objetivo de esta segunda adquisición, cuyo nombre sigue el formato “Calibracion-DD-MM-YY-HH-MM-SS.avi”, es disponer de un video con una duración apropiada para realizar calibraciones astro- y fotométricas (ver apartados siguientes), inmediatamente después del evento registrado a los efectos de minimizar errores, sobre todo en la calibración fotométrica.

Si bien los umbrales de número de píxeles (n_{pix}) y diferencia mínima ($\Delta_{\min}$) pueden ser ingresados por el usuario, la aplicación Bólidos permite realizar una estimación de estos parámetros, mediante el botón “CALIBRAR” en la ventana principal. Esta opción adquiere video durante un tiempo determinado por el usuario (campo “tCalibr” en la pestaña “Calibración” de la ventana principal). Posteriormente, calcula la diferencia entre cada frame y el anterior, y halla el valor máximo de intensidad en cada frame diferencia. Luego, se halla la media μ_D y desviación estándar σ_D de estos valores máximos. Posteriormente, se determina en cada frame diferencia el número de píxeles N_{pix} cuyo brillo es mayor o igual a $\mu_D + \sigma_D$. El umbral $\Delta_{\min}$ se obtiene como $\mu_D + \sigma_D$, mientras que n_{pix} es igual a la media de N_{pix} más una desviación estándar. Una vez calculados, estos valores se muestran en los campos “Umbral Dif.” y “Umbral N” de la pestaña “Calibración” en la ventana principal.

Estos valores calculados sirven de guía al usuario para fijar correctamente estos parámetros. “Correctamente” significa maximizar la probabilidad de detección de eventos, minimizando la probabilidad de activación por ruido.

La experiencia indica que valores típicos de $\Delta_{\min}$ y n_{pix} son 60 y 10, respectivamente. A su vez, si tenemos la calibración fotométrica del sistema, podemos hallar la magnitud a la que corresponde el flujo integrado $F = \Delta_{\min} * n_{\text{pix}}$, y por lo tanto estimar la magnitud límite de detección del sistema.

5.2 Evaluación de desempeño

Como se indicó en el apartado anterior, el algoritmo de detección comienza con la adquisición de dos frames separados unos 0.3 s entre sí. Para evaluar el tiempo transcurrido entre la adquisición de estos dos frames, y la siguiente adquisición, se ejecutó el software con los umbrales de detección lo suficientemente altos como para no activar la detección. Entre ambas operaciones habrá transcurrido un tiempo muerto, durante el cual el software calcula la diferencia entre los frames, evalúa el número de pixeles cuyo brillo aumentó más de lo establecido por el umbral $\Delta_{\min}$, limpia variables y buffer de memoria, y evalúa si la hora actual se encuentra dentro del horario establecido para la detección de bólidos.

En la **Figura 45** se muestran los tiempos entre una adquisición y la siguiente a una velocidad de cuadros de ~ 30 fps.

Es preciso aclarar que estas simulaciones fueron hechas en una PC con procesador Intel Celeron de 2.20 GHz y con 2 GB de memoria RAM.

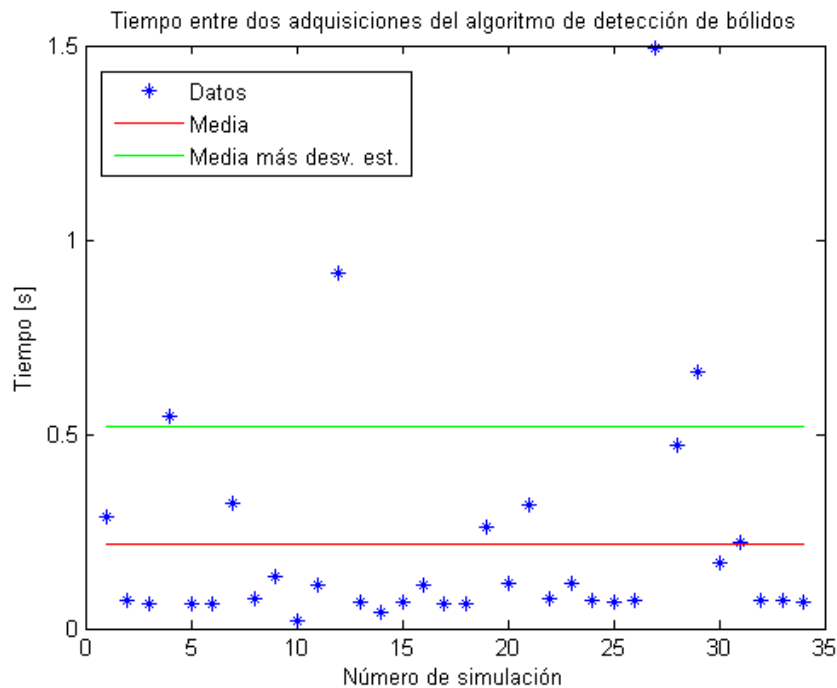


Figura 45: Evaluación de algoritmo de detección de bólidos, a una velocidad de cuadros de 30 fps.

La media de los tiempos entre dos adquisiciones consecutivas en la tabla anterior es de 0.22 s, y la desviación estándar es de 0.3 s. Considerando una duración media de un bólido de 4 s, resulta evidente que el tiempo de procesamiento no es una limitante en lo que a detección refiere.

6 Calibración astrométrica

A los efectos de poder determinar la trayectoria de un bólido detectado, en coordenadas horizontales, es preciso determinar la transformación que nos permite pasar de coordenadas (i,j) en la imagen, a (z,Az) , donde z es el ángulo cenital y Az el acimut. Para ello es preciso contar con una imagen donde podamos identificar varias estrellas (10-20), cuya posición en la imagen es comparada a sus coordenadas horizontales según algún catálogo disponible.

Puesto que en tiempo real, cada cuadro que compone la señal de video no posee una relación señal ruido (SNR) lo suficientemente alta como para identificar esta cantidad de estrellas, es preciso integrar un video de determinada duración (por ejemplo un minuto), es decir, sumar los cuadros que lo componen, restando a la vez un cuadro “dark” para eliminar eventuales *hot pixels* (píxeles defectuosos, cuyo brillo es constante e igual al nivel de saturación).

Esta técnica, conocida como integración de video, mejora considerablemente la SNR por cuanto el ruido –por su carácter estocástico- no se sumará en un pixel determinado que contiene señal –una estrella, por ejemplo- en el mismo grado que la señal misma, la cual puede considerarse constante en el espacio de imagen durante la duración del video, en todos los cuadros. Mediante este simple método, es posible generar imágenes de pseudo-larga exposición, donde puede identificarse un número de estrellas suficiente como para hallar la transformación mencionada al comienzo.

La aplicación desarrollada en el marco del presente proyecto, denominada “Integra”, permite realizar todos los pasos involucrados en la obtención de los parámetros de la transformación que nos permite pasar de pixel (i,j) a coordenadas horizontales (z,Az) , desde la integración de un video, hasta la realización del ajuste paramétrico de la función de transformación. Cada una de estas etapas es descrita a continuación, con la ayuda de diagramas de flujo que ilustran los algoritmos empleados.

El diagrama de flujo de la Figura 46 sintetiza cada uno de estos pasos.

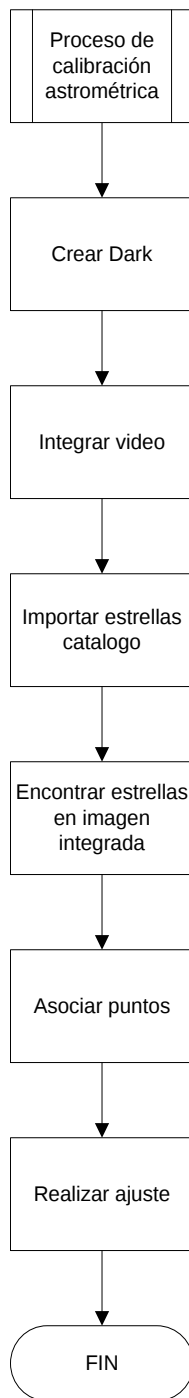


Figura 46: Diagrama de flujo de todo el proceso de calibración astrométrica.

6.1 Crear dark

Para crear una imagen dark, la aplicación permite abrir un archivo de video dark³, y seguir el algoritmo descrito en el diagrama de flujo de la Figura 47:

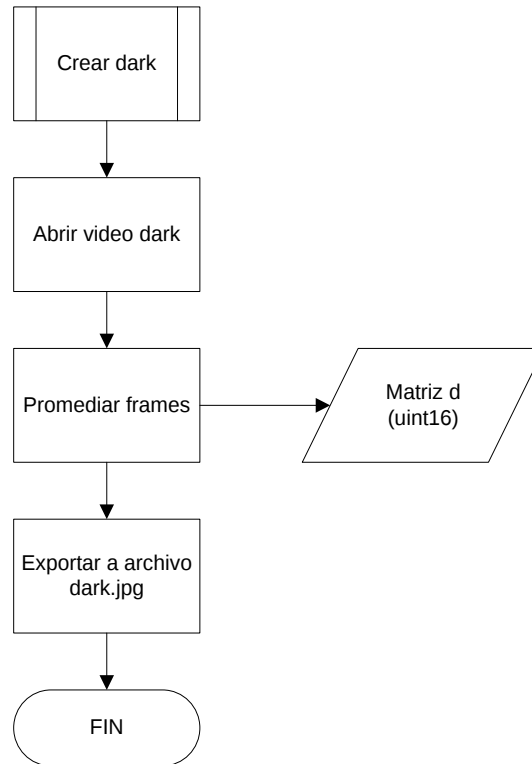


Figura 47: Algoritmo de generación de imagen dark.

La **Figura 48** muestra una imagen dark generada con la aplicación, en la que puede apreciarse claramente la presencia de *hot pixels*:

³ Los videos darks se generan simplemente tapando el globo de vidrio, preferentemente de noche. De esta forma, se obtiene un video que contiene solamente ruido del sistema, incluyendo *hot pixels*.



Figura 48: Imagen dark de la cámara KT&C, en la que se aprecia la presencia de *hot pixels*.

Los dark de la cámara Watec no contienen hot píxeles apreciables a simple vista (por lo que no se considera necesario mostrar una imagen), y el nivel medio de ruido se sitúa en el entorno de ~ 3 , siendo la desviación estándar del mismo orden.

6.2 Integrar video

El diagrama de flujo de la Figura 49 muestra cómo se obtiene una imagen integrada a partir de un video. Esencialmente se trata de un *loop* que recorre todos los cuadros del video, y suma el actual siempre y cuando su diferencia con el anterior sea distinta de cero, lo cual se hace para evitar la suma de cuadros repetidos debido a la presencia de llamados *drops*. Si el cuadro actual es distinto al anterior, se lo suma y se resta el dark adquirido en el paso anterior.

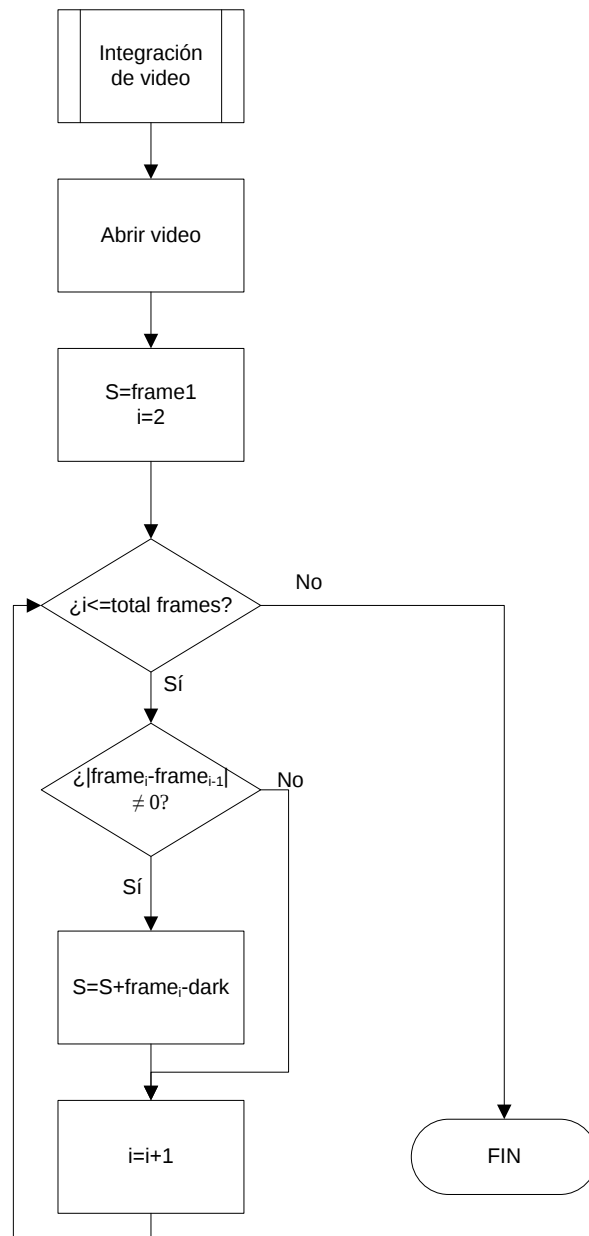


Figura 49: Diagrama de flujo de integración de video.

6.3 Estrellas de catálogo

Una vez que se tiene la imagen integrada, la cual es mostrada en la parte derecha de la aplicación, se debe cargar una base de datos de las 50 estrellas más brillantes del cielo.

El formato del archivo de entrada es .tsv, y puede obtenerse por ejemplo en el sitio web del catálogo Vizier (Vizier, 2012).

El archivo contiene la información que se detalla en el Anexo I.

El algoritmo de este proceso se detalla en la **Figura 50**. Luego de cargarse los datos de (RA, DEC) y magnitud visual mV de las estrellas, se obtienen las coordenadas (RA, δ) de Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, mediante una función contenida en el paquete de métodos de Eran Ofek, del CalTech (Ofek, 2012). Posteriormente, se convierte a coordenadas horizontales (tanto estrellas como planetas) mediante el uso de las funciones disponibles en dicho paquete (Ofek, 2012).

Posteriormente, se convierte a coordenadas x,y (tal como se definen en la Figura 52), a partir de una transformación simple que asume una cierta desviación del norte y un cierto FOV (fijados por el usuario, en el subítem “Parámetros” dentro del ítem de menú “Calibrar” de la aplicación). Las coordenadas del centro (x_c, y_c) son obtenidas previamente mediante el ajuste de una circunferencia a puntos seleccionados manualmente mediante el botón “Seleccionar puntos para Cfa” que aparece debajo de la imagen en la aplicación.

La primera vez que se realiza este procedimiento, es importante seleccionar el ángulo de desviación del norte y el FOV de manera de hacer coincidir lo más posible las estrellas de catálogo con las de la imagen. El último paso, la eliminación de estrellas muy cercanas a otra más brillante, obedece a las características del algoritmo de identificación, descrito más abajo.

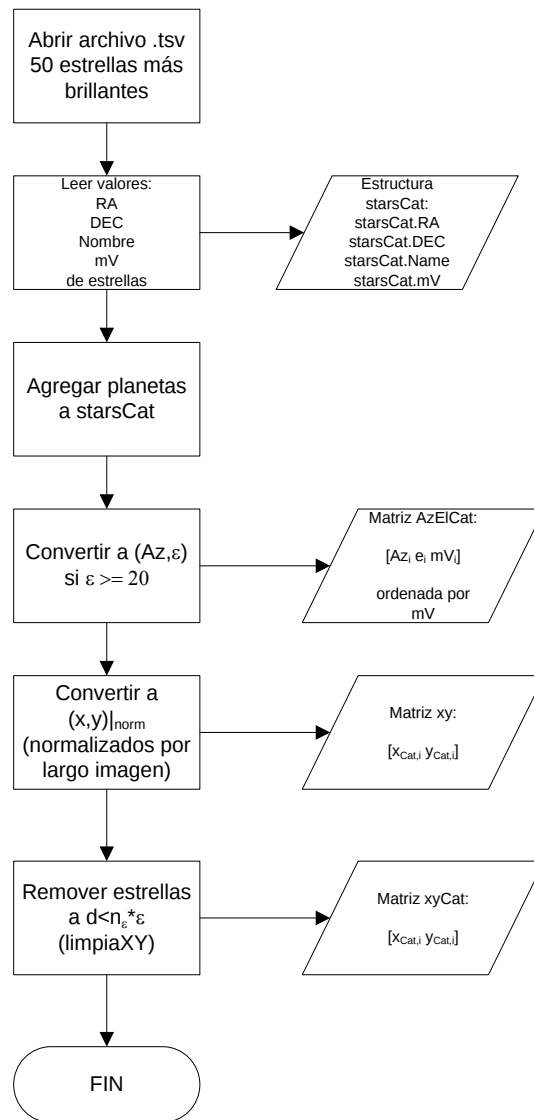


Figura 50: Diagrama de flujo de importación de estrellas de catálogo.

El algoritmo de eliminación de estrellas cercanas se describe en el diagrama de flujo de la **Figura 51**:

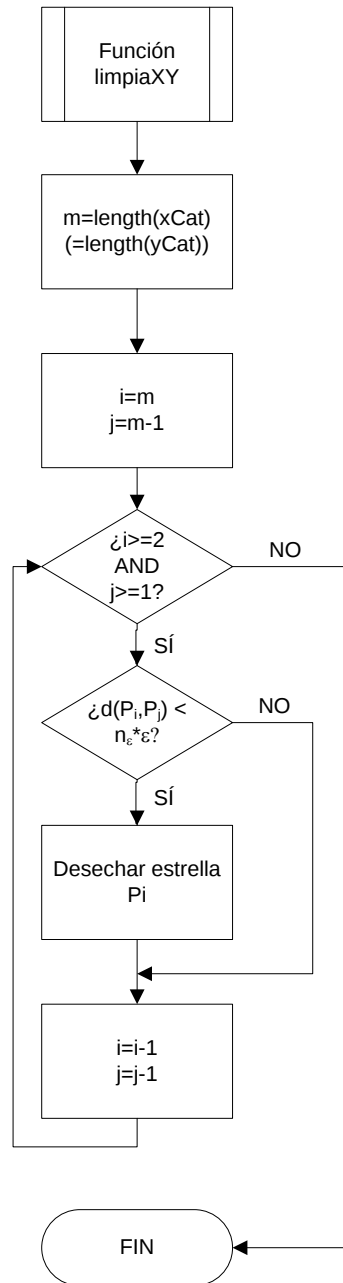


Figura 51: Diagrama de flujo de la función “limpiaXY”, que elimina estrellas a distancias menores que un valor determinado.

Los parámetros n_ϵ y ϵ son también definidos por el usuario, a través de la ventana “Parámetros” (“Calibrar”=>“Parámetros”). Nótese que se comienza por el final de la lista de estrellas de catálogo leídas, es decir, por las menos brillantes, lo cual garantiza desechar la menos brillante de dos estrellas cercanas.

6.4 Encontrar estrellas

Este paso implica la detección de estrellas (y eventualmente planetas) en la imagen. Como variables de salida obtenemos una matriz cuya fila i ésima está compuesta por los valores (x,y) del i ésimo punto detectado.

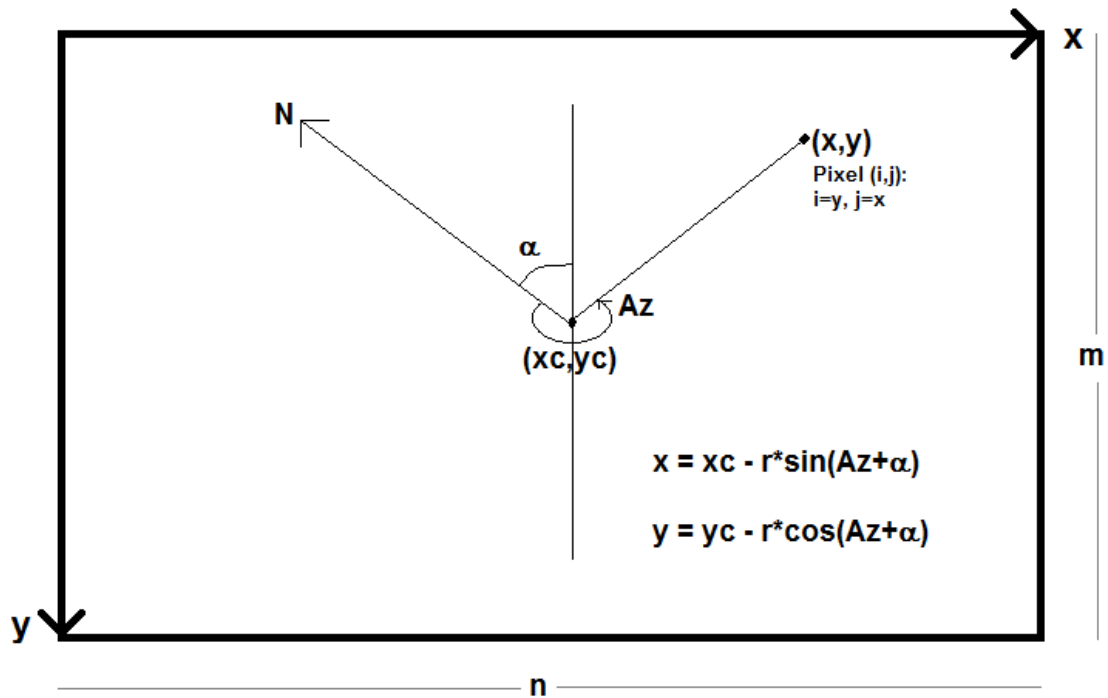


Figura 52: Sistema de coordenadas empleado en la imagen integrada.

El diagrama de flujo de esta etapa se muestra en la **Figura 53**:

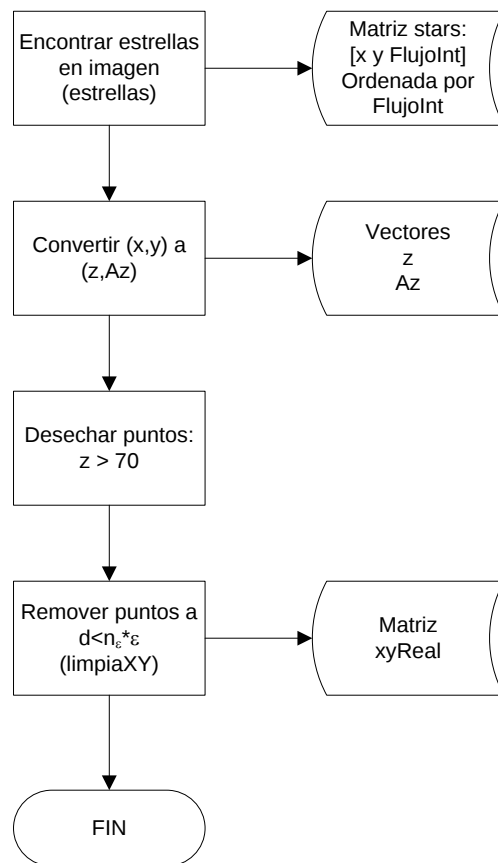


Figura 53: Diagrama de flujo del algoritmo de detección de estrellas.

La función “estrellas”, que es el primer paso en el algoritmo de la **Figura 53**, se describe en el diagrama de flujo de la **Figura 54**:

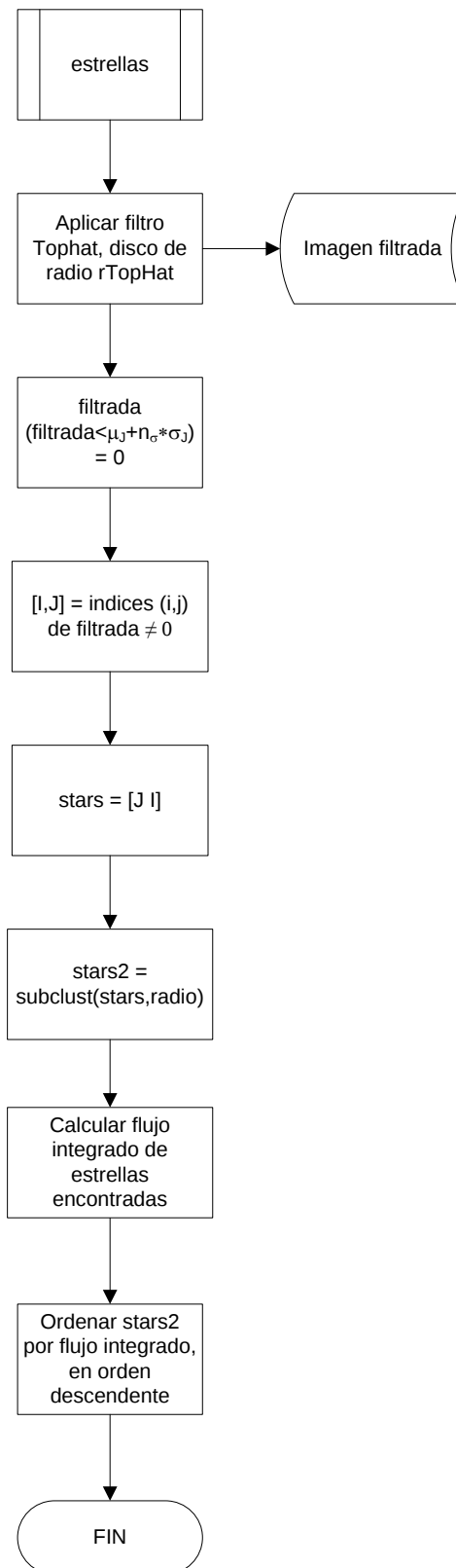


Figura 54: Diagrama de flujo de función “estrella”, la cual detecta estrellas en imagen integrada.

El filtro tophat F_{tophat} aplicado a una imagen I se define como la diferencia entre I y su apertura (en inglés *opening*), la cual es a su vez el resultado de aplicar las operaciones de erosión y dilación, tal como se definen en Serra (1982). El filtro tophat resalta el contraste entre una estrella y el cielo de fondo.

El radio del disco utilizado en el filtro TopHat y que es uno de los parámetros de entrada en su implementación en MATLAB, es definido por el usuario en la ventana de Propiedades, al igual que el número de sigmas utilizado como umbral en el paso siguiente a la aplicación del filtro, donde se determina el brillo por encima del cual se considera “estrella”. Como se indica en el diagrama, el umbral viene dado por la media de la imagen filtrada más el número de sigmas de la misma elegido.

El radio utilizado como variable de entrada a la función subclust de MATLAB, la cual identifica cúmulos de puntos en el plano (x,y), y devuelve el centro de cada uno, es también determinado por el usuario en la ventana de Propiedades. La función subclust es necesaria porque todos los píxeles que componen una estrella o planeta cumplirán la condición $\text{filtrada}(i,j) \neq 0$, posteriormente a haber aplicado el umbral mencionado anteriormente. En definitiva, se trata de definir el centro del cúmulo de píxeles que conforman una estrella o planeta. El método implementado en esta función de MATLAB es el de “acumulación subtractiva” (en inglés *subtractive clustering*), el cual asume que cada punto del conjunto dado es un potencial centro del cúmulo, y calcula una medida de la probabilidad de que lo sea, basado en la densidad de puntos en su entorno. El método es una extensión del “método de acumulación de montaña” (en inglés *mountain clustering method*), descrito en Yager & Filev (1994).

6.5 Identificación de puntos

La identificación de un punto detectado con su correspondiente estrella de catálogo, sigue un procedimiento muy similar –aunque no idéntico- al presentado en Groth (1986).

Una vez obtenidas las matrices de puntos $[x_{\text{Cat}} \ y_{\text{Cat}}]$ y $[x_{\text{Real}} \ y_{\text{Real}}]$, se forman dos listas de todos los triángulos posibles con los puntos de catálogo ($[x_{\text{Cat}} \ y_{\text{Cat}}]$), por un lado, y los determinados en la imagen, por otro ($[x_{\text{Real}} \ y_{\text{Real}}]$).

Cada lista es una matriz, cuyas filas corresponden al triángulo i ésimo, y cuyas columnas son las siguientes:

$$T_i = [x_{1i}; y_{1i}; x_{2i}; y_{2i}; x_{3i}; y_{3i}; \log(d_{12}+d_{13}+d_{23}); O; R; t_R^2; C; t_C^2]$$

Donde:

x_{ki}, y_{ki} son las coordenadas x,y del punto k : $k \in T_i$.

d_{hk} es la distancia entre el punto h y el punto k : $h, k \in [1,2,3]$

O es la orientación (123) del triángulo T_i (horario:1, antihorario:-1).

$R = d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$, donde $d_{\text{max}} = \max(d_{12}, d_{13}, d_{23})$, $d_{\text{min}} = \min(d_{12}, d_{13}, d_{23})$

t_R^2 viene dado por (Groth, 1986):

$$t_R^2 = 2 \cdot R^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\frac{1}{d_{\max}^2} - \frac{C}{d_{\max} \cdot d_{\min}} + \frac{1}{d_{\min}^2} \right) \quad \text{Ecuación 6-1}$$

C es el coseno del ángulo en el vértice 1.

t_C^2 viene dado por (Groth, 1986):

$$t_C^2 = 2 \cdot S^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\frac{1}{d_{\max}^2} - \frac{C}{d_{\max} \cdot d_{\min}} + \frac{1}{d_{\min}^2} \right) + 3 \cdot C^2 \cdot \varepsilon^4 \cdot \left(\frac{1}{d_{\max}^2} - \frac{C}{d_{\max} \cdot d_{\min}} + \frac{1}{d_{\min}^2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 6-2}$$

S es el seno del ángulo en el vértice 1.

Los dos últimos parámetros expresan las tolerancias en R y C, respectivamente. Los triángulos que tienen un $R > 2.5$ son descartados, puesto que triángulos con un R relativamente alto poseen una tolerancia t_R^2 relativamente alta, producto de vértices demasiado cercanos (Groth, 1986).

La numeración de los puntos del triángulo es tal que el lado determinado por los vértices 1 y 2 es el más corto ($=d_{\min}$), y el lado determinado por los vértices 1 y 3 es el más largo, e igual a $d_{\max}$ (Groth, 1986).

La primera identificación se basa en los dos siguientes criterios (Groth, 1986):

$$(R_A - R_B)^2 < t_{RA}^2 + t_{RB}^2 \quad \text{Ecuación 6-3}$$

$$(C_A - C_B)^2 < t_{CA}^2 + t_{CB}^2 \quad \text{Ecuación 6-4}$$

donde los subíndices hacen referencia a las dos listas de triángulos generadas. A su vez, debe cumplirse que $O_A=O_B$, es decir, deben tener la misma orientación.

Un triángulo de una lista puede ser identificado con varios triángulos de la otra, para los cuales se cumplen los criterios de las **Ecuación 6-3** y **Ecuación 6-4**, sin embargo se escoge la asociación que minimiza las diferencias de las partes izquierdas de estas inecuaciones.

Como criterio adicional, no incluido en el algoritmo de Groth (1986), se impone que la distancia entre el vértice de un triángulo y el correspondiente del triángulo asociado, no puede ser mayor a un número determinado de ε , el cual es fijado por el usuario (denominado “nEpsilon” en la pestaña “Identificación y ajuste”, de la ventana de selección de parámetros).

Una vez establecidas las asociaciones entre triángulos, se pasa a una fase final de eliminación de posibles asociaciones espurias, la cual sí es utilizada en Groth (1986), y consiste en calcular, para cada asociación, el siguiente parámetro:

$$\log M = \log p_A - \log p_B \quad \text{Ecuación 6-5}$$

donde p_A , p_B son los perímetros de los triángulos A y B asociados.

Dado que el parámetro M expresa el aumento de figuras al pasar de A a B, es de esperar que cualquier asociación espuria tenga un valor M significativamente distinto del promedio. El criterio para desechar una asociación determinada, es que su M sea mayor que la media de M más dos desviaciones estándar. El proceso es iterativo hasta que no existan más asociaciones que desechar, o se hayan desechado todas (Groth, 1986). En este último caso, la aplicación muestra un cuadro de diálogo informando que no pudo realizarse ninguna asociación.

La matriz Tm2 en el código contiene, en cada fila, los pares (x,y) de catálogo y los “reales” asociados:

$$Tm2_i = [x_{Cat_i} \ y_{Cat_i} \ x_{Real_i} \ y_{Real_i}] \quad \text{Ecuación 6-6}$$

6.6 Ajuste

Si pudo establecerse una asociación de ocho o más pares de puntos, lo que resta por hacer es intentar hallar los parámetros que nos permiten pasar de coordenadas (x,y), tal como se definen en la Figura 52, a coordenadas horizontales (z,Az).

El primer paso entonces es construir una matriz, denominada XYZA, cuyas filas contienen los valores x,y del punto real i, y los (z,Az) de la estrella de catálogo i asociada al anterior.

Posteriormente, se ingresa en un proceso iterativo de ajuste, consistente en eliminar puntos espúreos del ajuste, hasta que el valor RMS de los residuos sea menor que un determinado valor o se alcance el mínimo de 8 puntos. El valor mínimo RMS permitido para salir de la iteración es dos veces la resolución media de la imagen ($=FOV/2 \cdot R$, donde R es el radio de la imagen todo cielo, y FOV su campo o *Field Of View*).

Antes de describir el proceso de ajuste, es preciso señalar que en las expresiones que siguen, las coordenadas (x',y') refieren al sistema de coordenadas que se muestra en la Figura 55:

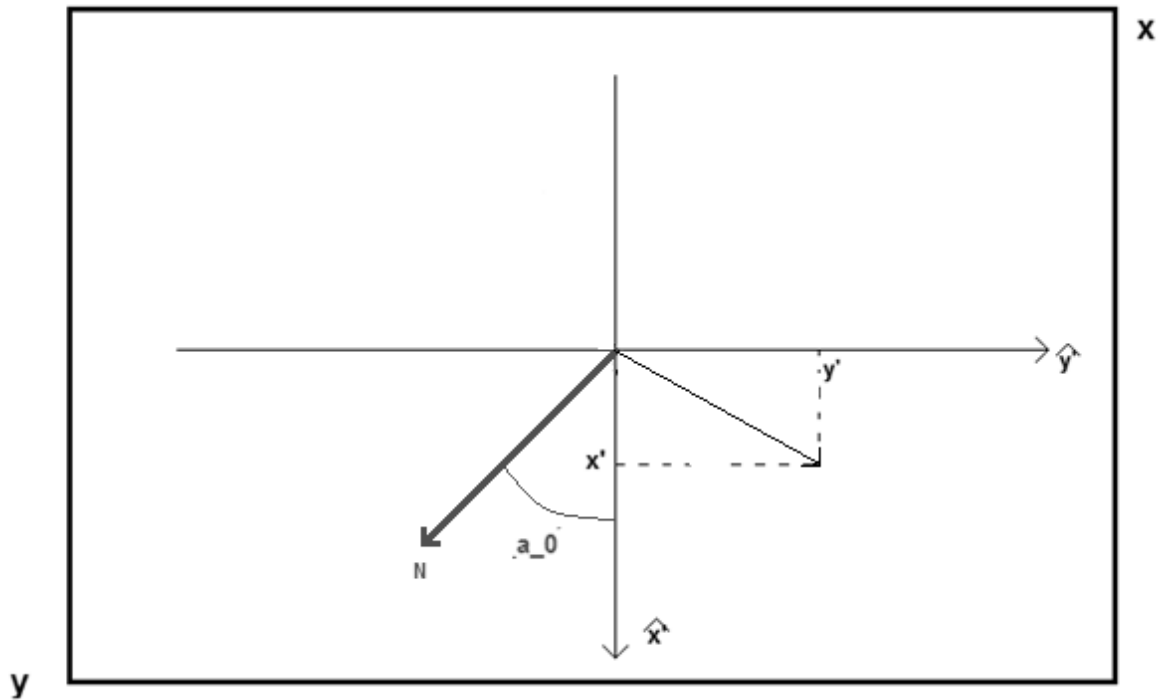


Figura 55: Sistema de coordenadas empleado en algoritmo de ajuste.

En lo que resta del apartado, se descartan los apóstrofes por simplicidad. El proceso de ajuste sigue tres pasos:

1. Buscar un ajuste de mínimos cuadrados a:

$$\tan(Az - a_0) = \frac{y - y_0}{x - x_0} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

donde:

a_0 es el ángulo de giro de la dirección norte con respecto al eje x' .

x_0, y_0 son las coordenadas del cenit.

Estos son los parámetros a determinar.

2. Buscar un ajuste de mínimos cuadrados a:

$$\tan(Az - a_0) = \frac{y - y_0}{x - x_0}; \quad \text{Ecuación 6-8}$$

$$z = V \cdot r; \quad \text{Ecuación 6-9}$$

donde (Borovicka et al, 1995):

$$r = C \cdot \left[\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + A(y - y_0) \cos(F - a_0) - A(x - x_0) \sin(F - a_0) \right] \quad \text{Ecuación 6-10}$$

Los parámetros a determinar aquí son a_0 , x_0 , y_0 , A , F , C , V , y para los tres primeros se utilizan como valores iniciales los obtenidos en el paso anterior.

Los parámetros A , F y C son los parámetros de la cámara, y “definen la posición de la placa con respecto al eje óptico. A y F expresan la inclinación de la placa y C expresa el corrimiento de la placa a lo largo del eje óptico. C es igual a la unidad cuando el centro de la placa está a una distancia estándar de la lente (la distancia focal nominal)” (Borovicka et al., 1995).

V es uno de los parámetros de la lente.

3. Buscar un ajuste de mínimos cuadrados a:

$$u = Vr + Sr^2 + Pr^3; \quad \text{Ecuación 6-11}$$

$$b = a_0 - E + \tan^{-1} \left(\frac{y - y_0}{x - x_0} \right); \quad \text{Ecuación 6-12}$$

$$\cos z = \cos u \cos \varepsilon - \sin u \sin \varepsilon \cos b; \quad \text{Ecuación 6-13}$$

$$\sin(a - E) = \frac{\sin b \sin u}{\sin z}; \quad \text{Ecuación 6-14}$$

Las expresiones provienen de Borovicka et al (1995), excepto la primera, en la cual se escogió un polinomio de tercer grado en lugar de los términos exponenciales que aparecen en dicho trabajo. ε y E son los parámetros que describen la desviación del eje óptico del cenit local.

Como en el paso 2, se utiliza como valores iniciales de los parámetros que se repiten los obtenidos en el paso anterior, en este caso, los de a_0 , x_0 , y_0 , A , F , C y V .

Luego de este último paso, se calculan los residuos siguientes:

$$res_i = (z_{CAT,i} - z_{Calc,i})^2 + (Az_{CAT,i} - Az_{Calc,i})^2 (\sin z_{CAT,i})^2 \quad \text{Ecuación 6-15}$$

donde el subíndice CAT refiere a catálogo (valores “verdaderos”), y Calc refiere a valores (z, Az) del punto asociado a la estrella i , calculados a partir de las ecuaciones **Ecuación 6-11** a **Ecuación 6-14** utilizando los parámetros obtenidos del ajuste y sus valores (x, y).

Finalmente, se calcula el siguiente error RMS:

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n res_i}{n}}$$

Ecuación 6-16

y se elimina el punto con el mayor residuo res_i . La iteración comienza nuevamente, siempre y cuando e_{RMS} sea mayor que dos veces la resolución media de la imagen, o se haya alcanzado los ocho puntos.

7 Calibración Fotométrica

Una vez que se ha realizado la calibración astrométrica, se dispone de n puntos utilizados en la misma, cuyo número mínimo es de seis.

Estos puntos pueden ser utilizados para realizar una calibración fotométrica, es decir, para poder determinar los parámetros que nos permitan pasar de flujo integrado en una imagen (restado el cielo de fondo), a magnitud aparente. El propósito de esto es posibilitar la determinación del brillo de un bólido detectado, en cada frame que compone el video del evento, y obtener así curvas fotométricas del bólido (evolución temporal de la magnitud aparente).

La relación entre magnitud aparente y flujo integrado es la siguiente:

$$m_V = C - 2.5 \cdot \log \left(\sum_i \sum_j I_{ij} - I_{ij, \text{cielo}} \right) - k \cdot x \quad \text{Ecuación 7-1}$$

donde:

m_V es la magnitud aparente de catálogo (se excluyen eventuales planetas).

I_{ij} es la intensidad del pixel (i,j) , en la imagen integrada menos el cielo de fondo, el cual es obtenido a partir de un filtro de mediana, implementado en la función `ordfilt2` de MATLAB. La integración (doble sumatoria) se realiza en un cuadrado centrado en la posición de la estrella, y de lado 3 o 6 pixeles (resolución 320x240 o 640x480, respectivamente).

x es la masa de aire. Aquí se utiliza la aproximación de Kasten & Young (1989):

$$x = \frac{1}{\cos z + 0.50572 \cdot (6.07995 + 90 - z_d)^{-1.6364}} \quad \text{Ecuación 7-2}$$

donde z es el ángulo cenital de la estrella, y z_d es z expresado en grados. El término $k \cdot x$ es necesario para corregir el efecto de extinción atmosférica.

Se trata entonces de encontrar los parámetros C y k , para un conjunto de valores z , I_{ij} , m_V . El algoritmo calcula estos valores, que nos permiten pasar de flujo integrado a magnitud aparente mediante la **Ecuación 7-1**.

Las figuras **Figura 56** y **Figura 57** muestran el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para la calibración fotométrica. Nótese que se aplica un filtro estadístico de orden 2 a la imagen integrada “s” (obtenida al integrar un video importado). Este filtro, aplicado dos veces, permite obtener el cielo de fondo, el cual es necesario restar a “s” para la calibración, como se indicó anteriormente. Una descripción detallada del algoritmo de este filtro e implementado en la función `ordfilt2` de MATLAB, se da en Huang, Yang & Tang (1979).

Se obtiene así la imagen “ImagenFlujo”, la cual es preciso dividir entre el número de frames efectivo de la integración, una variable interna del software obtenida también al integrar el video dado. Esta variable no es necesariamente igual al número total de frames del video, debido, como se ha señalado anteriormente, a la existencia de posibles “drops”.

Se obtiene así una imagen, “Imagenflujo”, que es un promedio de todos los frames del video, restado el cielo de fondo. Los flujos integrados de cada estrella, calculados sobre esta imagen promedio, son los utilizados para el ajuste, conjuntamente con su ángulo cenital (para la corrección por extinción atmosférica en la **Ecuación 7-1**) y magnitud aparente de catálogo.

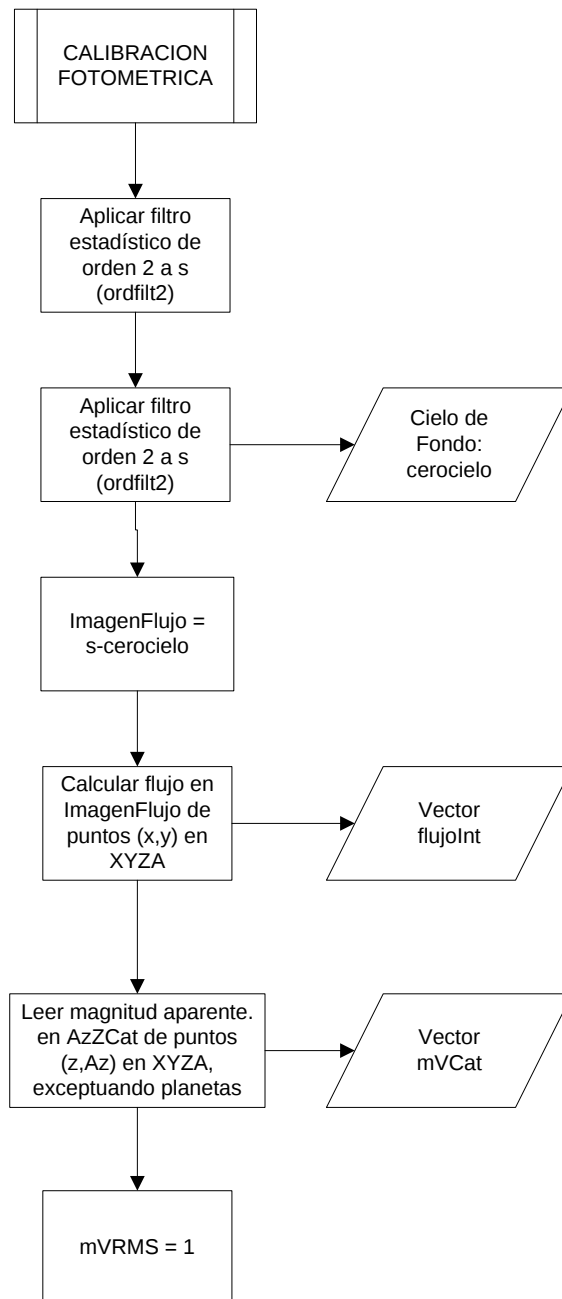


Figura 56: Diagrama de flujo de algoritmo de calibración fotométrica.

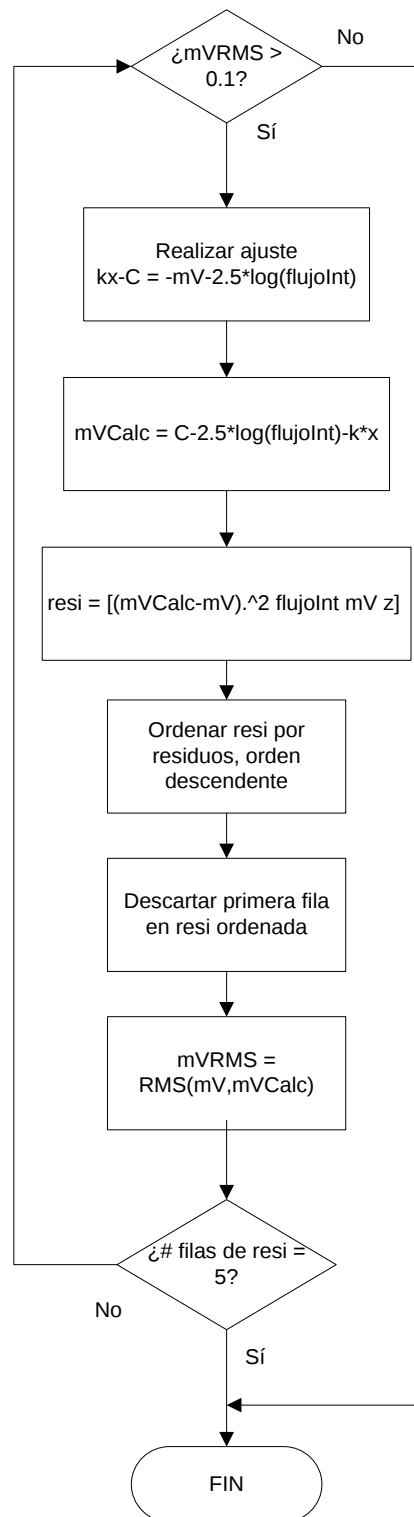


Figura 57: Diagrama de flujo de algoritmo de calibración fotométrica (cont.).

8 Procesamiento de bólidos detectados

El procesamiento del video de un bólido que ha sido detectado tiene por objeto obtener, por un lado, las coordenadas horizontales (z, Az) del centro del bólido en cada uno de los frames que componen el video del evento, y por otro, la curva de luz del bólido, es decir, la evolución temporal de la magnitud aparente durante el tiempo que dura el video.

En otras palabras, el objetivo final es obtener cuatro vectores:

1. z , el ángulo cenital del centro del bólido en cada frame.
2. Az , el acimut del centro del bólido en cada frame.
3. m_v , la magnitud aparente del bólido en cada frame.
4. t , el tiempo de cada frame, relativo al comienzo del registro del evento, indicado en el propio nombre del archivo de video generado en la detección. Se expresa en segundos posteriores al registro del evento.

De lo expuesto se deduce que los cuatro vectores indicados tienen el mismo tamaño, igual al número de frames del video.

El primer paso es abrir un video conteniendo un bólido, a través de la opción “Abrir evento...” del ítem “Archivo” en el menú principal.

Mediante las opciones “Astrometría...” y “Fotometría...” en el ítem “Procesamiento de bólido” del menú principal de la aplicación, es posible obtener estos vectores, así como los gráficos $z(t)$, $Az(t)$ y $m_v(t)$.

A continuación se describen los sucesivos pasos que permiten la obtención de estos vectores.

8.1 Apertura de archivo

Este paso implica simplemente que el usuario abre en forma sucesiva el archivo de video del evento, y posteriormente el archivo de texto generado en el momento de la detección por la aplicación Bólidos. Este archivo de texto contiene los tiempos de cada frame, que devuelve el método `getdata` de MATLAB.

Al haber concluido este paso, el software dispone internamente del vector de tiempos, del video del evento y de su fecha y hora de detección, lo cual está contenido en el nombre del archivo generado por la aplicación Bólidos. Cabe aclarar que esta fecha y hora corresponden al instante inmediatamente anterior al comienzo de la adquisición de video, accionada de acuerdo al algoritmo descrito en el apartado 5.

De producirse un error con el archivo de texto, el vector de tiempo simplemente contendrá los números $1 \dots n$, donde n es el número de frames del video.

La **Figura 58** describe este primer paso del algoritmo:

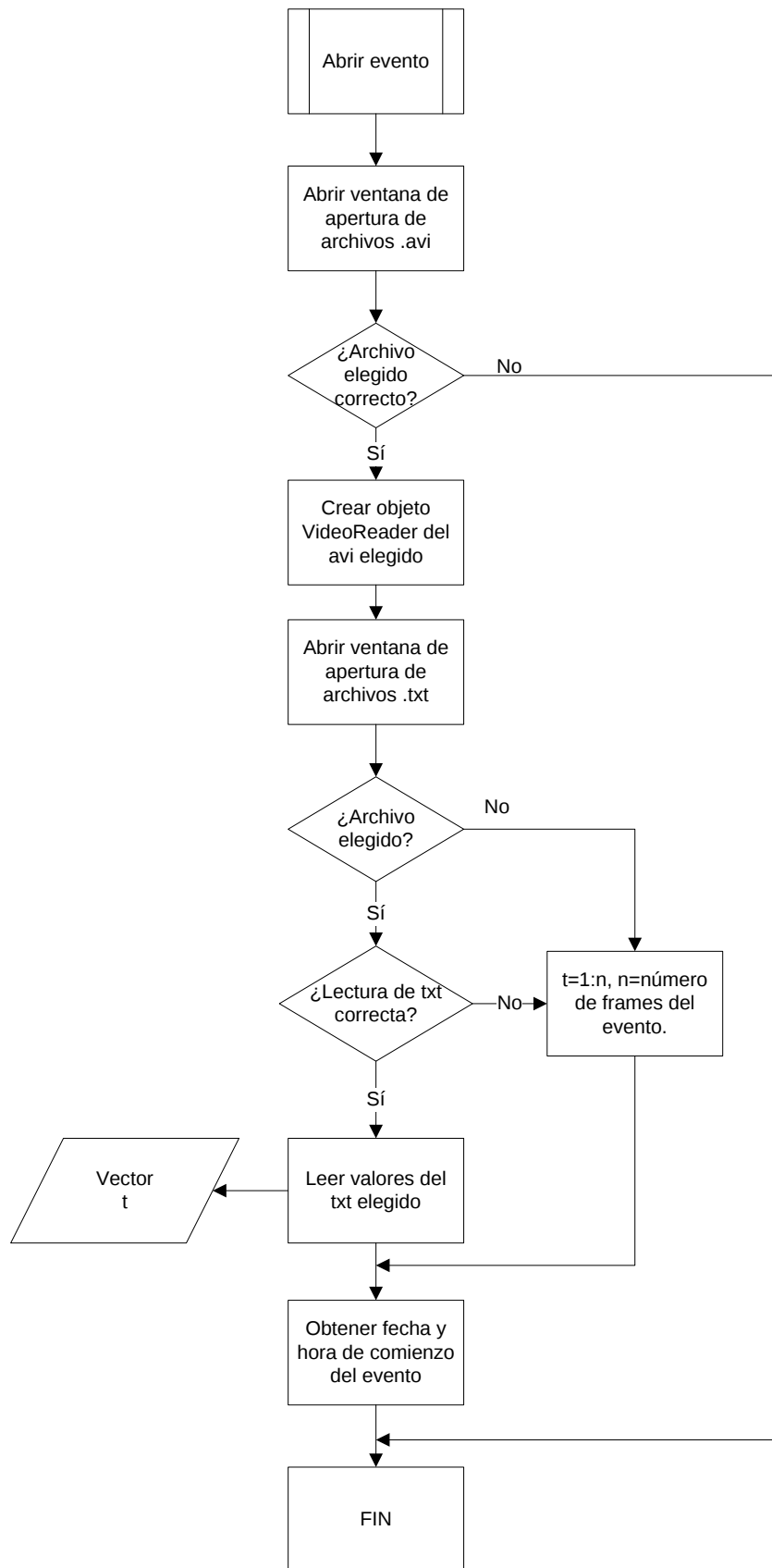


Figura 58: Algoritmo de apertura de archivo de video de bólide, y archivo de texto conteniendo los tiempos relativos de cada frame.

8.2 Astrometría de bólido detectado

Luego de haber abierto un video conteniendo un bólido, y de haber realizado una calibración astro- y fotométrica (ver apartados 6 y 7), es posible obtener los vectores z y Az descritos en el apartado anterior.

Para ello, es preciso determinar un set de parámetros que nos permitan poder obtener el centro del bólido en todos los frames que componen el video. Una vez fijados estos parámetros manualmente por el usuario, el software se encarga de hallar el centro del bólido en todos los frames, y para cada par de coordenadas (x_k, y_k) obtenido del centro en el frame k , se hallan los valores (z_k, Az_k) correspondientes.

Estos pasos se indican en la **Figura 59**:

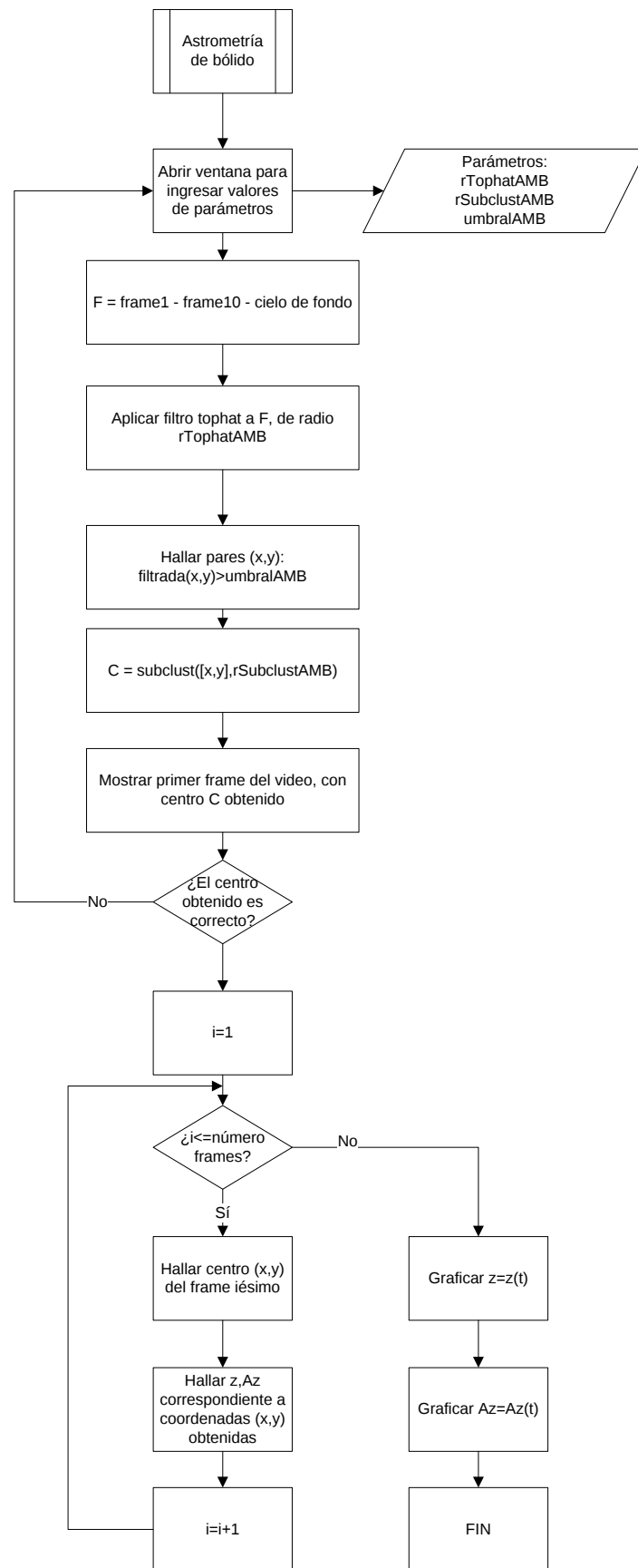


Figura 59: Algoritmo para determinación de coordenadas (z,Az) del centro del bólido.

Como muestra esta figura, en primer lugar se ingresa en un loop que tiene por objeto determinar el set de parámetros que nos permiten hallar unívocamente el centro del bólido. Para hallar este centro, se resta al primer frame el cielo de fondo hallado en la calibración fotométrica (ver apartado 7), y además se resta un frame posterior, que contendrá los mismos astros que el primero (estrellas, y eventualmente planetas y/o luna). Esto se hace a los efectos de eliminar la posibilidad de que el algoritmo “confunda” el bólido con alguno de estos astros (especialmente la luna).

A la imagen obtenida a partir de estas restas, se le aplica primero un filtro tophat (de radio especificado por el usuario al comienzo del algoritmo, en la ventana de elección de parámetros), y luego se iguala a 0 la intensidad de cualquier pixel cuyo brillo no supere el umbral especificado por el usuario.

De esta manera, lo esperable es que en este punto nuestra imagen esté compuesta por ceros excepto en los píxeles que componen el bólido. Entonces, el centro del bólido se determina mediante el método subclust de MATLAB, que halla el centro de un cúmulo de puntos dados en el plano (x,y).

Una vez obtenido el centro, el software muestra una imagen del primer frame y en azul el centro hallado. Si el resultado no es correcto, se vuelve al primer paso, es decir, a una mejor elección del set de parámetros.

Si, por el contrario, el centro hallado es satisfactorio, se recorre todo el video, frame por frame, se halla el centro en cada frame y sus coordenadas (z,Az) a partir de los parámetros hallados en la calibración astrométrica (ver apartado 6).

Por último, se grafican las curvas $z=z(t)$, y $Az=Az(t)$.

Este algoritmo implica una cierta intervención manual del usuario al comienzo del algoritmo, como se indicó. Sin embargo, una vez fijados los parámetros, estos se utilizan para todos los frames restantes, con resultados muy satisfactorios.

El método significa una cierta ventaja sobre otros trabajos, por ejemplo el descrito en Weryk et al. (2008). De acuerdo a este trabajo, su algoritmo requiere de intervenciones manuales en casos de eventos muy brillantes, aunque a juzgar por lo expuesto por los autores, no se disponía de un método que en todas las situaciones funcionara satisfactoriamente: “Additional work on finding an automated method that works for all meteor cases is ongoing” (Weryk et al., 2008). El algoritmo descrito en este trabajo, si bien requiere en todas las situaciones de una calibración manual inicial (aplicable solamente al primer frame), resuelve satisfactoriamente todas las situaciones presentadas y de un modo sistemático.

8.3 Fotometría de bólido detectado

Para poder obtener la curva de luz de un bólido, es preciso que previamente hayamos realizado la astrometría del evento (ver apartado anterior). Esto es necesario porque de

este modo disponemos previamente de las coordenadas (x_k, y_k) del centro del bólido en cada frame k , y por lo tanto resulta más sencillo realizar la fotometría en cada frame.

El algoritmo se describe en la **Figura 60**:

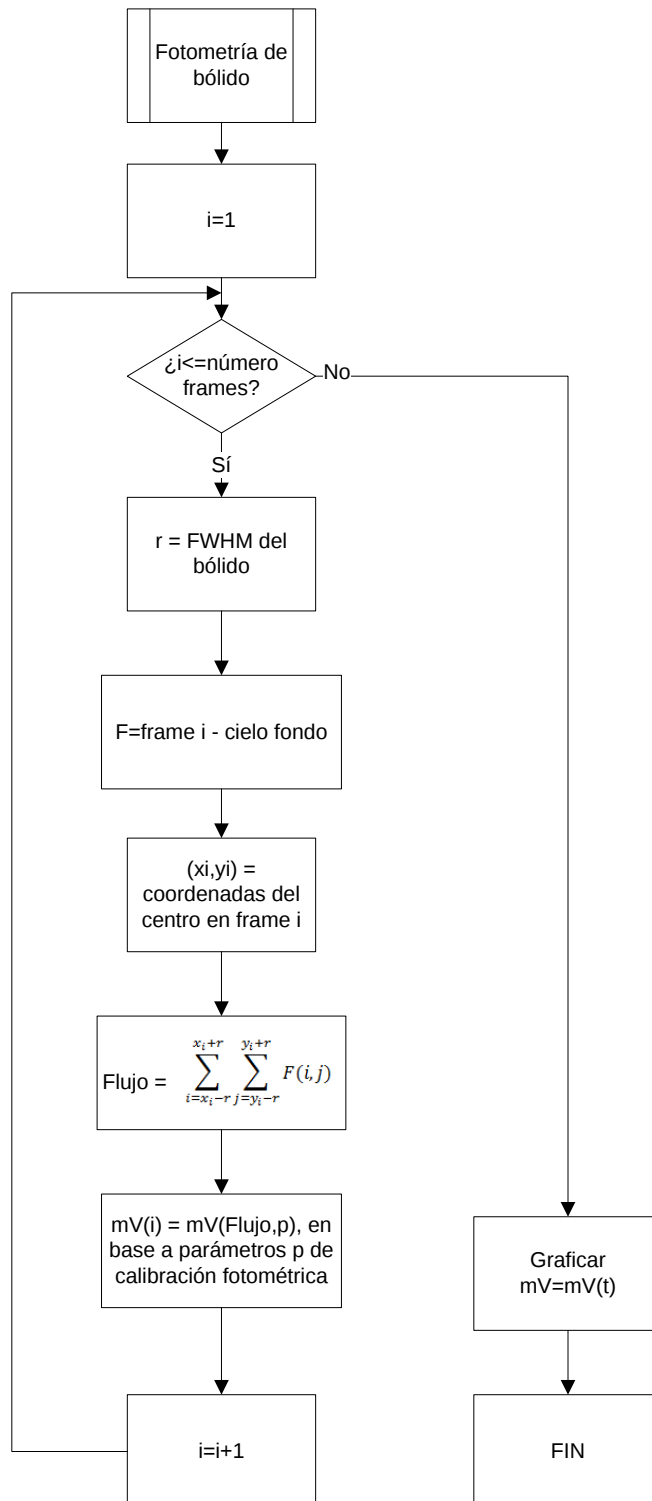


Figura 60: Algoritmo para la obtención de curva de luz de bólido detectado.

El radio r obtenido como el FWHM (*Full-Width at Half-Maximum*) del bólido indica la extensión en el plano x,y sobre la cual se integra el brillo para obtener el flujo integrado total del bólido. La **Figura 61** ilustra estas magnitudes:

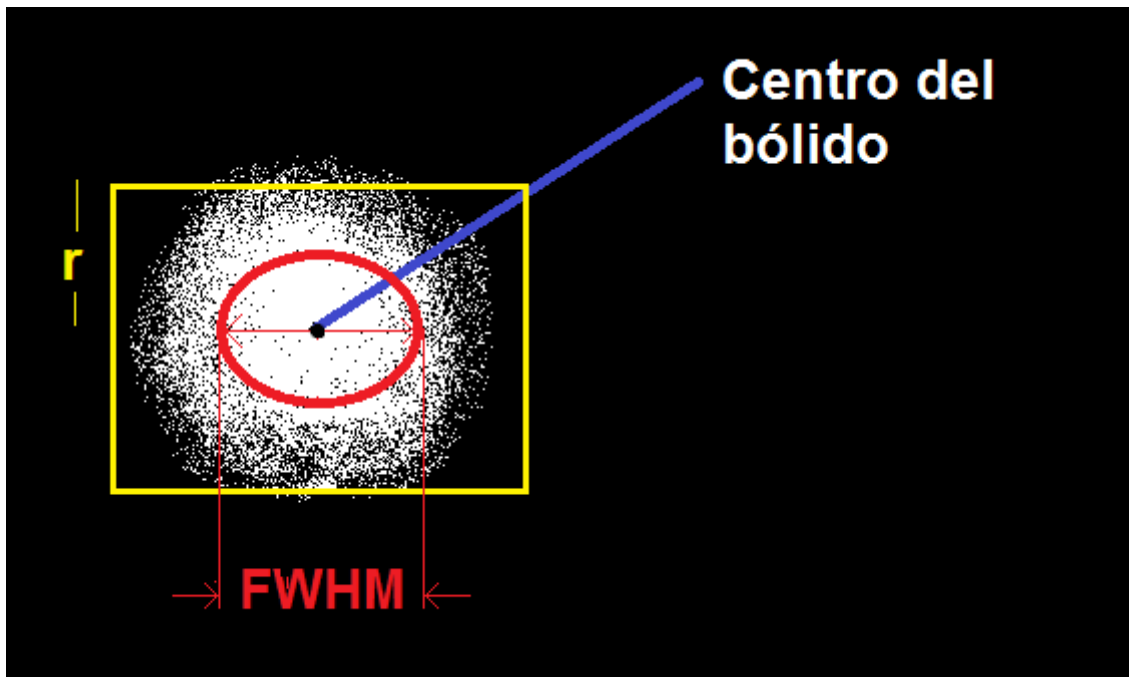


Figura 61: Parámetro r en la integración del flujo total de un bólido.

Para hallar el FWHM del brillo del bólido, se halla el promedio del brillo en los bordes de un cuadrado centrado en el bólido, y de lado w , comenzándose con $w=1$. Si este valor promedio es mayor que la mitad del brillo del centro del bólido, w se incrementa en 1, y se repite el proceso, hasta que el promedio del brillo en el borde del cuadrado sea menor o igual a la mitad del brillo central. Una vez que se cumple esta condición, se sale del loop y el valor obtenido de w corresponde a $\sim \text{FWHM}/2$, por lo que r se fija a $2*w$.

9 Resultados

9.1 Nubosidad

9.1.1 Introducción

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los meses de junio-septiembre de 2012.

Para cada mes se muestran 3 gráficas, que corresponden aproximadamente a 10 días cada una. Las gráficas muestran la evolución temporal de promedios de 5 minutos de FN. Dado que la adquisición de imágenes se realiza una vez por minuto, las FN graficadas son promedios de las FN de 5 imágenes.

En cada gráfica se indica, para cada día, la media diaria correspondiente, en rojo.

9.1.2 Junio 2012

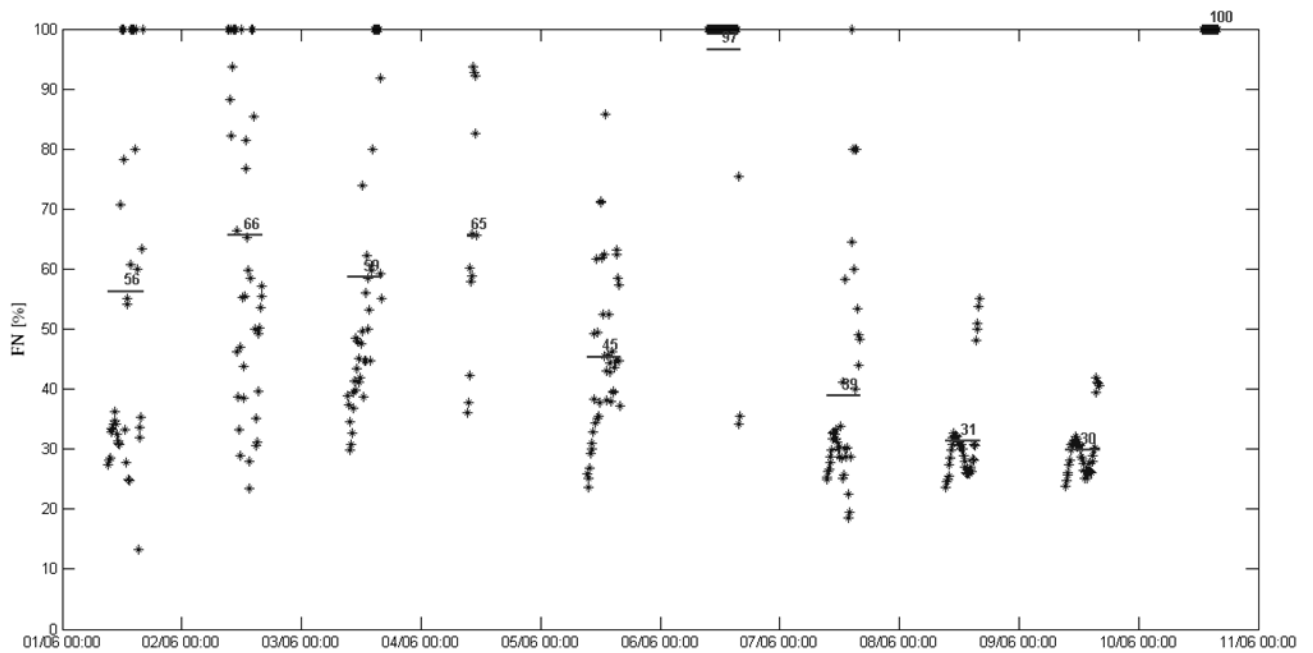


Figura 62: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 1-10/6/2012.

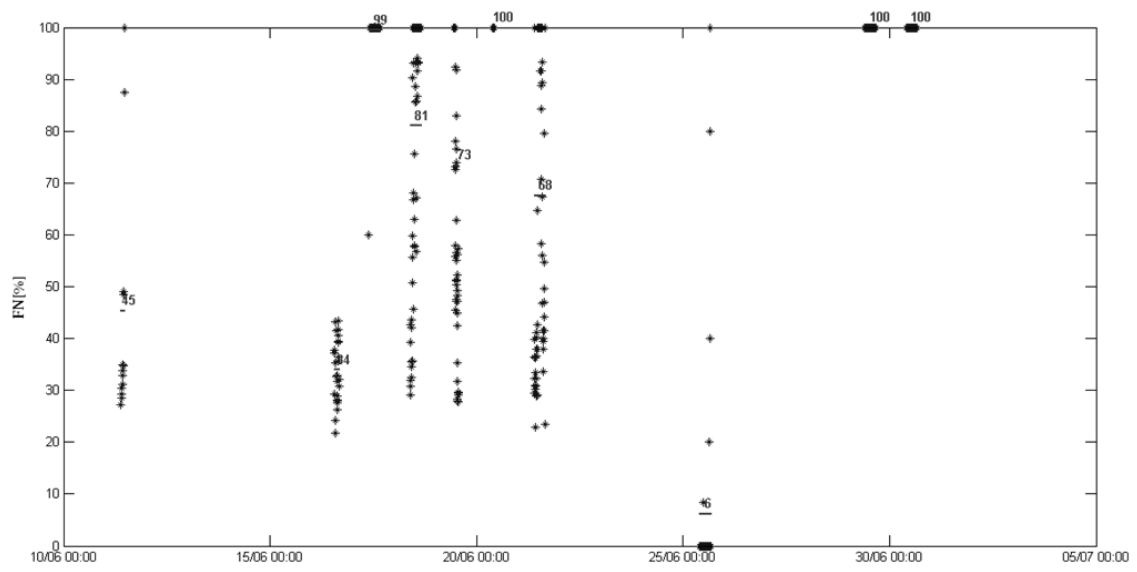


Figura 63: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 11-30/6/2012.

9.1.3 Julio 2012

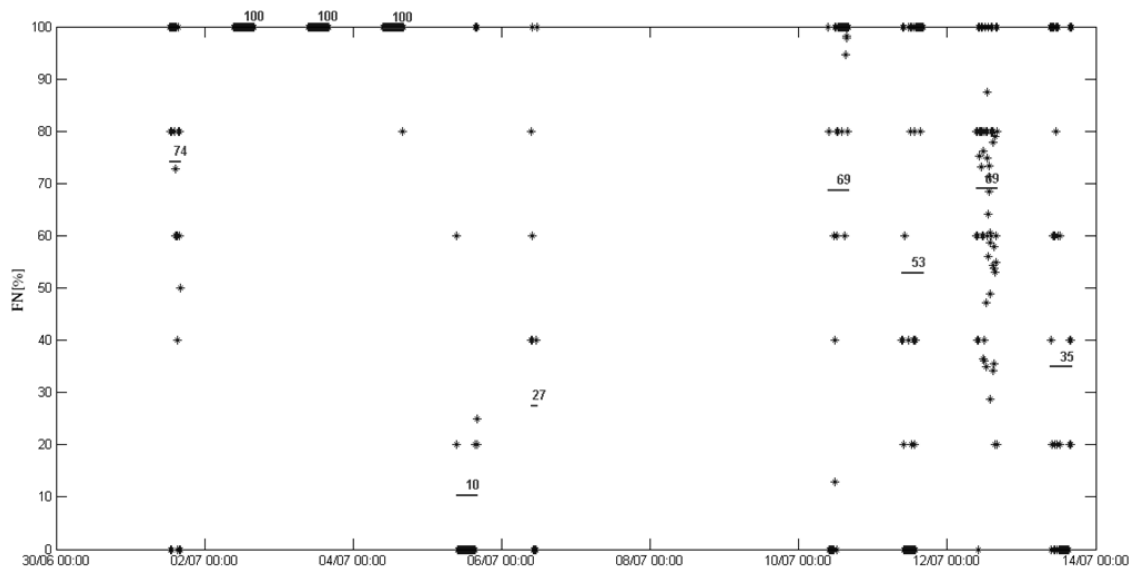


Figura 64: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 1-13/7/2012.

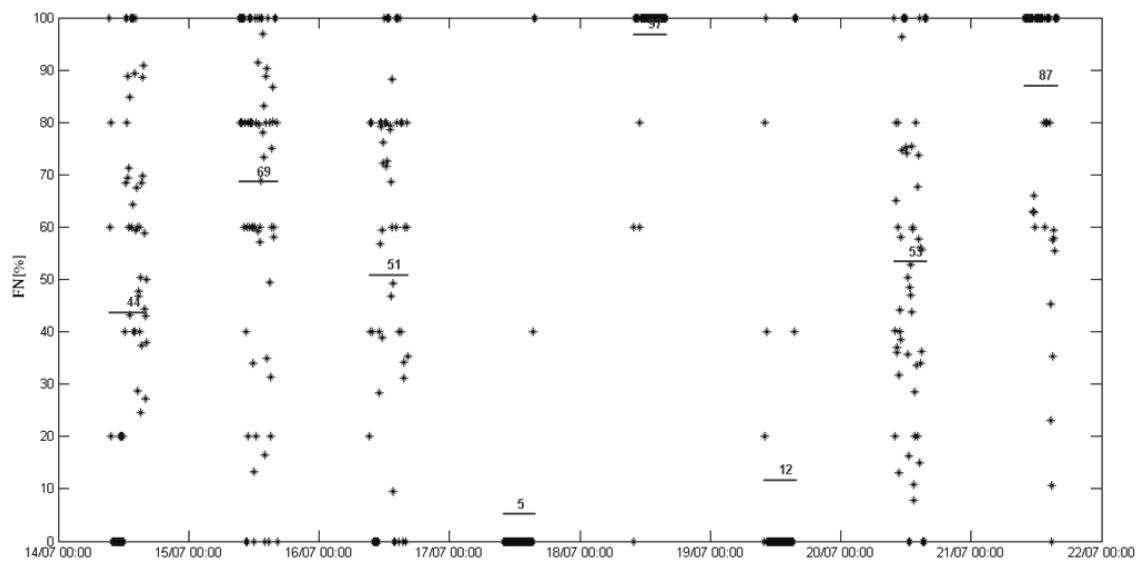


Figura 65: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 14-21/7/2012.

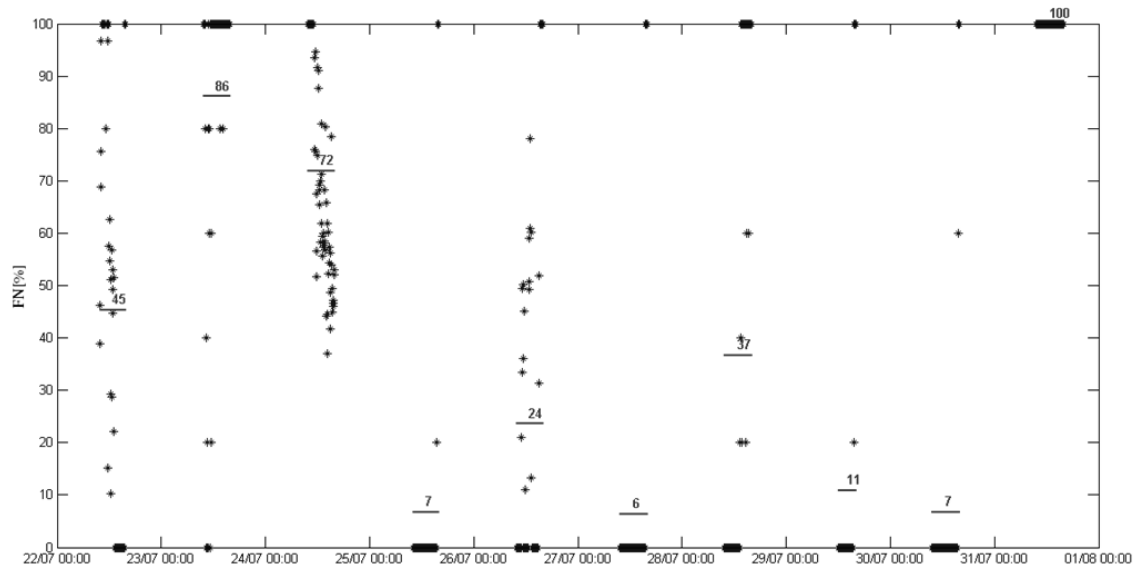


Figura 66: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 22-31/7/2012.

9.1.4 Agosto 2012

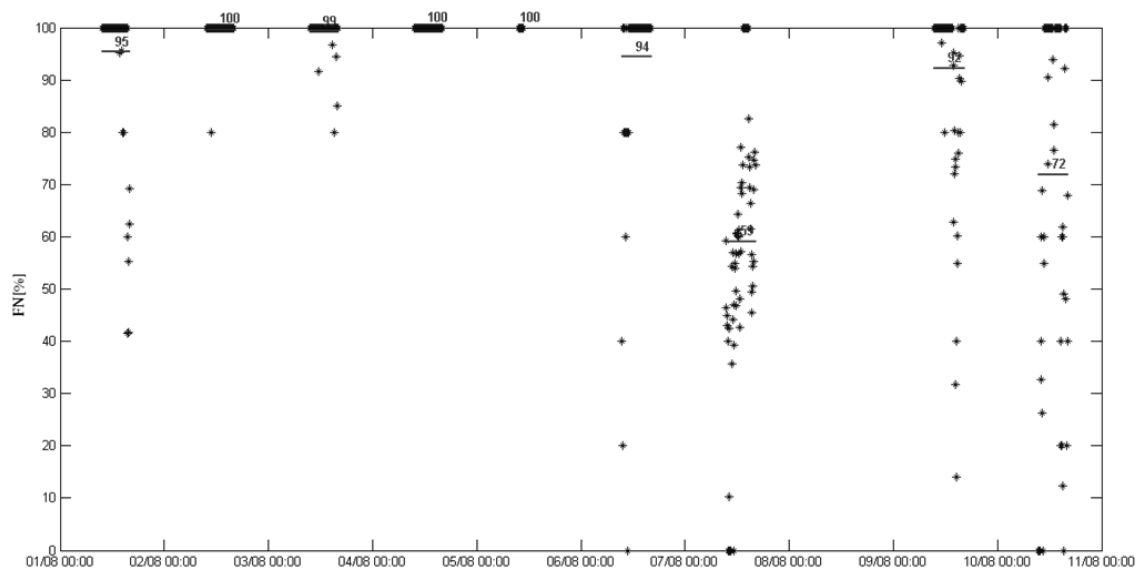


Figura 67: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 1-10/8/2012.

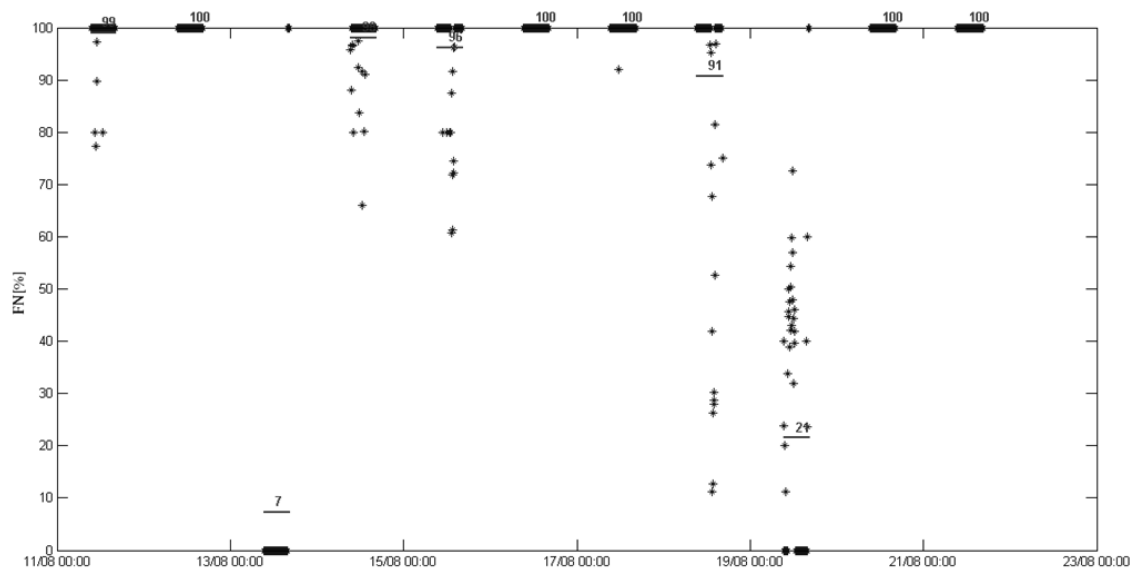


Figura 68: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 11-21/8/2012.

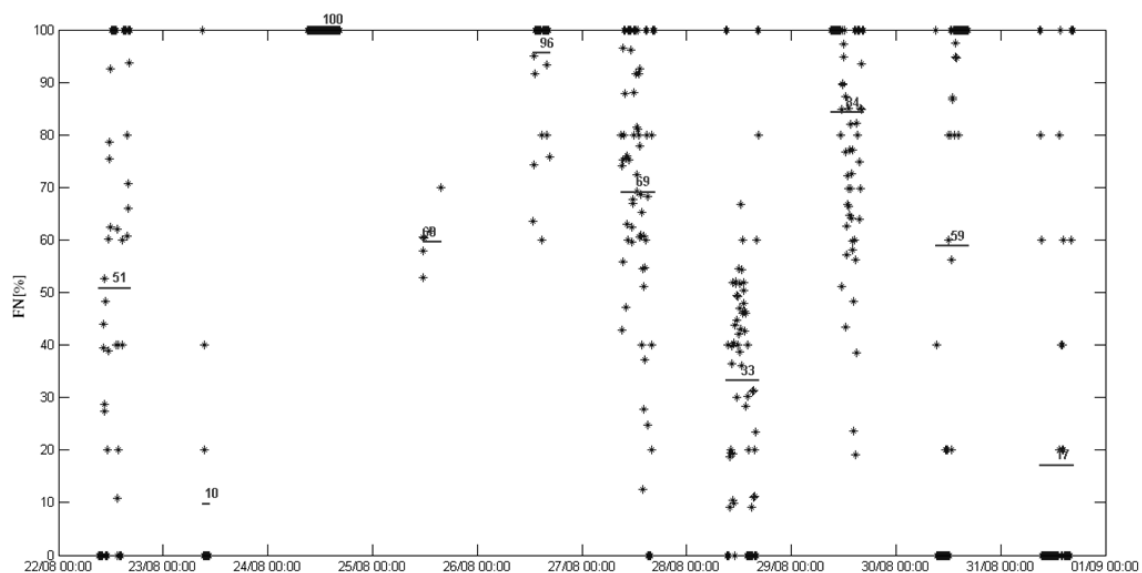


Figura 69: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 22-31/8/2012.

9.1.5 Septiembre 2012

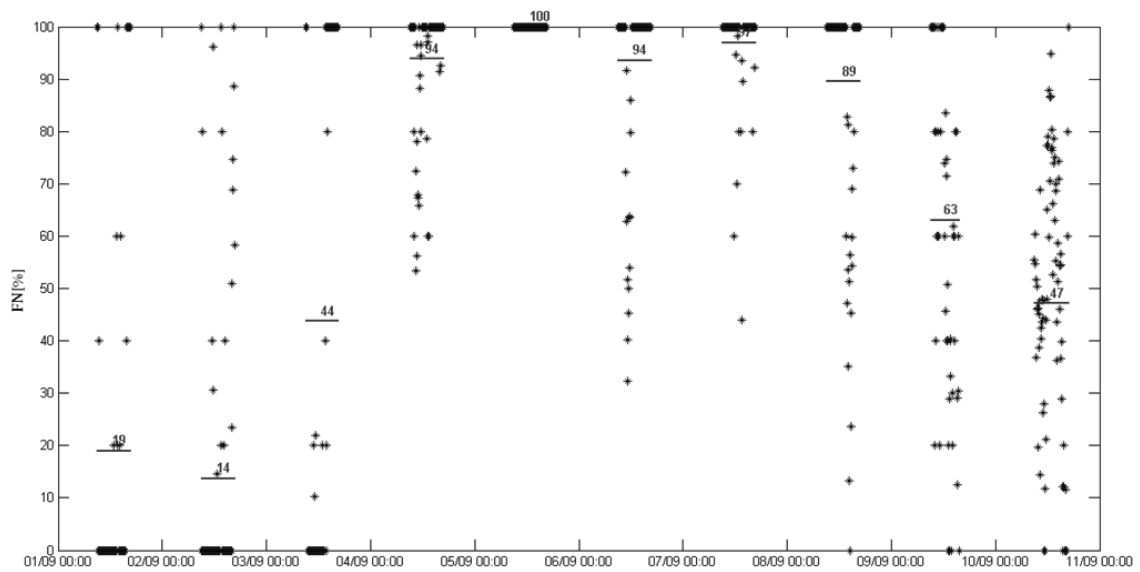


Figura 70: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 1-10/9/2012.

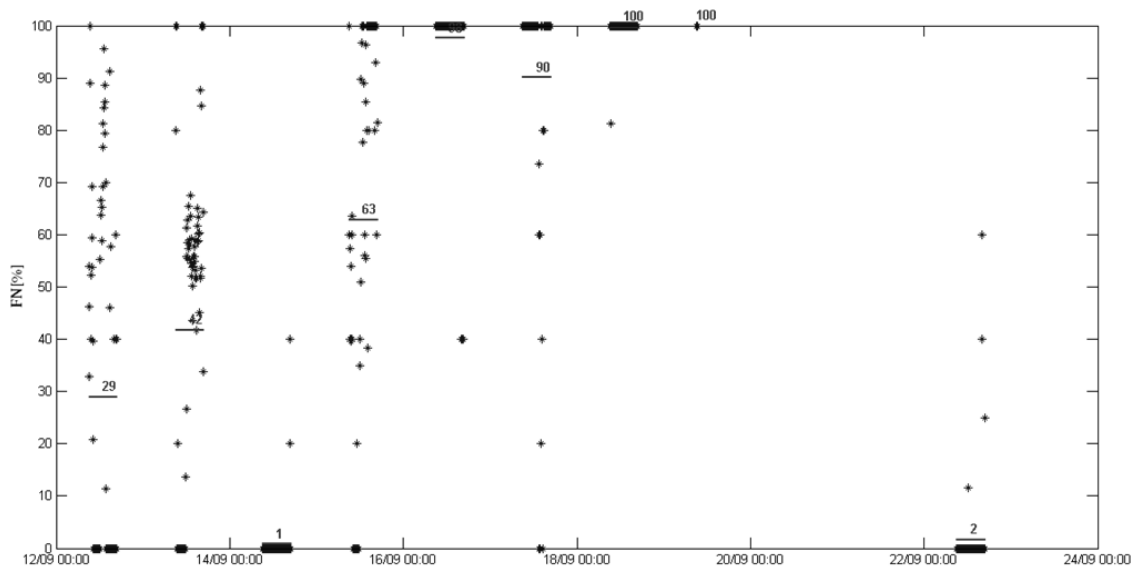


Figura 71: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 12-22/9/2012.

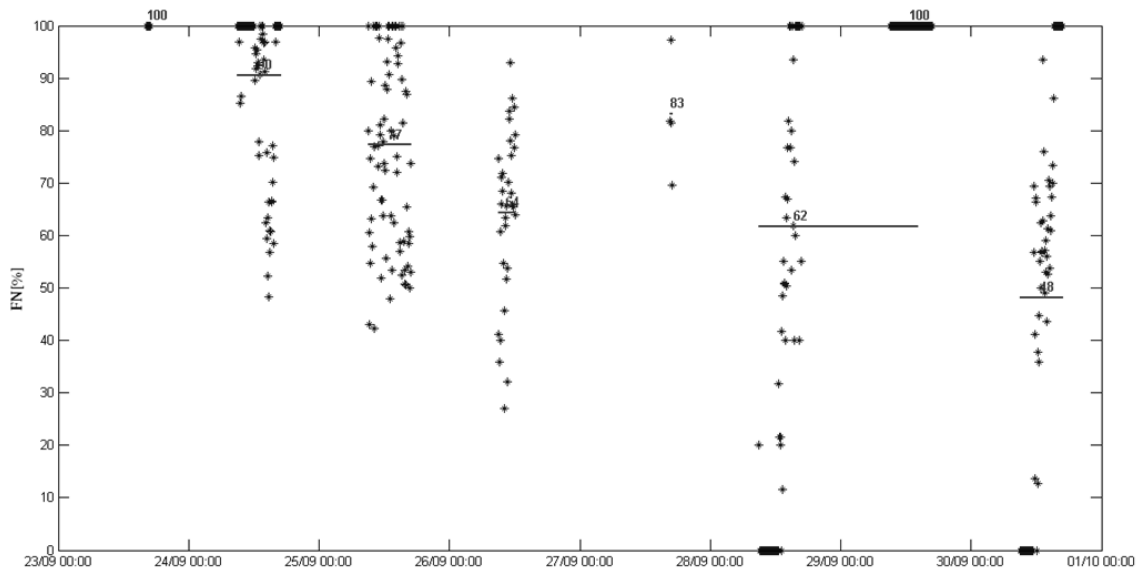


Figura 72: Evolución temporal de FN (promediada cada 5 min.) durante los días 23-30/9/2012.

9.1.6 Discusión

Si observamos las figuras **Figura 62** a **Figura 72** notamos que la variabilidad de las FN a lo largo de un día es importante. Cabe destacar que esta variabilidad es intrínseca al sistema, y no es producto de clasificaciones o cálculos erróneos del algoritmo. Como hemos visto, el desempeño del clasificador y del algoritmo en general es muy satisfactorio, y además los errores producidos por posibles clasificaciones erróneas se mitigan al promediar 5 imágenes.

Para ejemplificar esto, la **Figura 73** muestra la evolución de la FN durante el día 10/9/2012, y superpuestas se muestran algunas imágenes de ese día, indicándose también, en la esquina superior derecha de cada imagen, la hora correspondiente.

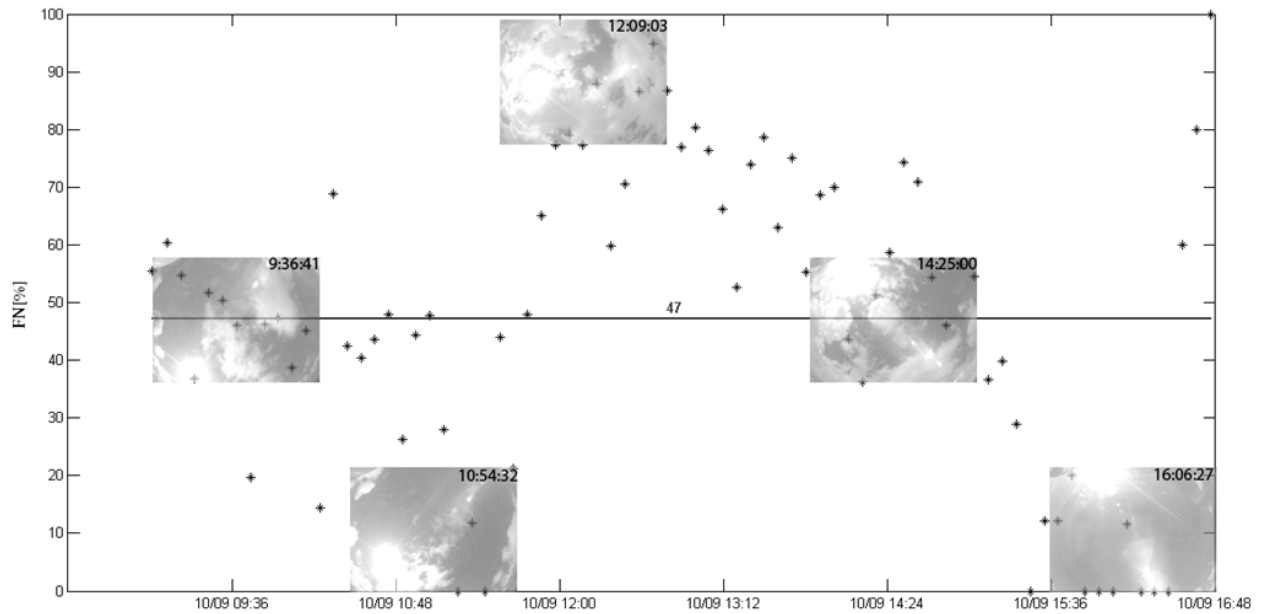


Figura 73: Evolución temporal de FN durante el día 10/9/2012. Se han superpuesto imágenes de ese día a distintas horas, las cuales se indican en la esquina superior derecha de cada imagen. La recta trazada indica la media diaria.

Como puede apreciarse, el día comenzó con una FN $\sim 50\%$, durante la mañana se fue despejando hasta llegar a un cielo totalmente despejado a las 11:30 hs. aproximadamente. Luego comenzó a nublarse nuevamente hasta llegar a un máximo de $\sim 85\%$ poco antes de las 13 hs, para después despejarse hasta volver a un cielo totalmente despejado a las 16 hs aproximadamente.

9.2 Captura de bólidos

Durante el período junio a octubre no fueron detectados bólidos. Sin embargo, entre los días 2 y 13 de noviembre de 2012, fueron detectados 5 bólidos, el primero de ellos de magnitud máxima $\sim -7.5 \pm 0.5$. Las horas totales de observación del período son unas 1000, aunque resulta muy difícil estimar cuántas de estas horas corresponden a condiciones de observación aceptables, a los efectos de realizar alguna comparación con las frecuencias de bólidos descritas en MCrosky (1968), Oberst et al (1997) o AMS (2012).

Durante el período, han sido detectados además distintos tipos de eventos (pájaros, aviones, rayos).

Por otro lado, se ha evaluado el algoritmo de detección mediante videos de eventos registrados por la *NASA's All Sky Fireball Network*. La simulación se hizo emulando en la mayor medida posible el algoritmo de detección en tiempo real, y los resultados son que para 10 videos introducidos al simulador, el algoritmo detectó los 10 bólidos.

De lo expuesto hasta aquí, puede inferirse que la causa por la que han sido detectados solamente cinco bólidos no reside en el sistema desarrollado en el presente trabajo, ni en lo que a hardware refiere (la magnitud límite es de entre ~ -3 y ~ -1.5 , a $z=60$ y $z=0$, respectivamente) ni en el software (puesto que se han detectado bólidos y otros eventos rápidos, y se ha evaluado el algoritmo con eventos detectados por otros sistemas).

Puede haber varias explicaciones, referidas más bien a las condiciones del sitio de observación, tanto en lo referente a contaminación lumínica como a condiciones meteorológicas, ya que el período considerado –como se ve en las figuras **Figura 62** a **Figura 72**– contiene pocos días despejados, y aun cuando no es posible extrapolar la FN de un día a la noche siguiente, es posible afirmar que las horas efectivas de observación son muy inferiores a las ~ 1000 h mencionadas al comienzo de este apartado.

9.3 Astrometría

9.3.1 Introducción

En este apartado se presentan los resultados del proceso de calibración astrométrica. Este proceso, descrito en el apartado 6, tiene como finalidad determinar los parámetros que nos permiten transformar las coordenadas (i,j) de cada pixel en una imagen de pseudo-larga exposición, a coordenadas horizontales (z,Az), donde z es el ángulo cenital y Az el acimut.

Los algoritmos fueron aplicados a imágenes obtenidas los días 18/01/2012, 23/06/2012 y 16/07/2012. El primero corresponde al primer prototipo con lente ojo de pez y la cámara KT&C (ver apartado 2.3), mientras que los dos restantes corresponden al prototipo definitivo, con la cámara Watec. La Tabla 7 indica los FOV de cada imagen:

Fecha	Sistema	Cámara	FOV	Resolución
18/01/2012	Primer prototipo ojo de pez	KT&C	165	640x480
23/06/2012	Prototipo definitivo	Watec 902 H3 Ultimate	180	640x480
16/07/2012	Prototipo definitivo	Watec 902 H3 Ultimate	170	320x240

Tabla 7: Configuraciones utilizadas para la obtención de resultados de calibración astrométrica.

A continuación se presentan los resultados para cada fecha.

9.3.2 Resultados del 18/01/2012

La **Figura 74** muestra la imagen integrada obtenida a partir de un video de 121 segundos de duración, el cual se integró por todo este tiempo (484 frames en total):

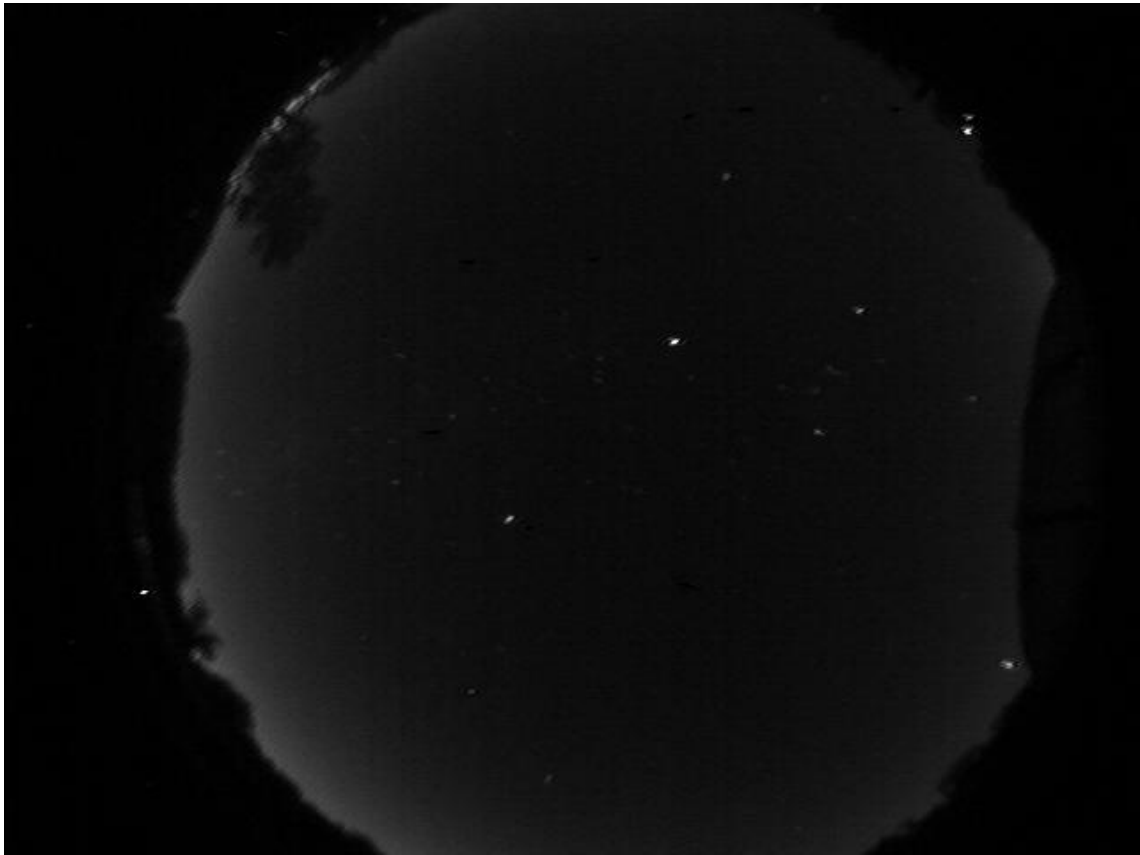


Figura 74: Imagen integrada de ~2 minutos, el 18/01/2012 a la hora 00:00:01.

La **Figura 75** muestra las estrellas de catálogo (en rojo) y las estrellas detectadas (en azul):

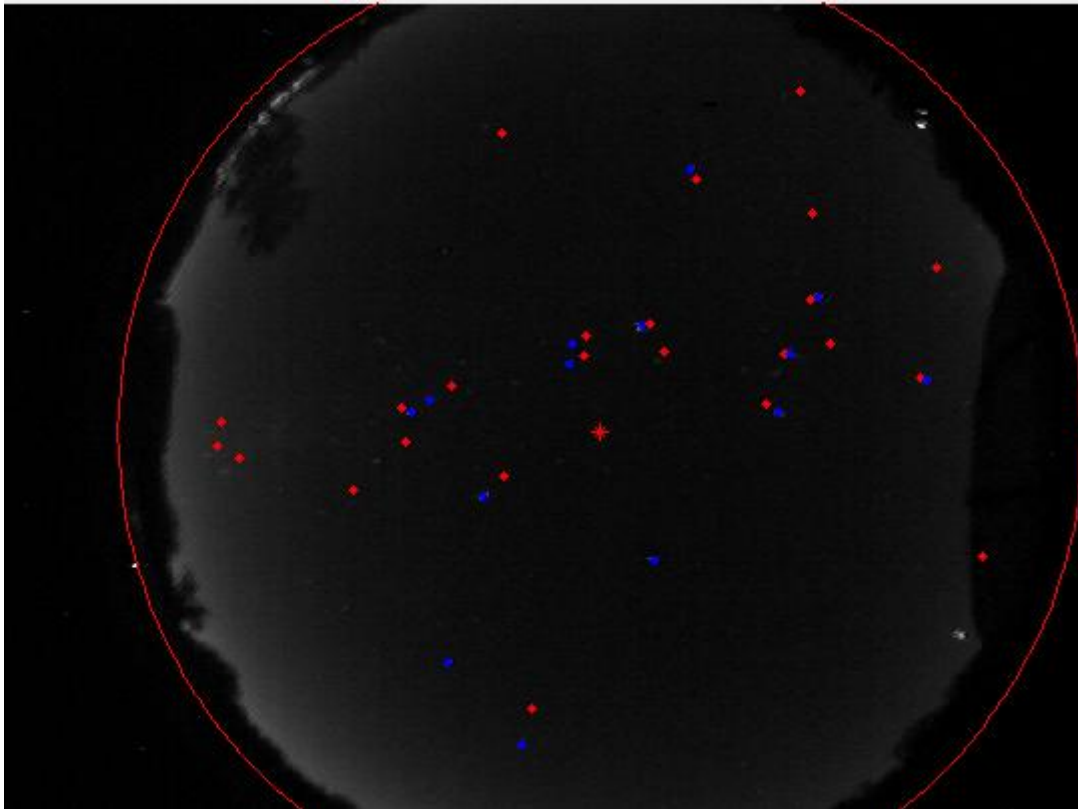


Figura 75: Estrellas detectadas (puntos azules) y estrellas de catálogo (puntos rojos).

La **Figura 76** muestra, enumeradas, las estrellas de catálogo y detectadas, asociadas una a una:

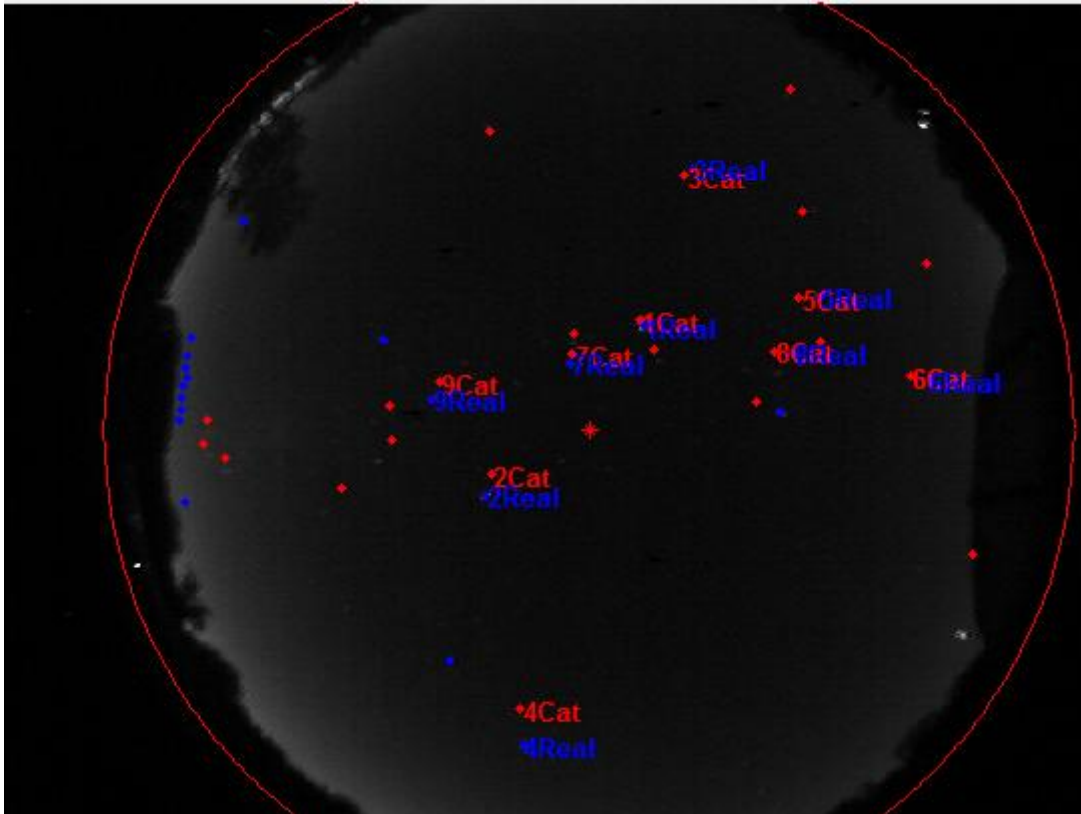


Figura 76: Asociación de estrellas de catálogo (puntos rojos) y detectadas (puntos azules), una a una. En total se realizaron 9 asociaciones.

Una vez que el algoritmo estableció una asociación entre ocho o más estrellas detectadas y sus correspondientes valores de catálogo, se procede a realizar el ajuste que se describe en el apartado 6.6.

El ajuste arroja los valores indicados en la Tabla 8 para los parámetros de las ecuaciones Ecuación 6-11 a Ecuación 6-14 :

Parámetro	Valor
a0	233.9°
x0	8.9 pixeles
y0	-1.1 pixeles
C	1.0
A	-7.31e-3
F	0.0°
V	16.1 arcmin/pixel
ε	0.0°
E	0.0°
S	0.0 arcmin/pixel ²
P	0.0 arcmin/pixel ³

Tabla 8: Valores de parámetros obtenidos en calibración astrométrica (18/01/2012).

Con los valores de la tabla anterior, las ecuaciones **Ecuación 6-11** a **Ecuación 6-14** se reducen a:

$$z = Vr;$$

$$Az = 233.9 + \tan^{-1} \left(\frac{y + 1.10}{x - 8.92} \right);$$

Donde r es (**Ecuación 6-10**):

$$r = \left[\sqrt{(x - 8.9)^2 + (y + 1.1)^2} - 4.31 \cdot 10^{-3} \cdot (y + 1.1) + 5.91 \cdot 10^{-3}(x - 8.9) \right]$$

Con estas ecuaciones puede determinarse fácilmente el FOV real, a partir de puntos en la imagen convenientemente elegidos (el FOV de la Tabla 7 es el valor inicial utilizado en el ajuste). La **Figura 77** muestra una serie de puntos elegidos sobre el horizonte, siguiendo el contorno de árboles, bóveda del observatorio y otros obstáculos:

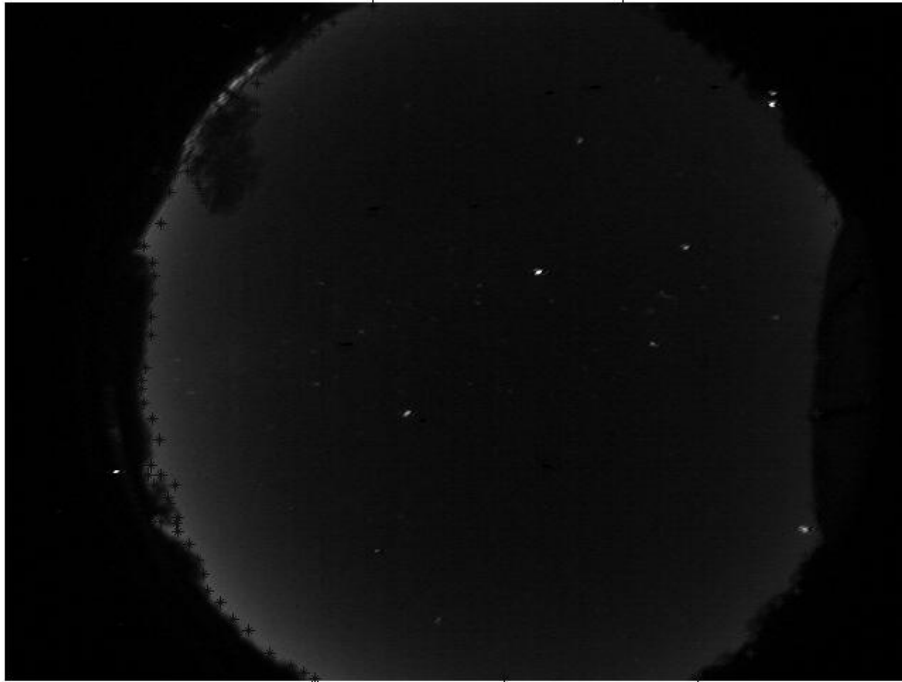


Figura 77: Puntos elegidos para evaluar el ángulo cenital mínimo, máximo y promedio de la imagen.

La Figura 78 muestra las coordenadas horizontales de estos puntos elegidos:

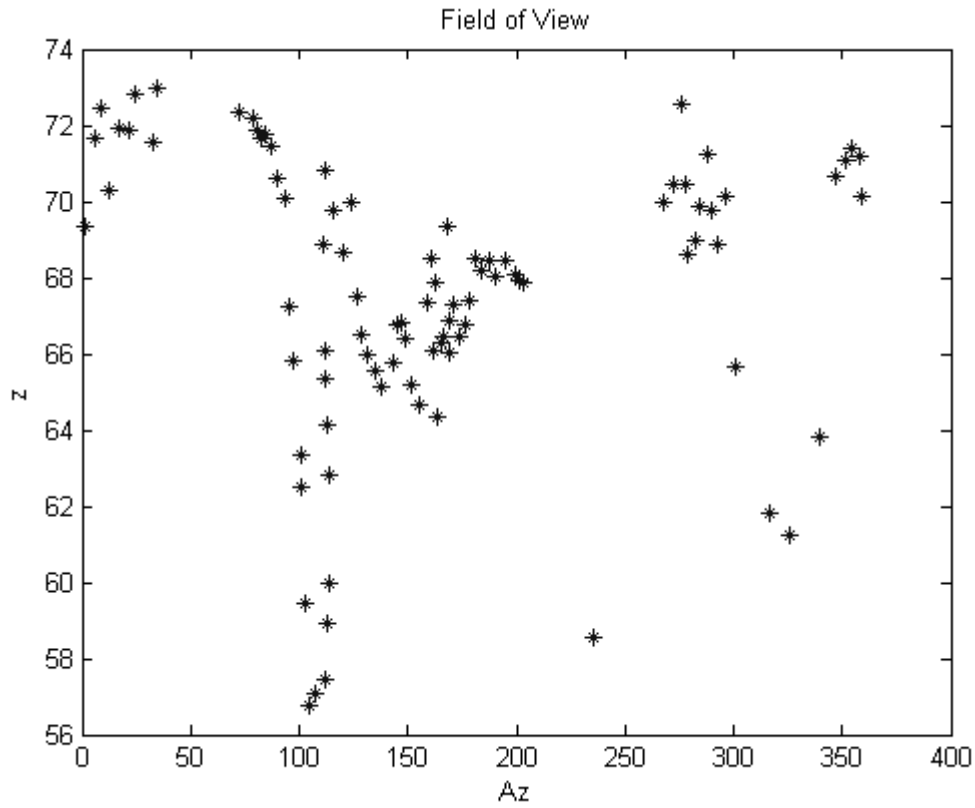


Figura 78: Coordenadas horizontales de los puntos elegidos en la **Figura 77**.

Los ángulos cenitales mínimo, máximo y promedio son 56.8° , 73.0° y 67.5° , respectivamente.

Las figuras Figura 79-Figura 80 muestran el acimut y ángulo cenital de las estrellas de catálogo, y las coordenadas horizontales de las estrellas detectadas correspondientes, calculadas a partir de las ecuaciones Ecuación 6-11 a Ecuación 6-14 con los parámetros obtenidos con el ajuste.

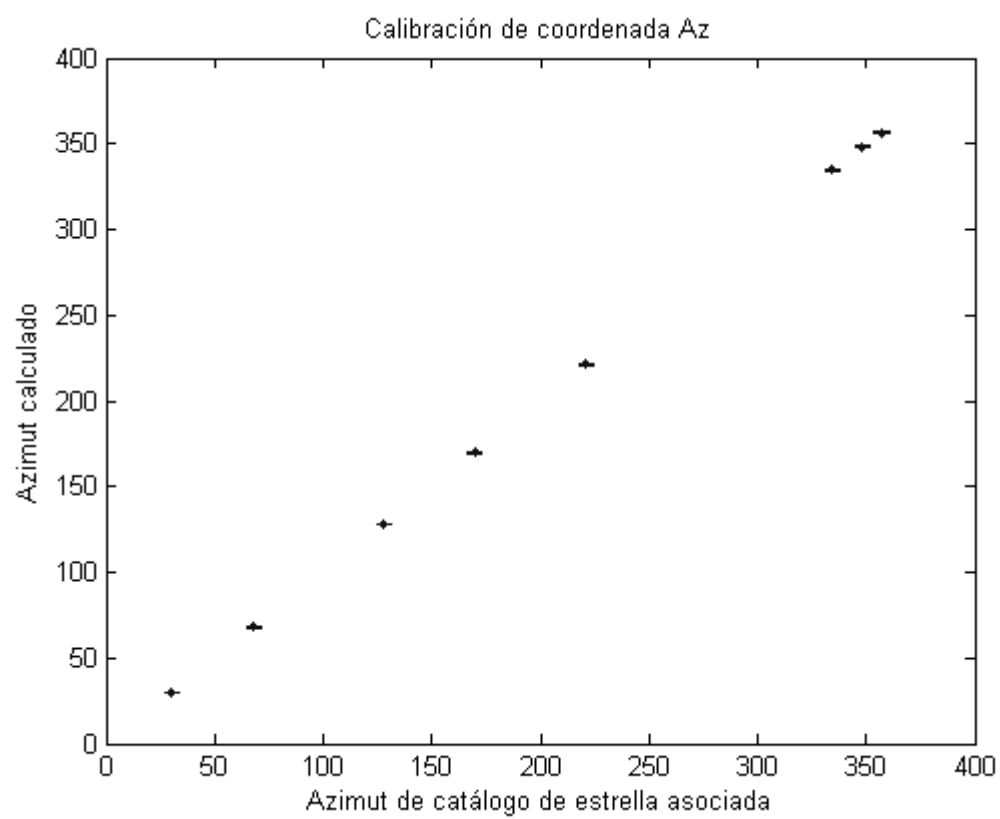


Figura 79: Resultado de calibración astrométrica, para acimut (Az).

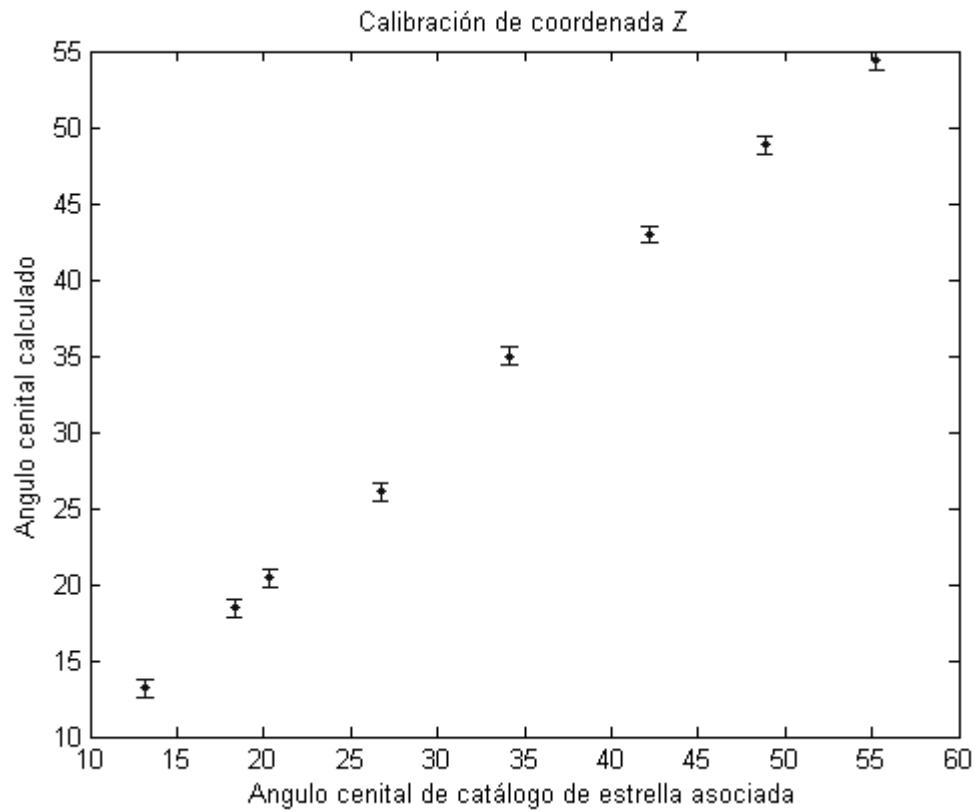


Figura 80: Resultado de calibración astrométrica, para ángulo cenital (z).

El error RMS definido en la **Ecuación 6-16** es en este caso $35.7'$, es decir, unas dos veces el coeficiente de relación lineal $V = 16.1'/\text{pix}$, o $\sim \pm 2$ pixeles.

9.3.3 Resultados del 23/06/2012

La **Figura 81** muestra la imagen integrada obtenida a partir de un video de 123 segundos de duración (1242 frames), el cual se integró 79 segundos (800 frames):

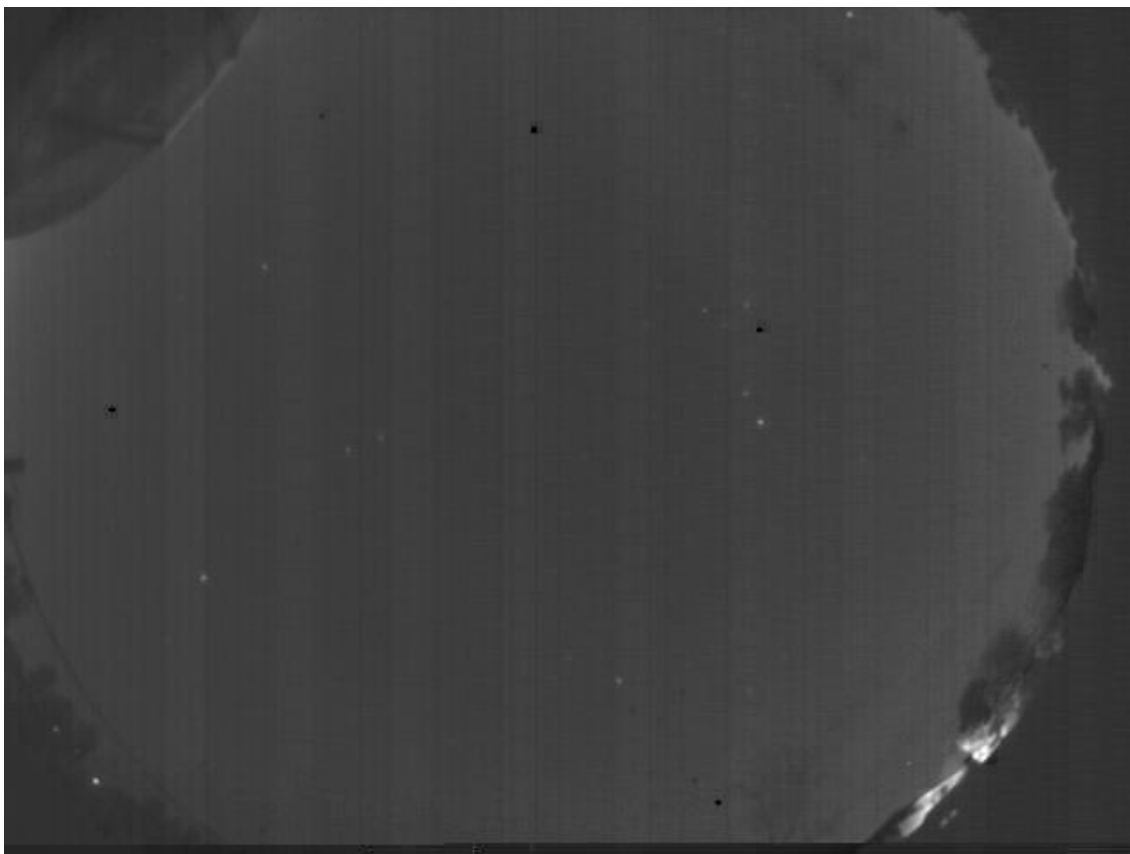


Figura 81: Imagen integrada de 79 segundos, el 23/06/2012 a la hora 19:48:24.

La **Figura 82** muestra las estrellas de catálogo (en rojo) y las estrellas detectadas (en azul):

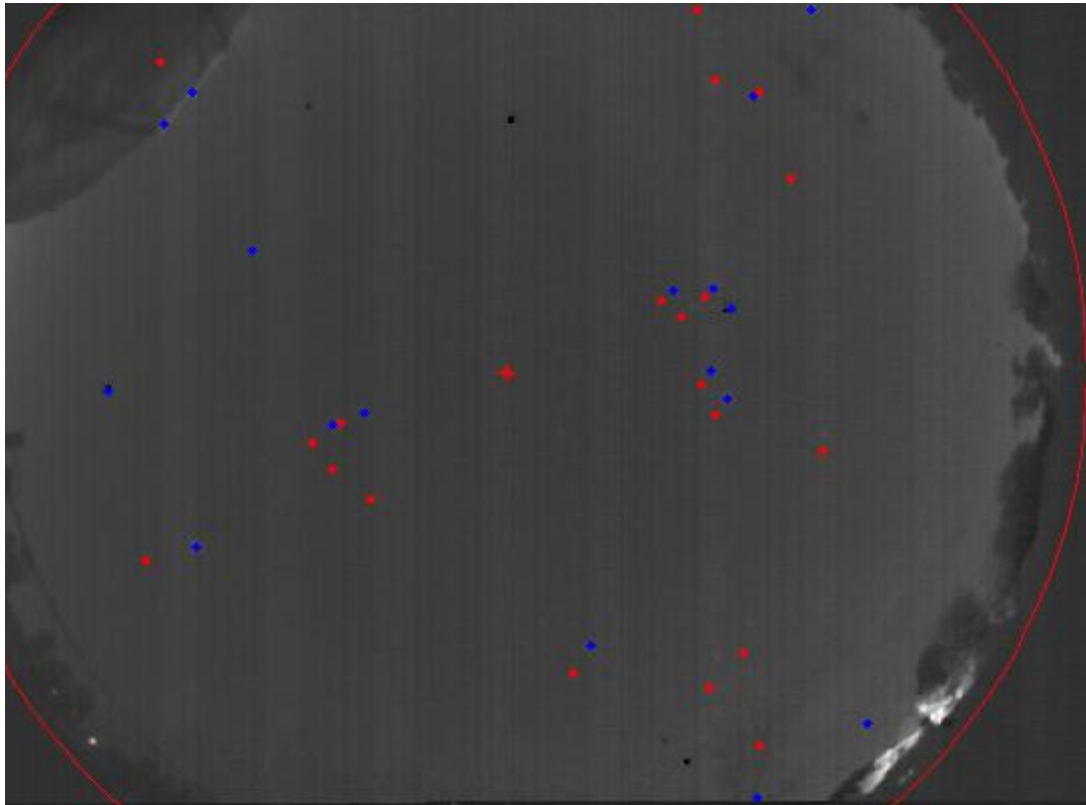


Figura 82: Estrellas detectadas (puntos azules) y estrellas de catálogo (puntos rojos).

La **Figura 83** muestra una terna de estrellas de catálogo (magenta) y una terna de estrellas detectadas (cian), asociados uno a uno:

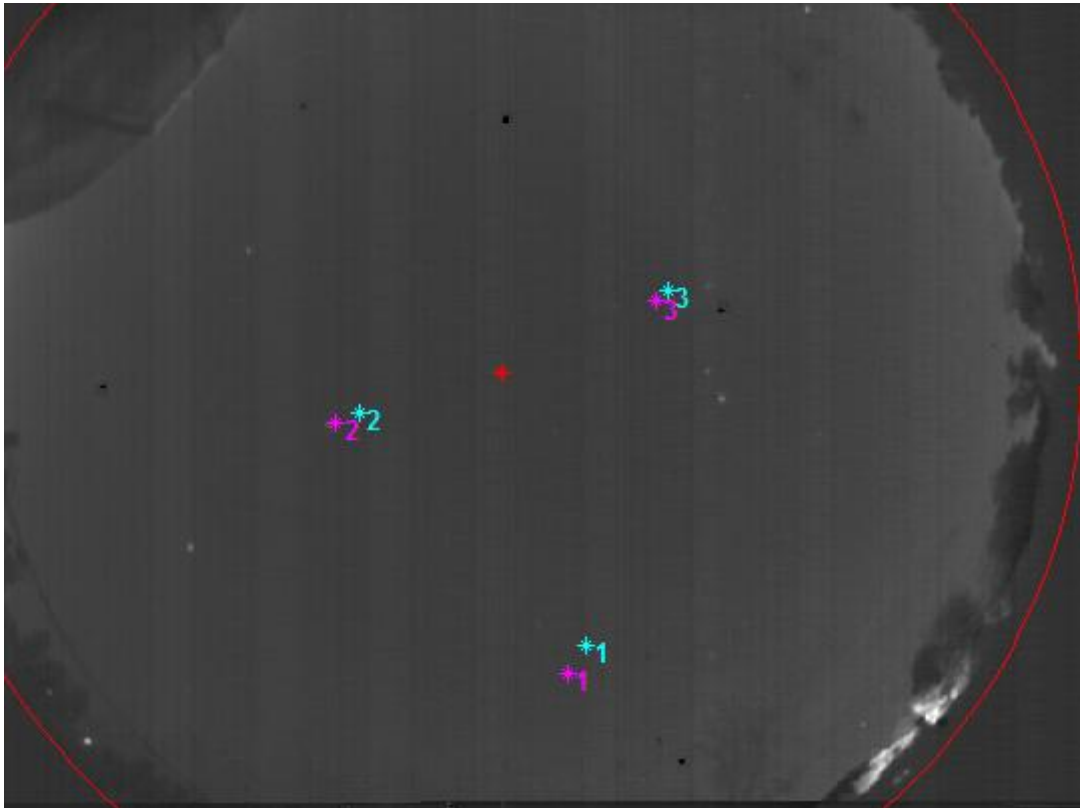


Figura 83: Vértices de dos triángulos asociados. Los puntos magenta son estrellas de catálogo, mientras que los cian son estrellas detectadas.

El ajuste arroja los valores indicados en la Tabla 9 para los parámetros de las ecuaciones Ecuación 6-11 a Ecuación 6-14:

Parámetro	Valor
a0	78.4°
x0	-0.61 pixeles
y0	7.1 pixeles
C	1.0
A	-3.23e-2
F	0.0°
V	15.1 arcmin/pixel
ε	0.0°
E	0.0°
S	0.0 arcsec/pixel ²
P	0.0 arcsec/pixel ³

Tabla 9: Valores de parámetros obtenidos en calibración astrométrica (23/06/2012).

En cuanto a la determinación del FOV real, seguimos el mismo método que en el apartado anterior.

Los puntos elegidos se muestran en la **Figura 84**:

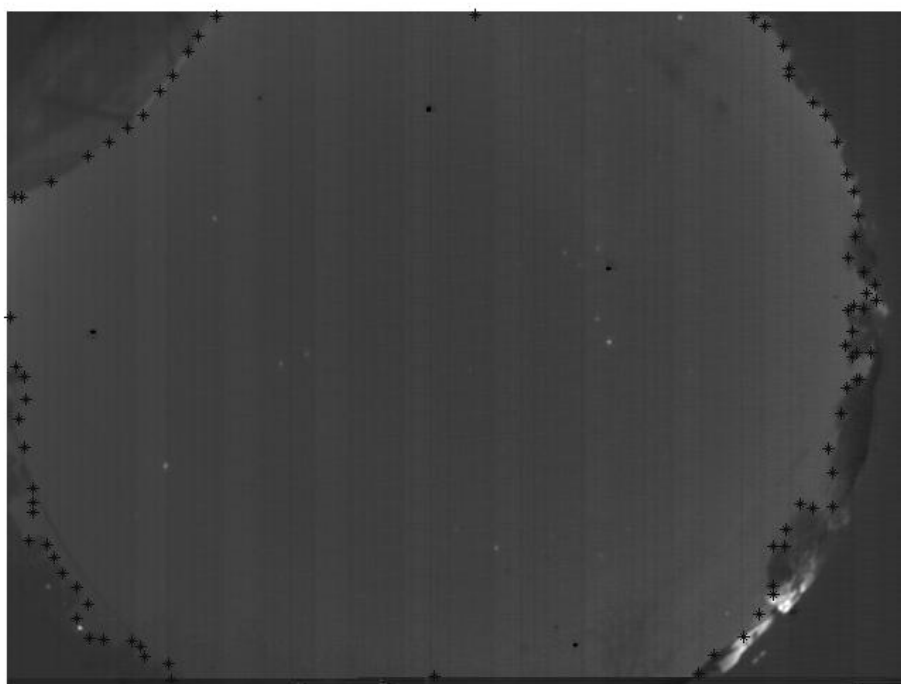


Figura 84: Puntos elegidos para evaluar el ángulo cenital mínimo, máximo y promedio de la imagen.

La gráfica la Figura 85 muestra las coordenadas horizontales de estos puntos:

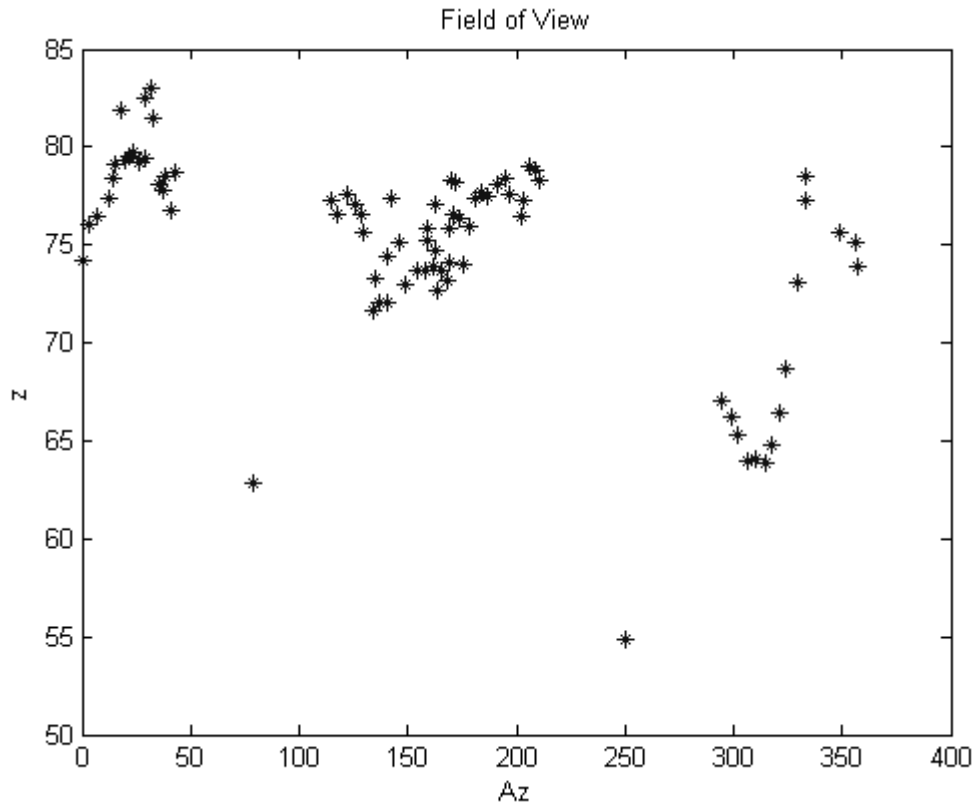


Figura 85: Coordenadas horizontales de los puntos elegidos en la **Figura 84**.

Los ángulos cenitales mínimo, máximo y promedio son 54.9° , 83.0° y 75.0° , respectivamente.

Las figuras Figura 86-Figura 87 muestran el acimut y ángulo cenital de las estrellas de catálogo, y las coordenadas horizontales de las estrellas detectadas correspondientes.

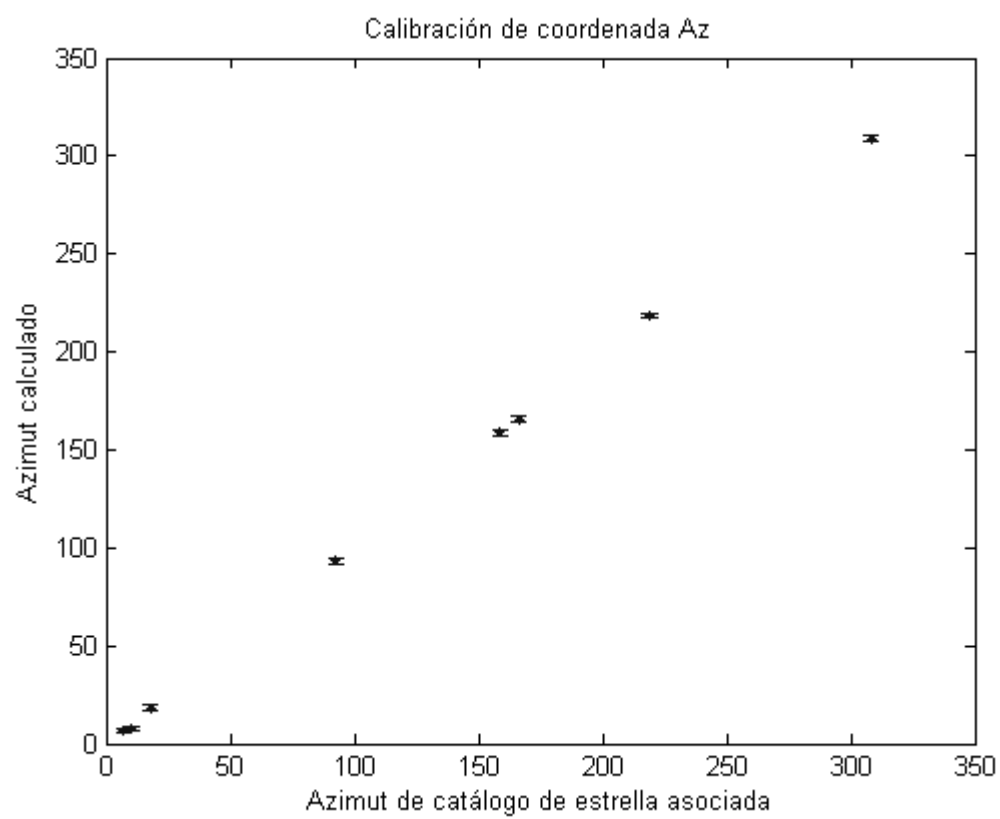


Figura 86: Resultado de calibración astrométrica, para acimut (Az).

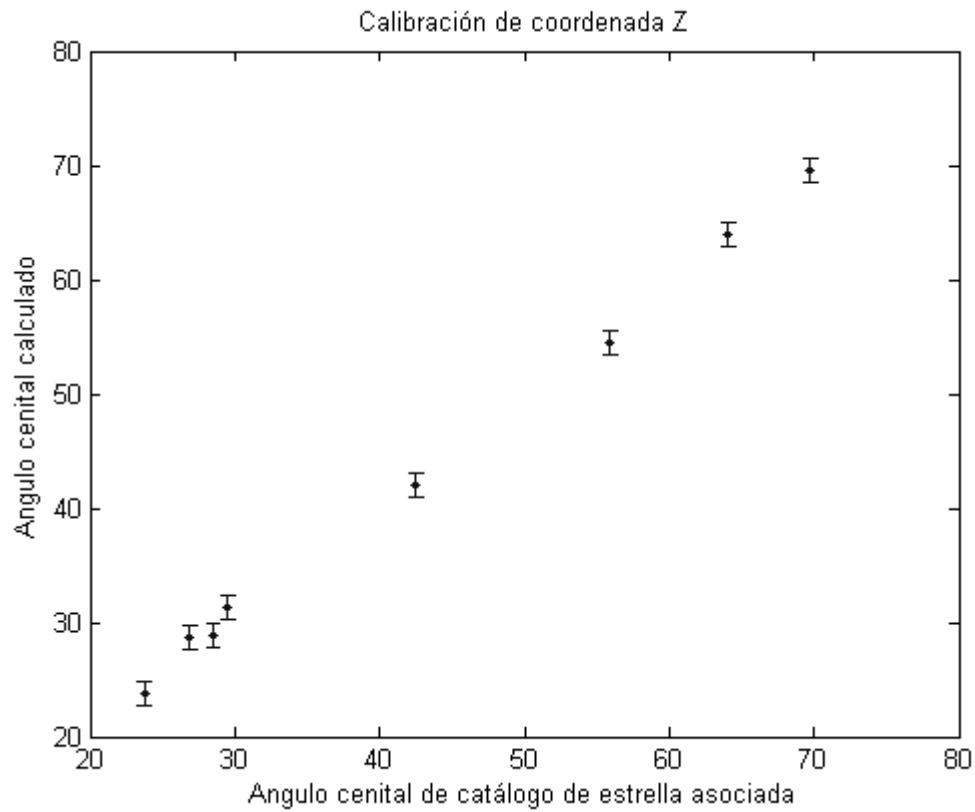


Figura 87: Resultado de calibración astrométrica, para ángulo cenital (z).

El error RMS definido en la **Ecuación 6-16** es en este caso $73.7'$, es decir, casi 5 veces el coeficiente de relación lineal $V = 15.1'/\text{pix}$, o $\sim \pm 5$ pixeles.

9.3.4 Resultados del 16/07/2012

La **Figura 88** muestra la imagen integrada obtenida a partir de un video de 60 segundos de duración (1783 frames), el cual se integró un minuto:

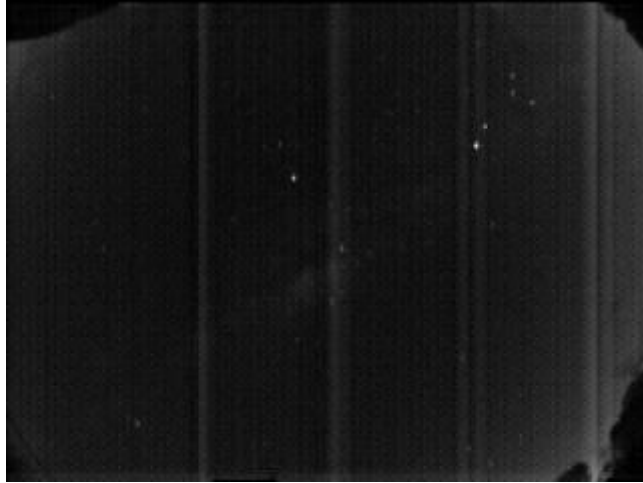


Figura 88: Imagen integrada de 1 minuto, el 16/07/2012 a la hora 22:10:50.

La **Figura 89** muestra las estrellas de catálogo (en rojo) y las estrellas detectadas (en azul):

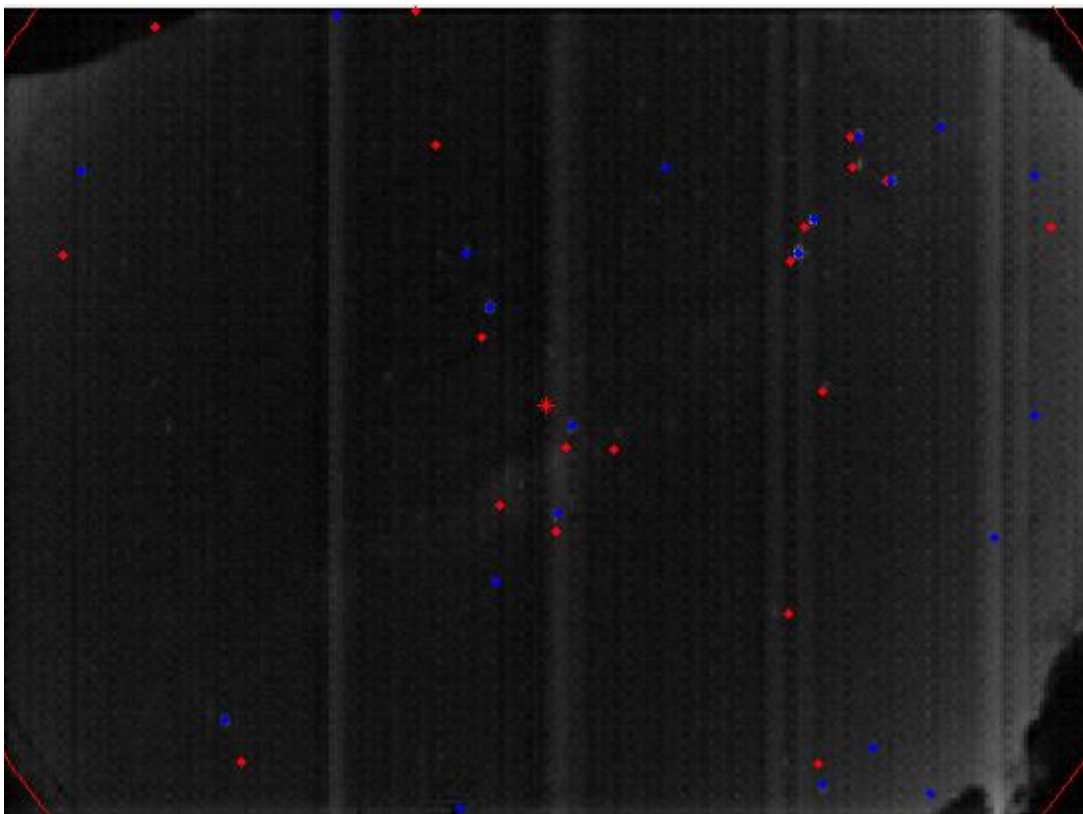


Figura 89: Estrellas detectadas (puntos azules) y estrellas de catálogo (puntos rojos).

La **Figura 90** muestra una terna de estrellas de catálogo (magenta) y una terna de estrellas detectadas (cian), asociados uno a uno:

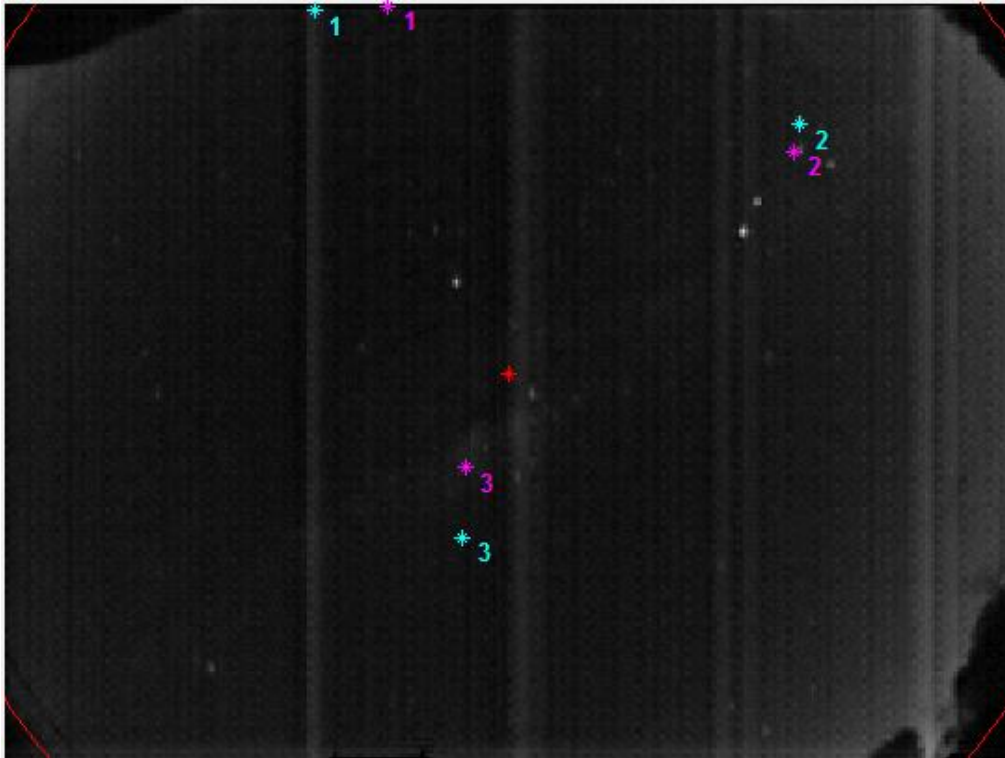


Figura 90: Vértices de dos triángulos asociados. Los puntos magenta son estrellas de catálogo, mientras que los cian son estrellas detectadas.

El ajuste arroja los valores indicados en la Tabla 10 para los parámetros de las ecuaciones Ecuación 6-11 a Ecuación 6-14:

Parámetro	Valor
a0	93.1°
x0	-10.5 pixeles
y0	3.23 pixeles
C	1.0
A	-3.58e-2
F	-0.018748°
V	24.1 arcmin/pixel
ε	-4.46 arcmin
E	4.13e-7 arcmin
S	0.787 arcsec/pixel ²
P	1.96 arcsec/pixel ³

Tabla 10: Valores de parámetros obtenidos en calibración astrométrica (16/07/2012).

En cuanto a la determinación del FOV real, seguimos el mismo método que en los apartados anteriores.

Los puntos elegidos se muestran en la **Figura 91**:

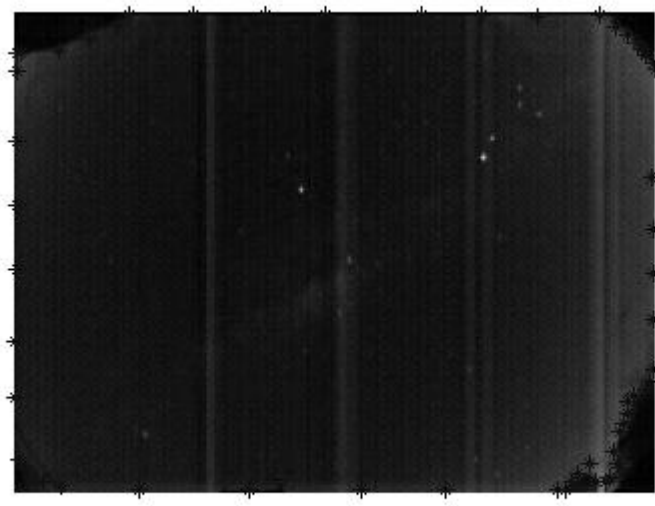


Figura 91: Puntos elegidos para evaluar el ángulo cenital mínimo, máximo y promedio de la imagen.

La gráfica de la Figura 92 muestra las coordenadas horizontales de estos puntos:

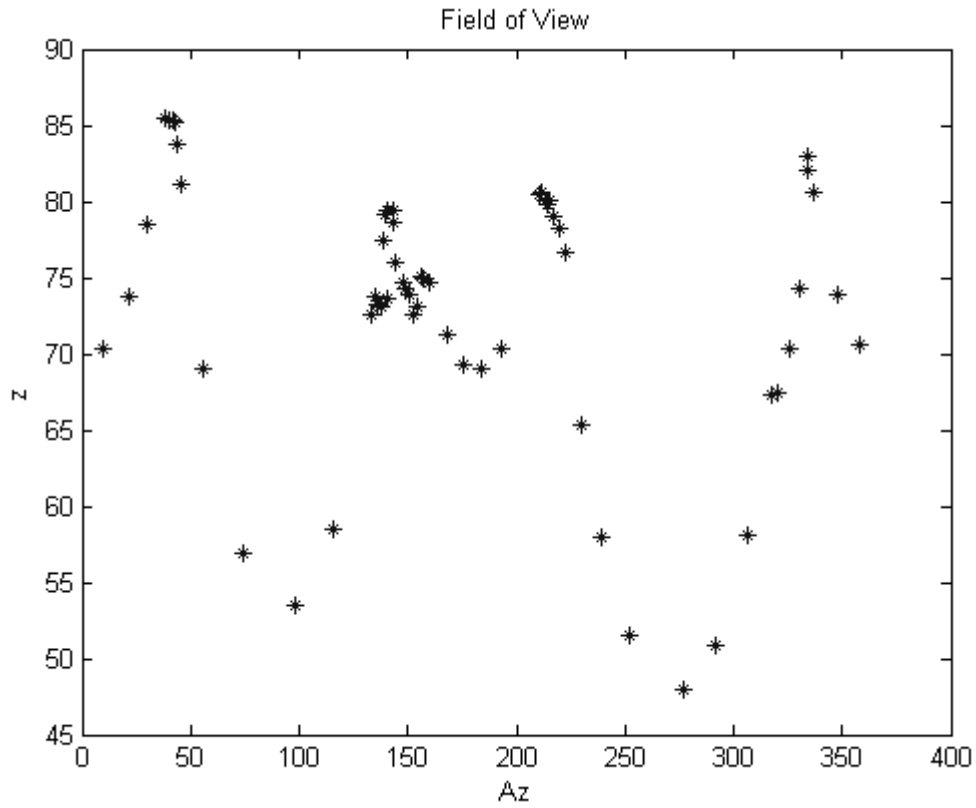


Figura 92: Coordenadas horizontales de los puntos elegidos en la **Figura 91**.

Los ángulos cenitales mínimo, máximo y promedio son 47.9° , 85.4° y 73.1° , respectivamente.

Las figuras Figura 93-Figura 94 muestran el acimut y ángulo cenital de las estrellas de catálogo, y las coordenadas horizontales de las estrellas detectadas correspondientes.

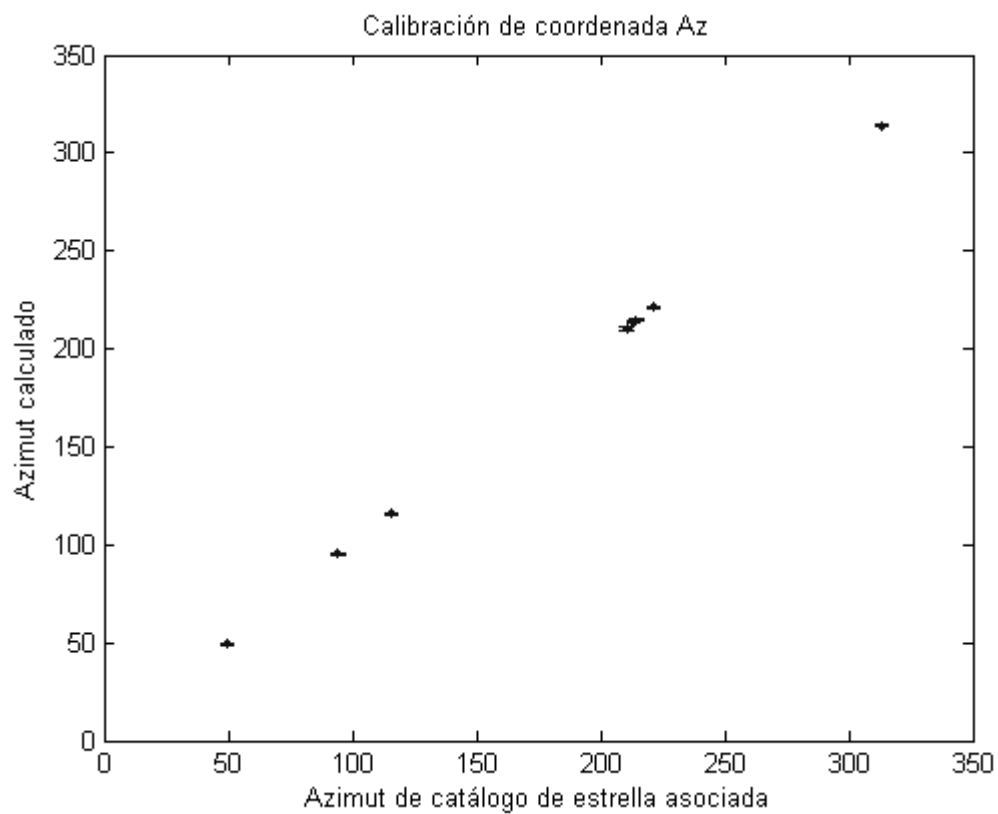


Figura 93: Resultado de calibración astrométrica, para acimut (Az).

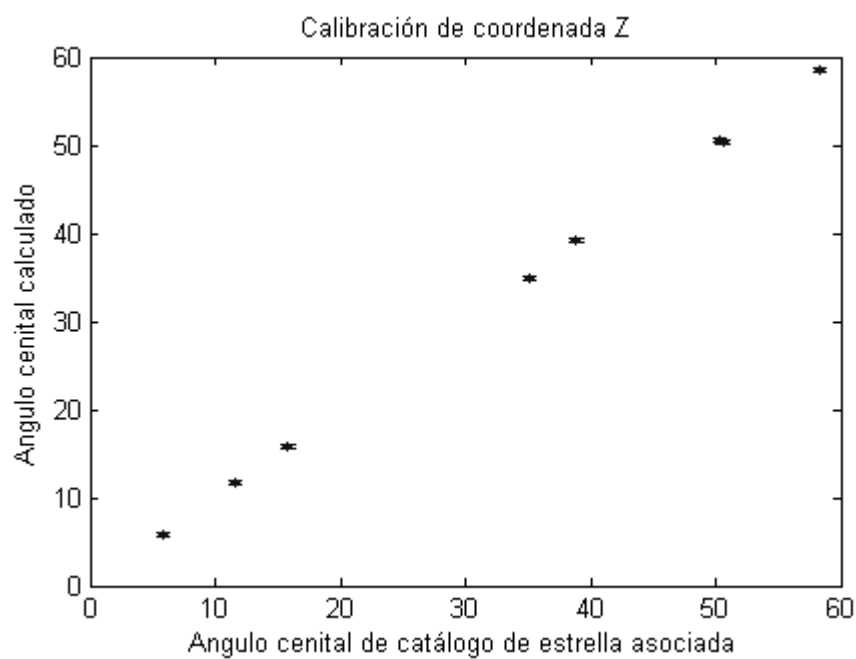


Figura 94: Resultado de calibración astrométrica, para ángulo cenital (z).

El error RMS definido en la Ecuación 6-16 es en este caso 16.0', es decir, menos que el coeficiente de relación lineal $V = 24.1'/\text{pix}$, o $\sim \pm 1$ píxeles.

9.3.5 Discusión

La Tabla 11 resume los principales resultados de los tres casos expuestos en los apartados anteriores:

Fecha	Cámara	Tamaño de imagen	z promedio horizonte (°)	Error RMS de ajuste (Ec. 7.16) (arcmin.)	Coeficiente V (arcmin./pix)	Número de frames de integración
18/01/2012	KT&C	640x480	67.5	35.7	16.1	484
23/06/2012	Watec	640x480	75.0	73.7	15.1	800
16/07/2012	Watec	320x240	73.1	16.0	24.1	1783

Tabla 11: Síntesis de resultados de calibraciones fotométricas.

En primer lugar, es de destacar que por encima del tipo de cámara y su configuración, resultan determinantes para la calidad del ajuste astrométrico las condiciones de cielo. Ello es particularmente notorio en el caso del ajuste del día 23/6, ya que se obtiene en esta fecha un error significativamente mayor que el 16/7, no habiendo una diferencia sustantiva entre las configuraciones de la cámara en cada caso (la diferencia en FOV medio entre un caso y el otro es de apenas 4°), más allá del tamaño de la imagen cuyo efecto se ve en el coeficiente V obtenido, que es indicativo de una resolución media de la imagen.

Si se observan los valores de los parámetros del ajuste obtenidos las fechas 18/1 y 23/6 (tablas **Tabla 8** y **Tabla 9**) vemos que varios de estos parámetros mantienen su valor inicial (0) a la salida del ajuste, lo cual es un indicativo indirecto también de la calidad del mismo. Solamente el ajuste del día 16/7 logra asignar valores distintos a los iniciales para todos los parámetros, como muestra la **Tabla 10**.

También es preciso puntualizar que los criterios que determinan la salida de la iteración en el ajuste son poco flexibles o adaptables a cada caso, ya que se utiliza siempre el criterio de al menos ocho puntos o un umbral de error. En los tres casos, el criterio que se cumplió para la salida de la iteración fue el primero, es decir, el haber llegado a ocho puntos. Se comprobó además que los puntos descartados no eran asociaciones espurias sino puntos que no permitían arribar a una solución convergente o conducían a un ajuste con un error inadmisiblemente alto.

Por ello, uno de los posibles desarrollos futuros del algoritmo de calibración astrométrica, es implementar alguna solución existente para una evaluación más “inteligente” y adaptable a cada caso, en función por ejemplo de la evolución del error en cada paso de la iteración.

9.4 Fotometría

9.4.1 Introducción

En este apartado se presentan los resultados de las calibraciones fotométricas aplicadas a los mismos videos que se utilizaron en la calibración astrométrica.

El proceso de calibración fotométrica, tal como se describió en el apartado 7, utiliza los pares de estrellas de catálogo y detectadas asociados en la calibración astrométrica, por lo que es preciso realizar esta calibración previo a la fotométrica.

El objetivo de esta calibración es la obtención de los parámetros que nos permiten pasar de flujo integrado en un frame a magnitud visual aparente. Como se describe en el apartado 7, el primer paso del algoritmo de calibración fotométrica es la obtención de una imagen del cielo de fondo, mediante la aplicación de un filtro estadístico de segundo orden dos veces consecutivas, a una imagen de video integrado. Posteriormente se resta el cielo de fondo a la imagen integrada, y se calculan los flujos de las estrellas detectadas en el proceso de calibración astrométrica (y a las cuales pudo establecerse una asociación con su correspondiente estrella de catálogo, durante el mismo proceso).

Finalmente se realiza un ajuste del flujo integrado a las magnitudes visuales de catálogo, obteniéndose los parámetros C y k de la **Ecuación 7-1**.

9.4.2 Resultados del 18/01/2012

La **Figura 95** muestra una imagen del cielo de fondo, obtenida mediante la aplicación – dos veces consecutivas- del filtro mencionado anteriormente a la **Figura 74**:

Imagen de cielo de fondo

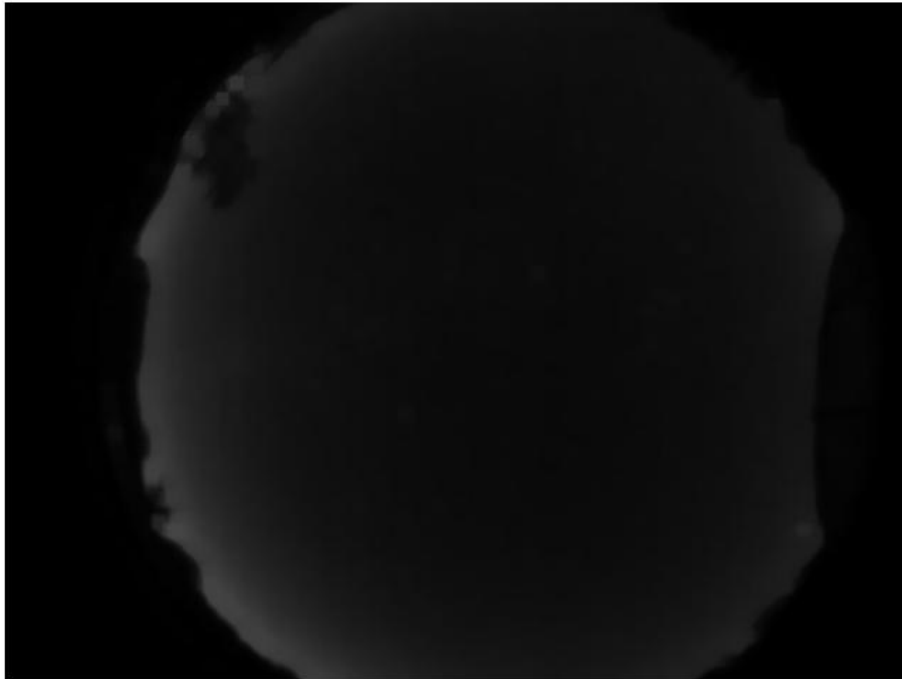


Figura 95: Imagen del cielo de fondo, obtenida mediante filtrado estadístico de la **Figura 74**.

La **Figura 96** muestra la imagen resultante de la resta de la **Figura 74** menos el cielo de fondo de la **Figura 95**:

Imagen integrada menos cielo de fondo

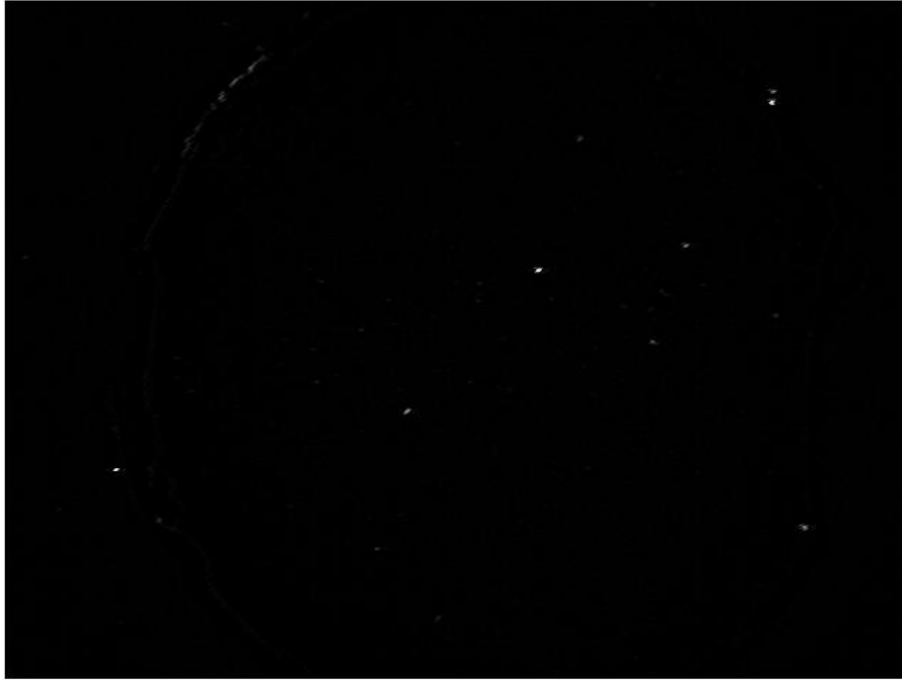


Figura 96: Imagen resultante de la resta de la **Figura 74** menos el cielo de fondo.

La **Figura 96**, como puede verse claramente, contiene esencialmente estrellas.

El resultado del ajuste puede apreciarse en la gráfica de la Figura 97, donde, en el eje de las abscisas, tenemos la magnitud visual de catálogo, y en el de las ordenadas la magnitud calculada a partir de la **Ecuación 7-1** y los parámetros obtenidos en el ajuste:

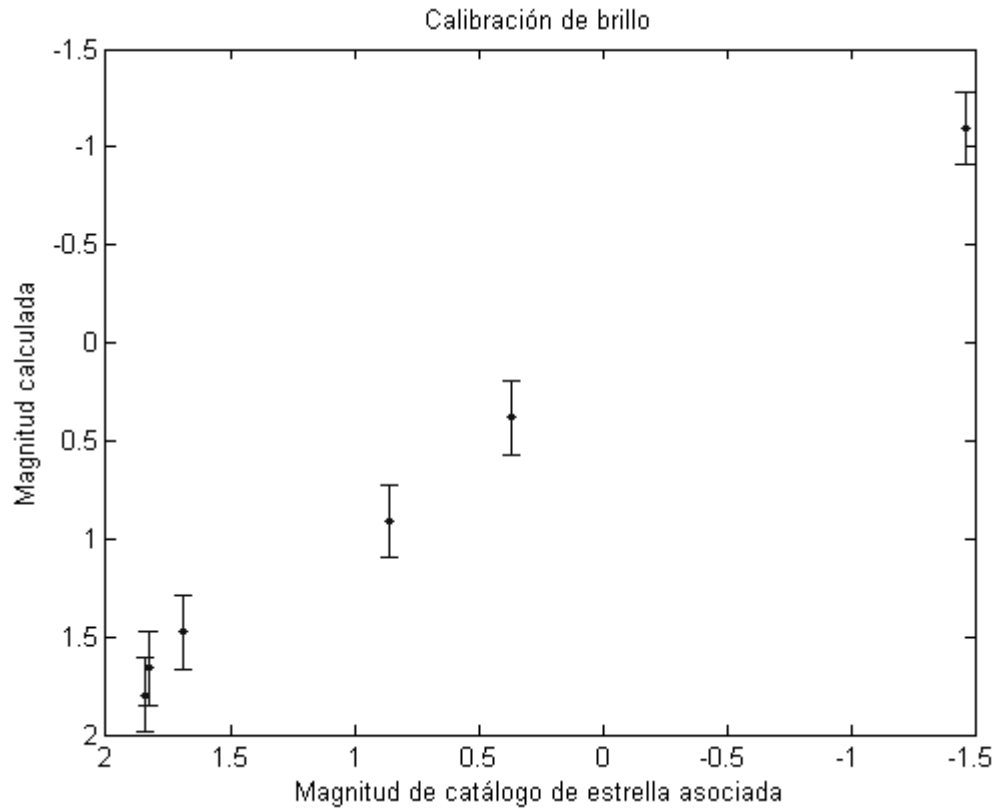


Figura 97: Magnitud visual de estrellas de catálogo vs. magnitud calculada (mediante la **Ecuación 7-1**) de la estrella detectada correspondiente (18/01/2012).

En la ecuación 8.1, la magnitud aparente se calcula en función del flujo integrado y del ángulo cenital z , el cual está contenido en la masa de aire x , para cuyo cálculo se utiliza la expresión de la **Ecuación 7-2**.

Por esta razón, es posible graficar familias de curvas de flujo integrado versus magnitud aparente, para distintos valores de z . Los resultados se muestran en la Figura 98:

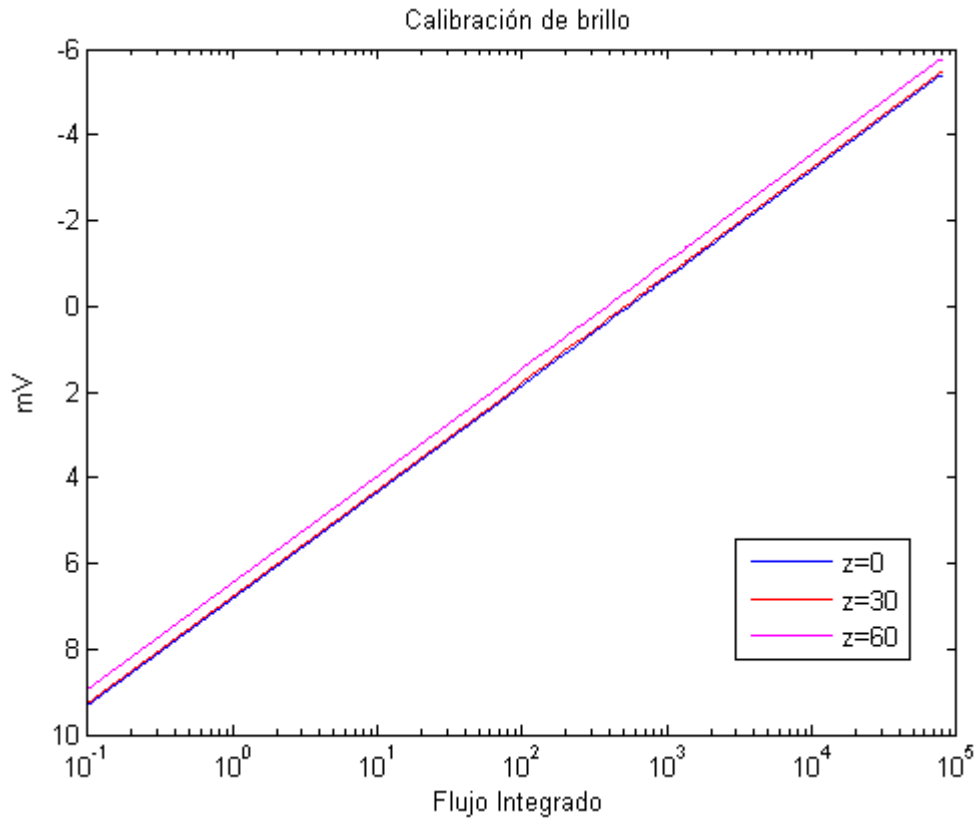


Figura 98: Familias de curvas de flujo integrado vs. magnitud aparente, obtenidas mediante la calibración fotométrica, para distintos ángulos cenitales z (18/01/2012).

Los resultados del ajuste arrojan los valores de $k \approx 0.382$ y $C \approx 7.22$, mientras que el error RMS del ajuste es de ± 0.188 .

9.4.3 Resultados 23/06/2012

En este caso y el siguiente se omiten las imágenes de cielo de fondo e integradas menos cielo de fondo, por considerarse que no brindan mayor información que la otorgada en el caso anterior.

El resultado del ajuste se muestra en la Figura 99:

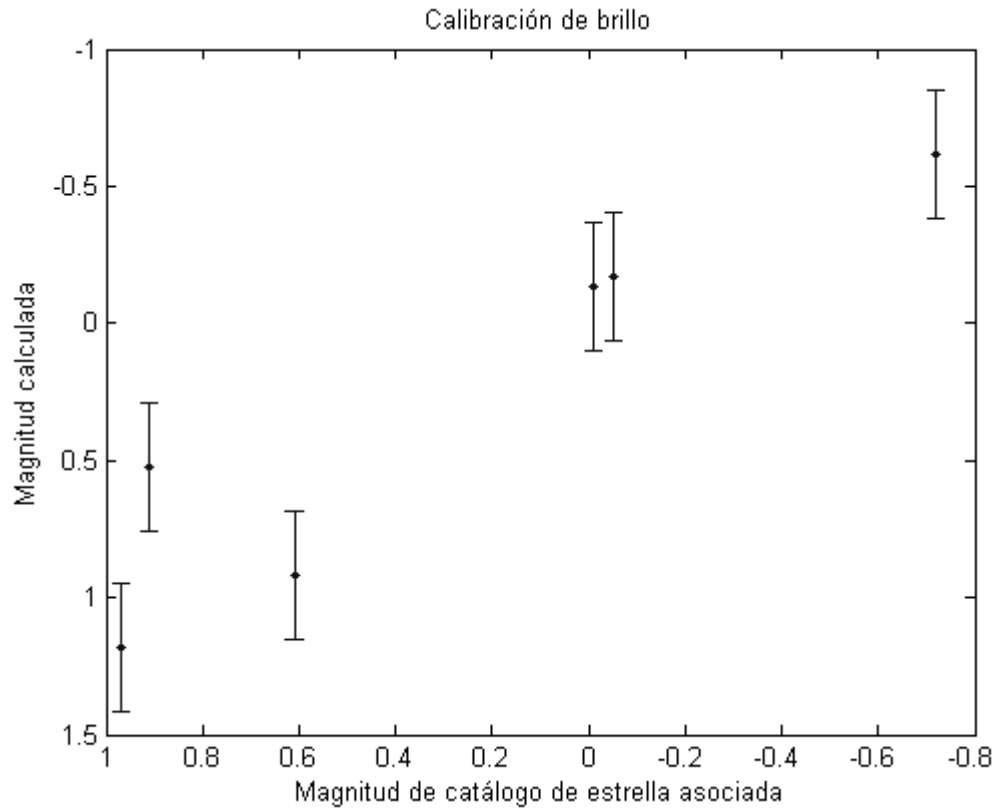


Figura 99: Magnitud visual de estrellas de catálogo vs. magnitud calculada (mediante la **Ecuación 7-1**) de la estrella detectada correspondiente (23/06/2012).

Las familias de curvas de flujo integrado versus magnitud aparente, para distintos valores de z , se muestran en la Figura 100:

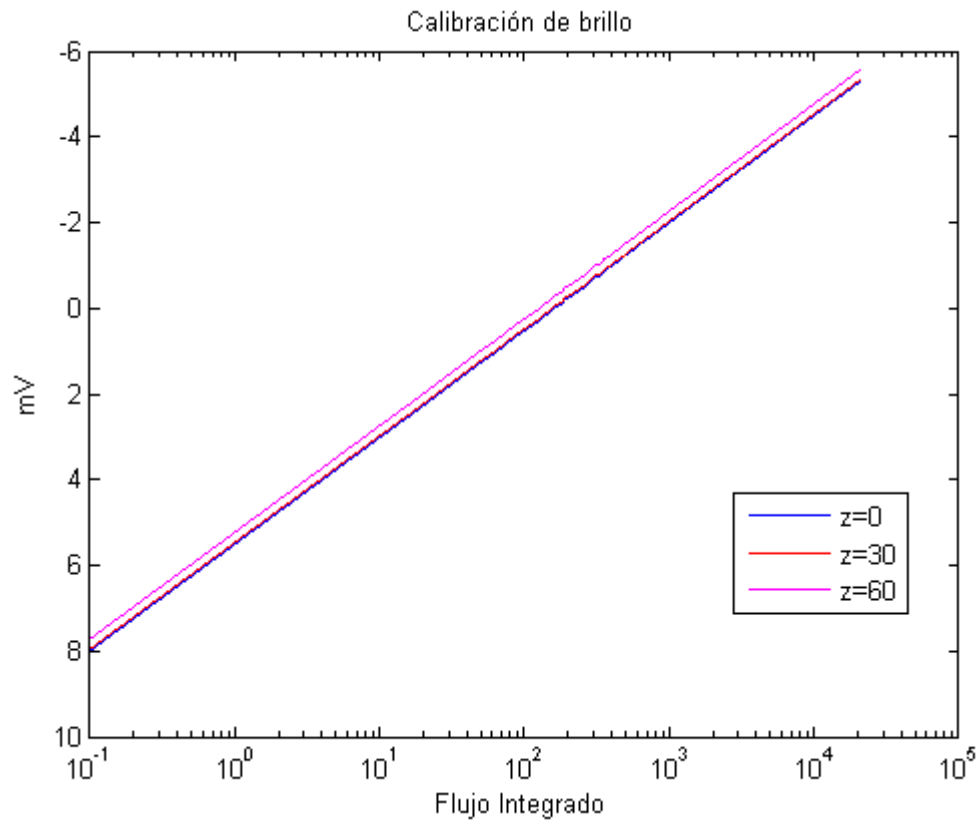


Figura 100: Familias de curvas de flujo integrado vs. magnitud aparente, obtenidas mediante la calibración fotométrica, para distintos ángulos cenitales z (23/06/2012).

Los resultados del ajuste arrojan los valores de $k \approx 0.280$ y $C \approx 5.80$, mientras que el error RMS del ajuste es de ± 0.234 .

9.4.4 Resultados 16/07/2012

Finalmente, el resultado del ajuste para esta fecha se muestra en la Figura 101:

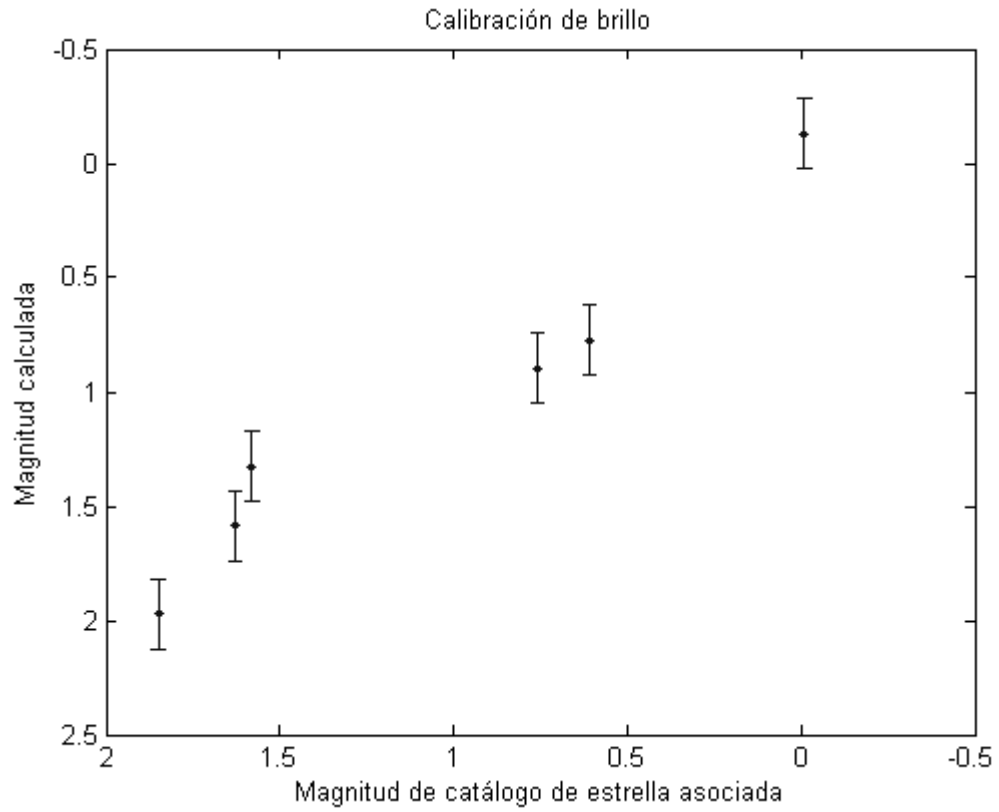


Figura 101: Magnitud visual de estrellas de catálogo vs. magnitud calculada (mediante la **Ecuación 7-1**) de la estrella detectada correspondiente (16/07/2012).

Las familias de curvas de flujo integrado versus magnitud aparente, para distintos valores de z , se muestran en la Figura 102:

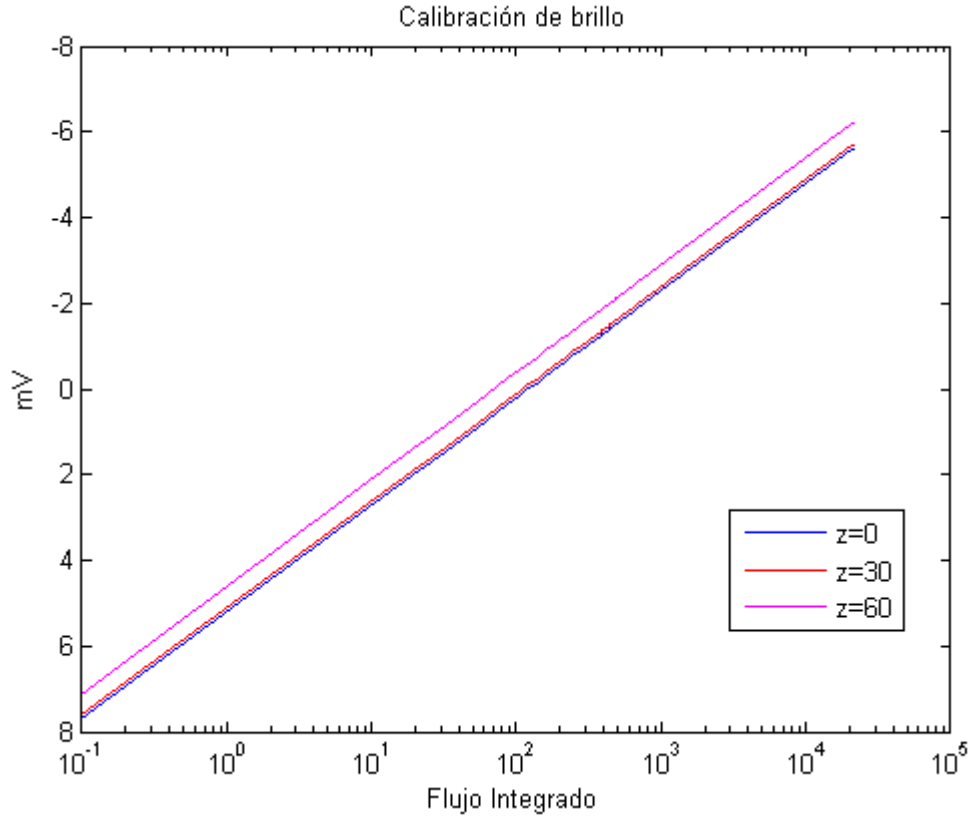


Figura 102: Familias de curvas de flujo integrado vs. magnitud aparente, obtenidas mediante la calibración fotométrica, para distintos ángulos cenitales z (16/07/2012).

Los resultados del ajuste arrojan los valores de $k=0.602$ y $C=5.81$, mientras que el error RMS del ajuste es de ± 0.153 .

9.4.5 Discusión

Los resultados de las calibraciones fotométricas de los tres casos tratados se resumen en la Tabla 12:

Fecha	k	C	Error RMS de ajuste [mag]
18/01/2012	0.382	7.22	0.188
23/06/2012	0.280	5.80	0.234
16/07/2012	0.602	5.81	0.153

Tabla 12: Síntesis de resultados de calibración fotométrica.

Los resultados sintetizados en la Tabla 12 no indican una diferencia sustantiva entre los tres casos, en lo que refiere al error RMS del ajuste.

De todas formas, el aspecto más relevante resulta de comparar la Figura 98 con la Figura 100, donde puede apreciarse que para un mismo flujo, la magnitud de la KT&C es aproximadamente 1 mag mayor que la Watec, lo cual indica una mayor sensibilidad de la primera. Sin embargo, esto se debe a que en el primer caso (KT&C, 18/01/2012), y como lo muestra la Tabla 11, el ángulo cenital medio del horizonte (indicativo de un “FOV medio”) es de 67.5° (FOV $\sim 135^\circ$), mientras que en el caso de la Watec el 23/06/2012, el ángulo cenital medio del horizonte es de $\sim 75^\circ$ (FOV $\sim 150^\circ$). Es decir, con la cámara Watec perdemos ~ 1 mag de sensibilidad con un FOV $\sim 15^\circ$ mayor que la cámara KT&C.

En lo que respecta al último caso, ya que se trata de la configuración actual⁴ del sistema instalado en el OALM, conviene determinar la magnitud aparente correspondiente a un flujo integrado de 600, ya que es a partir de este flujo que el sistema es capaz de activar la detección de eventos sin que sean debido a ruido (ver apartado 5.1). El resultado es de -1.4 ± 0.08 mag, con lo cual tenemos una primera estimación de la magnitud límite de detección de meteoros. Este valor, a su vez, es consistente con el hecho que en tiempo real es posible observar la estrella Sirio, cuya magnitud es de -1.46.

Finalmente, lo señalado en torno a la poca flexibilidad y adaptabilidad de la iteración contenida en el algoritmo de calibración astrométrica, es igualmente válido para la calibración fotométrica, ya que se observa también aquí que todos los ajustes fueron realizados con 6 estrellas, lo cual es el límite de puntos fijado para salir de la iteración. Se sugiere pues evaluar como desarrollo a futuro una mejora del algoritmo de calibración fotométrica, similar al planteado para la calibración astrométrica.

⁴ Al 18/10/2012.

9.5 Procesamiento de bólido

En este apartado se presentan los resultados del procesamiento del bólido detectado el 2/11/2012.

La **Figura 103** muestra una secuencia de imágenes del bólido:

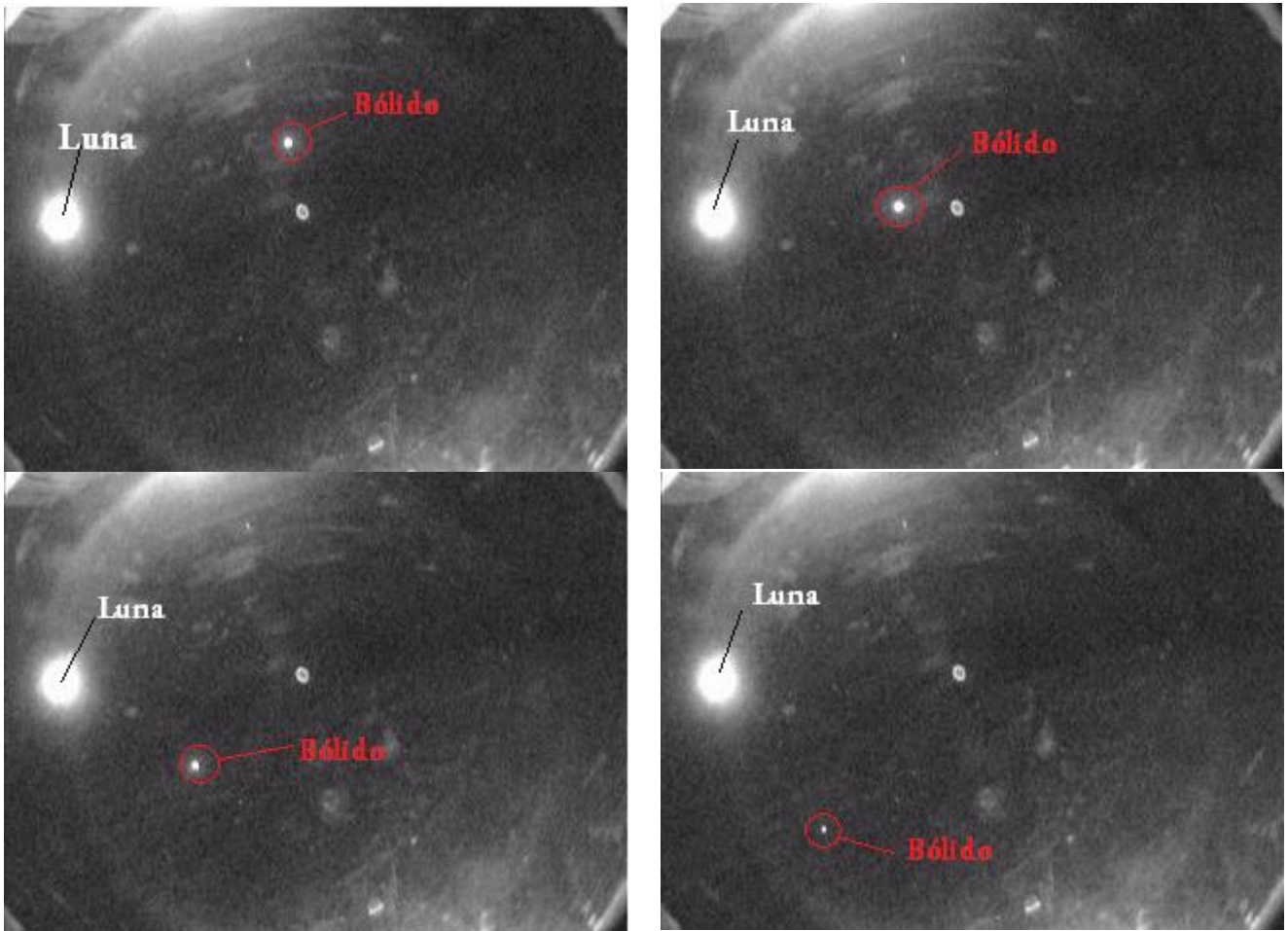


Figura 103: Secuencia de imágenes de bólido detectado (2/11/2012, 04:00:25): sup. izq.: frame 1 del video; sup. der.: frame 30; inf. izq.: frame 60; inf. der.: frame 90 (framerate 19 fps).

Las figuras Figura 104-Figura 106 muestran la evolución temporal de las coordenadas horizontales del centroide del bólido, y de su brillo:

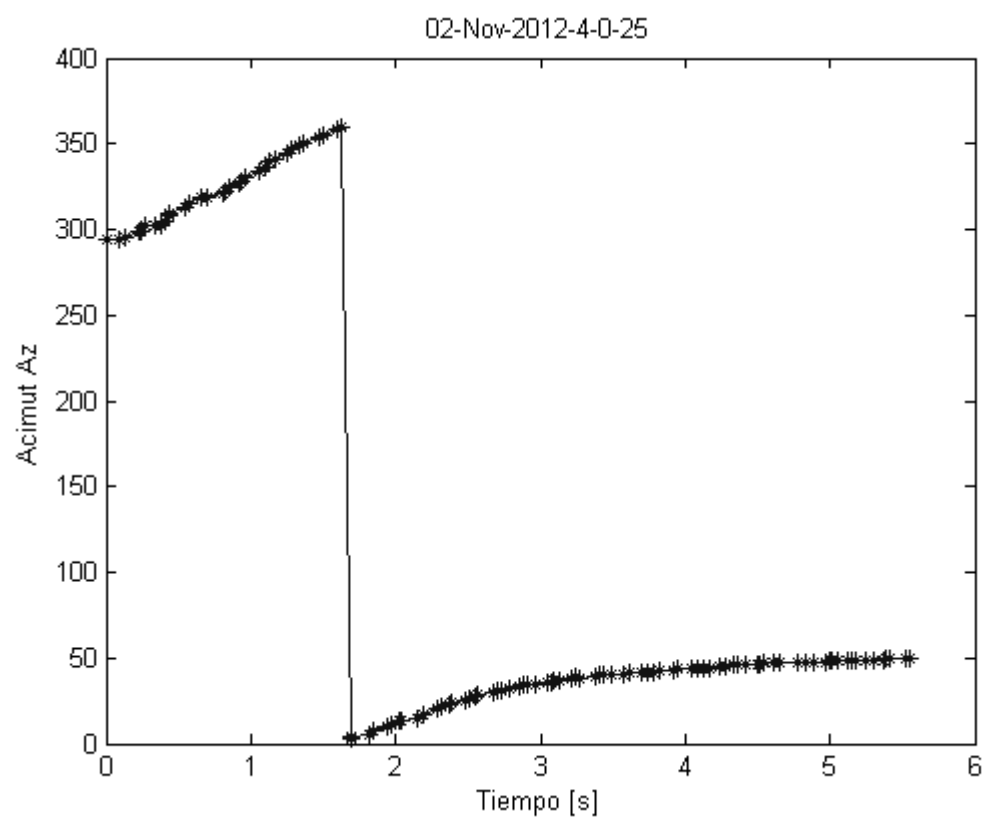


Figura 104: Evolución temporal del acimut del bólido detectado el 2/11/2012.

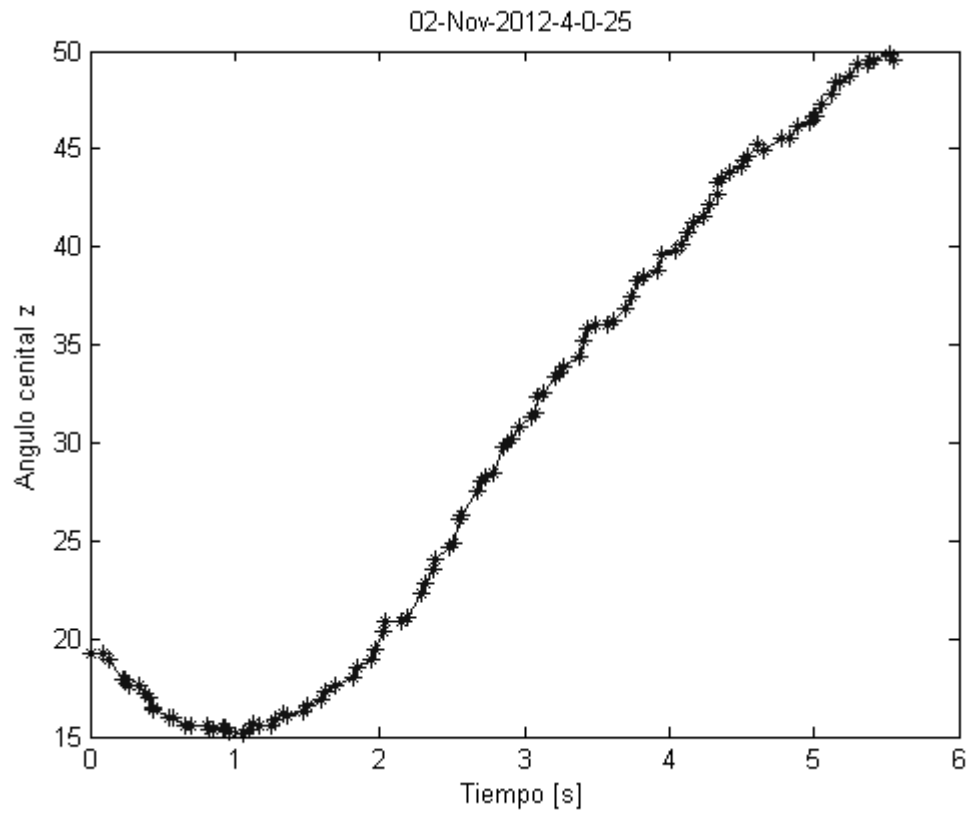


Figura 105: Evolución temporal del ángulo cenital del bólido detectado el 2/11/2012.

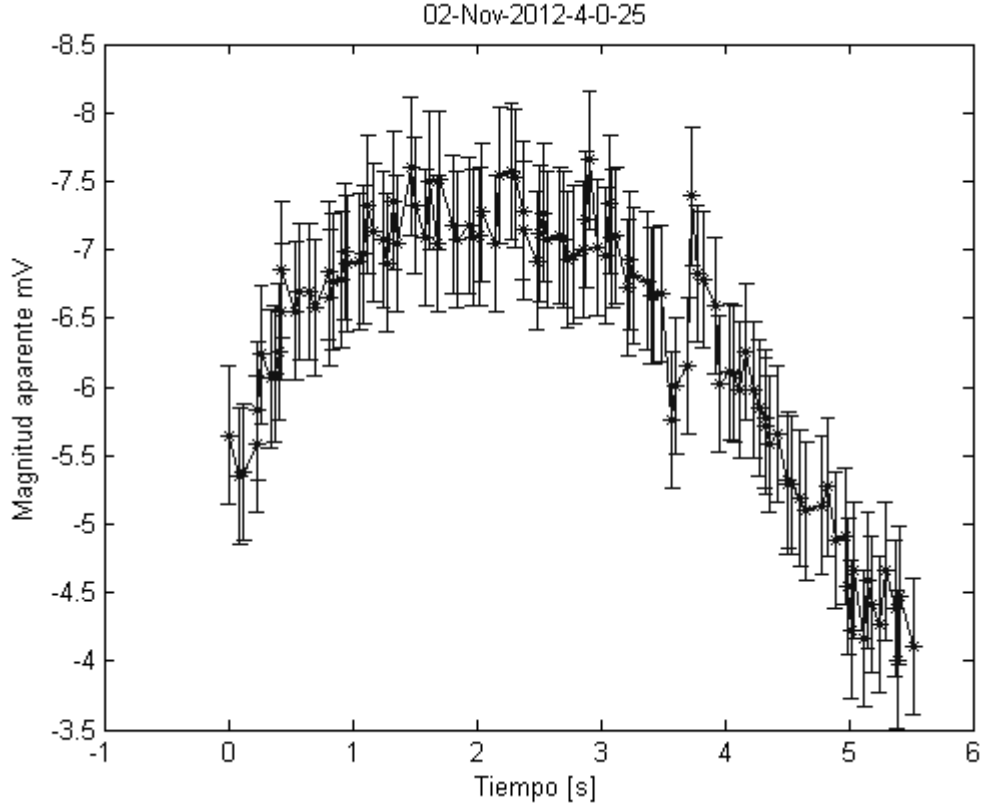


Figura 106: Curva fotométrica del bólido detectado el 2/11/2012.

9.5.1 Discusión

Las coordenadas horizontales del centroide del bólido fueron halladas en base a la calibración astrométrica del 16/7. Es de esperar que los parámetros que arroja esta calibración no cambien sustancialmente en el tiempo, y esto fue verificado comparando las coordenadas horizontales calculadas de la estrella Sirio (Alp-CMa) con sus valores de catálogo, obteniendo un error de +1 pixel (~ 25 arcmin.).

En cuanto a la curva fotométrica, es preciso aclarar que la fotometría se hizo en base a una única estrella (Sirio), dado que no se disponía de más estrellas en la imagen, debido a la contaminación lumínica que introduce un foco luminoso que estaba encendido en el momento de la detección del bólido, y durante toda esa noche.

La fotometría con una única estrella es en principio posible, si se descarta el término en x (la masa de aire) en la **Ecuación 7-1**:

$$m_V = C - 2.5 \cdot \log \left(\sum_i \sum_j I_{ij} - I_{ij,cielo} \right) \Rightarrow \quad \text{Ecuación 9-1}$$

$$\Delta m_V \equiv m_{V,B} - m_{V,*} = 2.5 \cdot \log \left(\frac{F_*}{F_B} \right) \quad \text{Ecuación 9-2}$$

donde los subíndices “B” y “*” refieren al bólido y la estrella de referencia (en este caso, Sirio), respectivamente (F es el flujo integrado).

De este modo, lo que es preciso determinar en cada frame del video son los flujos del bólido y la estrella de referencia, obteniéndose la magnitud del bólido mediante la **Ecuación 9-1**. Las barras de error de 0.5 se justifican dado que el término $kx \sim 0.5$ para valores típicos de k y $z=45^\circ$.

Se trata pues de un bólido muy brillante, cuya magnitud está muy cercano al límite inferior (-8) señalado en AMS (2012) para que el meteoróide que lo origina llegue a la superficie en forma de meteorito. Sin embargo, un requerimiento adicional para que esto ocurra es que el meteoro sea de origen asteroidal, lo cual nos conduce finalmente a discutir un posible origen de este bólido.

En los días siguientes al 2/11 fueron reportados numerosos registros de eventos de bólidos y meteoros a nivel mundial⁵, todos los cuales fueron vinculados a la lluvia meteórica de las Táuridas, originada por el cometa 2P/Encke, y que se produce entre los días ~ 4 y ~ 7 de noviembre. Si este bólido está vinculado a las Táuridas, no estaríamos ante un evento de origen asteroidal sino cometario. Para determinar inequívocamente un vínculo de esta naturaleza es preciso disponer de dos o más observaciones del mismo evento, y mediante triangulación determinar el radiante del bólido, para finalmente compararlo con el radiante de la lluvia meteórica. Como no disponemos de otra observación de este bólido, se incluye a continuación un fotomontaje de la trayectoria del bólido y un mapa del cielo, en el que se indica la ubicación del radiante de las Táuridas.

⁵ Ver por ejemplo: World Space Week (2012), y AMS (2012b).



Figura 107: Fotomontaje de la trayectoria del bólido (en azul) superpuesta a un mapa del cielo. Se indican las constelaciones y la ubicación aproximada del radiante de las Táuridas.

Si bien el bólido no parece originarse en el radiante de las Táuridas, la imagen no es concluyente pues, como se indicó anteriormente, es preciso realizar una triangulación a partir de dos o más registros del mismo evento. Con el despliegue futuro de la red de cámaras todo cielo, será posible disponer de dos o más observaciones del mismo evento.

10 Conclusiones y perspectivas futuras

Hemos desarrollado un sistema todo cielo que incorpora las dos funcionalidades que nos habíamos planteado al comienzo del presente proyecto, vale decir, detección y procesamiento de bólidos, por un lado, y determinación de FN diurna, por otro.

El proceso de desarrollo del sistema fue muy rico en experiencia y conocimientos adquiridos, tanto en el campo teórico como práctico, en distintas disciplinas (astronomía observacional, programación, diseño de prototipos, física general, formulación y gestión de proyectos, etc).

El sistema desarrollado incluye dos aplicaciones de software, capaces de realizar de forma automática todas las tareas asociadas al pre- y postprocesamiento de imagen y video todo cielo, necesarios para la detección de bólidos, obtención de trayectoria y curva fotométrica, y generación de bases de datos de FN diurna. Es preciso indicar que resta por corregir algunos detalles vinculados a la robustez de las aplicaciones, e incluir la posibilidad de realizar fotometrías “manuales” (en el sentido de involucrar ajustes por parte del usuario), tal como se realizó para el bólido detectado. Además, como se señaló en los apartados 9.3.5 y 9.4.5, es preciso mejorar los algoritmos de calibración fotométrica y astrométrica, en particular en lo que refiere a los criterios de “salida” de las iteraciones contenidas en los mismos.

El prototipo desarrollado, que constituye el principal resultado tangible de este proyecto, es replicable en otros puntos del país, a los efectos de conformar una red nacional de detección de bólidos, capaz de determinar la órbita original de los bólidos detectados, y simultáneamente capaz de generar bases de datos de FN diurna de alta resolución espacial y temporal. Actualmente⁶ se cuenta con el equipamiento necesario para montar dos estaciones más, una de las cuales se ubicará próximamente en el Observatorio Astronómico y Geofísico de Aiguá (OAGA), departamento de Maldonado, mientras que la segunda se instalará probablemente en el departamento de Florida. De este modo, se contará con una red de tres estaciones, muy probablemente en la primera mitad de 2013.

La determinación de la órbita original de un bólido posibilita la determinación de vínculos con órbitas cometarias o asteroidales, y para los eventos muy brillantes ($m_V < \sim -10$) y de origen asteroidal, facilitar el rastreo de posibles meteoritos, investigaciones que se están llevando a cabo en otras partes del mundo, principalmente en el hemisferio norte.

El sistema fue capaz de detectar 5 bólidos, el primero de ellos de magnitud máxima $\sim -7.5 (\pm 0.5)$, después de unas 1000 horas de observación. Es difícil estimar cuántas horas de cielo despejado hubo en este período (junio a noviembre de 2012). El análisis se dificulta aún más debido a la importante cantidad de horas durante las cuales en el OALM las condiciones distaban mucho de ser óptimas debido a contaminación lumínica en las cercanías del observatorio.

En cuanto a la determinación de FN diurna, es preciso evaluar junto a investigadores de otras áreas la conveniencia de un despliegue nacional del sistema desarrollado en este

⁶ A noviembre de 2012.

trabajo, si por el contrario es preferible un despliegue de sistemas basados en cámaras color, con sistema de ocultamiento de sol, para la obtención de datos de FN más confiables, o si tal vez es conveniente desarrollar algoritmos para la clasificación de *tipos* de nubes, una línea de investigación muy reciente a nivel mundial (ver por ej. Calbó y Sabburg, 2007, o Heinle et al., 2010). Por supuesto que esta última opción no excluye a ninguna de las anteriores.

La generación de bases de datos de FN diurna permite también el estudio de la correlación entre datos de irradiancia solar y FN, como se describe en Pfister et al., 2003.

Es posible también investigar más en profundidad que lo hecho en el marco de este trabajo, la posibilidad de estimar FN nocturna a partir de imágenes de pseudo-larga exposición. El principio general sería comparar el número de estrellas detectadas y asociadas a su correspondiente estrella de catálogo, con el número de estrellas que es esperable encontrar, bajo condiciones de cielo despejado. El principal desafío en este sentido es el de encontrar un número de estrellas suficiente y que estén lo suficientemente distribuidas en el cielo como para poder inferir la FN a partir de la diferencia entre estrellas detectadas y estrellas que es esperable encontrar.

Se concluye finalmente que el prototipo construido en este trabajo, y sus posibles desarrollos y/o mejoras a futuro, abren nuevas líneas de investigación y trabajo académico en el corto y mediano plazo.

11 Referencias

- AMS, 2012, *American Meteor Society-FAQ* [Online] Disponible en: <http://www.amsmeteors.org/fireballs/faqf/> (05/11/2012).
- AMS, 2012b, *American Meteor Society-Southern Taurids* [Online] Disponible en: <http://www.amsmeteors.org/tag/southern-taurids/> (05/11/2012).
- Borovicka, J., Spurny, P., Keclíková, 1995, *A new positional astrometric method for all-sky cameras*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, Ser. 112, 173-178.
- Calbó, J., Sabburg, J., 2007, *Feature extraction from whole-sky ground-based images for cloud-type recognition*, J. Atmos. Oceanic Technol., 25, 3–14.
- Canny, J., 1986, *A Computational Approach To Edge Detection*, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698.
- Cepilecha, Z., Borovicka, J., Graham Elford, W., Revelle, D., Hawkes, R., Porubcan, V., Simek, M., 1998, *Meteor phenomena and bodies*, Space Science Reviews, Vol. 84, pp. 327-471.
- Ceretta, A., Tancredi, G., Figueres, V., 2007, *Cámaras Todo Cielo, versión 2007 – Programa B.U.S.C.A.* Informe interno del OALM.
- Cortes, C., Vapnik, V., 1995, *Support-Vector Networks*, Machine Learning, 20, 273-297.
- Desert Fireball Network, 2012, *Research: The Desert Fireball Network* [Online] Disponible en: <http://www3.imperial.ac.uk/desertfireballnetwork> (31/10/2012).
- Dirección Nacional de Meteorología, 2012, *Características estacionales del clima- Clima de invierno en Uruguay*. [Online] Disponible en: <http://www.meteorologia.gub.uy/pdf/caracteristicas/invierno.pdf> (30/10/2012).
- Duda, R., Hart, P., Stork, D., 2001, *Pattern classification*, 2ª. edición, NewYork: John Wiley & Sons.
- Groth, E., 1986, *A pattern-matching algorithm for two-dimensional coordinate lists*, The Astronomical Journal, Vol. 91, Num. 5, p. 1244-1248.
- Heinle, A., Macke, A., Srivastav, A., 2010, *Automatic cloud classification of whole sky images*, Atmos. Meas. Tech., 3, p. 557–567.
- Huang, T.S., Yang, G. J., Tang, G.Y., 1979, *A fast two-dimensional median filtering algorithm*, IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol ASSP 27, No. 1.

- Huo, J. & Lu, D., 2009, *Cloud Determination of All-Sky Images under Low-Visibility Conditions*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 26, pp. 2172-2181.
- Jenniskens, P., Gural, P., Dynneson, L., Grigsby, B.J., Newman, K.E., Borden, M., Koop, M., Holman, D., 2011, *CAMS: Cameras for Allsky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers*, Icarus, Vol. 216, pp. 40-61.
- Kasten, F., & Young, A.T., 1989, *Revised optical air mass tables and approximation formula*. Applied Optics 28:4735–4738.
- Kuhn, H.W., & Tucker, A.W., 1950, *Nonlinear programming*, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1951, pp. 481-492.
- Kugelmass, F., Chelle, G., 2004, *Sistema Autónomo para la Detección de Nubes y Bóidos*, Proyecto de grado de Ingeniería en Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- McCrosky, R.E., 1968, *The distribution of magnitudes, masses, and energies of large meteoric bodies*, Smithson. Astron. Astrophys. Obs. Spec. Rep. No. 280, pp 1-13.
- NASA, 2012, *NASA's All-sky Fireball Network* [Online] Disponible en: <http://fireballs.ndc.nasa.gov/> (31/10/2012)
- Nordling, C., Österman, J., 2002, *Physics Handbook for Science and Engineering*, Studentlitteratur, Lund (Suecia), ISBN 91-44-00-823-6.
- Oberst, J., Molau, S., Heinlein, D., Gritzner, C., Schindler, M., Spurny, P., Cepelcha, Z., Rendtel, J., Betlem, H., 1998, *The "European Fireball Network": current status and future prospects*, Meteoritic & Planetary Science, Vol. 33, pp. 49-96.
- Ofek, E., 2012, *Eran's Matlab scripts* [Online] Disponible en: <http://wise-obs.tau.ac.il/~eran/matlab.html> (5/07/2012).
- Otsu, N., 1979, A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, No. 1, Vol. SMC-9, pp. 62-66.
- Pfister, G., McKenzie, R.L., Liley, J.B., Thomas, A., Forgan, B., Long, C.N., 2003, *Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 42, pp. 1421-1434.
- Rainbow, 2012, *Rainbow L163VDC4P Data Sheet* [Online] Disponible en (23/6/2012): http://www.sourcesecurity.com/docs/fullspec/L163V_Spec_Color_web.pdf
- Rondi, S., 2002, *Design and integration of an all-sky cloud detection system*, European Southern Observatory [Online] Disponible en (21/6/2012): http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/mascot/doc/rapport_mascot_final.pdf

- Sanyo-Denki, 2012, *Sanyo Denki Web Catalogue* [Online] Disponible en (23/6/2012): http://db.sanyodenki.co.jp/product_db_e/coolingfan/dcfan/dc_fan_detail.php?master_id=1741
- Scholkopf, B., & Smola, A. J., 2001, *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Serra, J., 1982, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, ISBN 0-12-637240-3.
- Tancredi, G., Tulic, J.C., 2007, *Automatic detection of fireballs in all-sky images*. Documento interno del Observatorio Astronómico Los Molinos.
- Tulic, J.C., 2007, *Trabajo especial de la Licenciatura en Física*, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- Vizier, 2012, *VizieR Service*, Centre des données astronomique de Strasbourg [Online] Disponible en: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR> (05/07/2012).
- Wallace, J., Hobbs, P., 2006, *Atmospheric Science - An introductory survey*, 2nd. Edition, Canada, ISBN 10: 0-12-732951-X.
- Watec, 2012, *Watec 902 H3 Ultimate Data Sheet* [Online] Disponible en (23/6/2012): <http://www.watec.co.jp/english/bw/download/WAT-902H3%20ULTIMATE.pdf>
- Weather Underground, 2012, *History | Weather Underground* [Online] Disponible en (21/6/2012): <http://espanol.wunderground.com> => “Condiciones climatológicas” => “Datos del Historial”
- Weryk, R. J., Brown, P. G., Domokos, A., Edwards, W. N., Krzeminski, Z., Nudds, S. H., Welch, D. L., 2008, *The Southern Ontario all-sky meteor camera network*, Earth, Moon, Planet, 102, 241-246.
- World Space Week, 2012, *World Space Week-Uruguay* [Online] Disponible en (5/11/2012): <http://www.wswuruguay.blogspot.com/2012/11/tauridas-ultima-informacion-importante.html>

12 ANEXOS

12.1 Anexo I: Costos de los primeros prototipos.

Material	Costo (\$U)
Aluminio	3.141
Espejo	4.800
Remaches y tornillos	180
Cámara	1.113
Cableado	300
Placa de video	4.392
Gastos varios	300
Total	14.226
Observación: no incluye la PC.	

Tabla 13: Resumen de costos asociados al prototipo del Proyecto B.U.S.C.A.

Ítem	Costo ⁷ (\$U)
Protección para cámara en acrílico: cristal de 4 mm, cilindro de 20 cm de diámetro x 30 cm de altura y domo desmontable de 20 cm de diámetro x 10 cm de altura.	1200
Lente ojo de pez marca Fujinon modelo YV2.2x1.4A-SA2	4000
Cámara CCTV marca KT&C modelo SLL650BHE	4730
Ventilador PC	300
TOTAL	10.230

Tabla 14: Rubrado de costos del primer prototipo desarrollado en el marco del presente trabajo.

⁷ Los precios no incluyen IVA, y corresponden al momento de la compra (2010).

12.2 Anexo II: Especificaciones técnicas y costos del nuevo diseño.

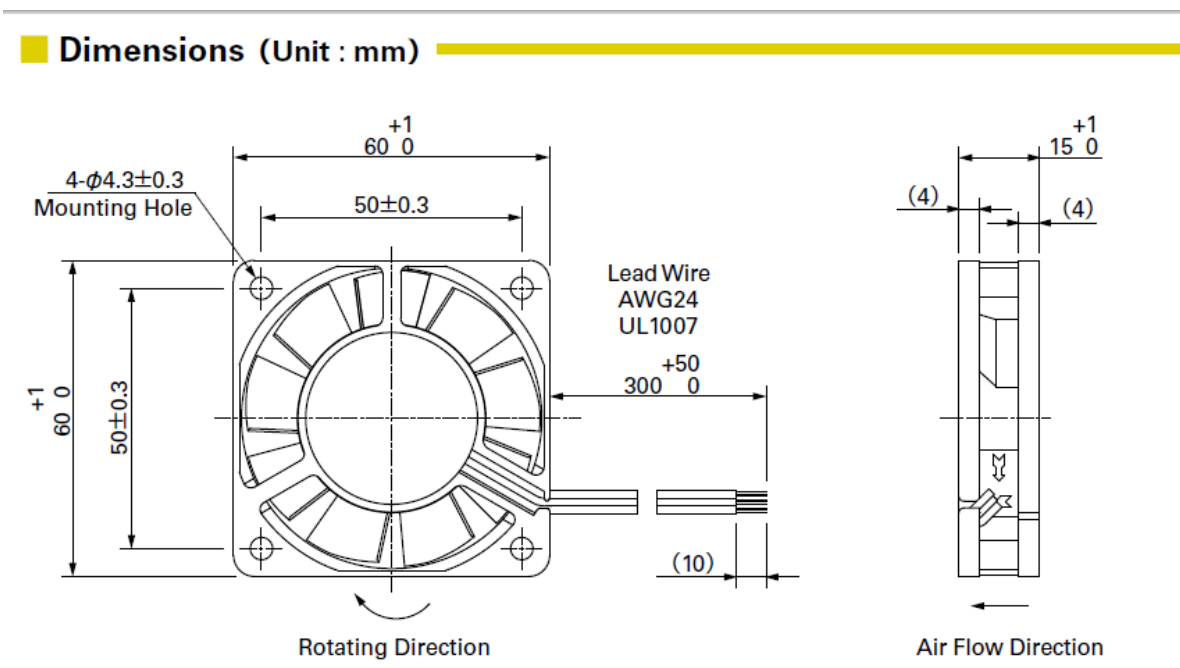


Figura 108: Dimensiones de ventilador Sanyo-Denki, línea Pico Ace 15 (Fuente: Sanyo-Denki, 2012).

Sensor	CCD 1/3''
Número efectivo de píxeles	752(H)x582(V)
Iluminación mínima	0.0002 lx @ F1.4
S/N	>50 dB (AGC 5dB, $\gamma=1.0$)
Ganancia	5-32 dB ⁸

Tabla 15: Principales características técnicas de cámara Watec 902 H3 Ultimate.

Distancia focal	1.6~3.4 mm
Campo de visión angular (FOV, @ F1.6)	180.0°x114.1°
Campo de visión angular (FOV, @ F3.4)	84.3°x55.8°

Tabla 16: Principales características técnicas de lente Rainbow modelo L163VDC4P.

⁸ Valor correspondiente a control de ganancia fijado en AGC-LO (*Automatic gain control, low*).

DIMENSIONS (mm)

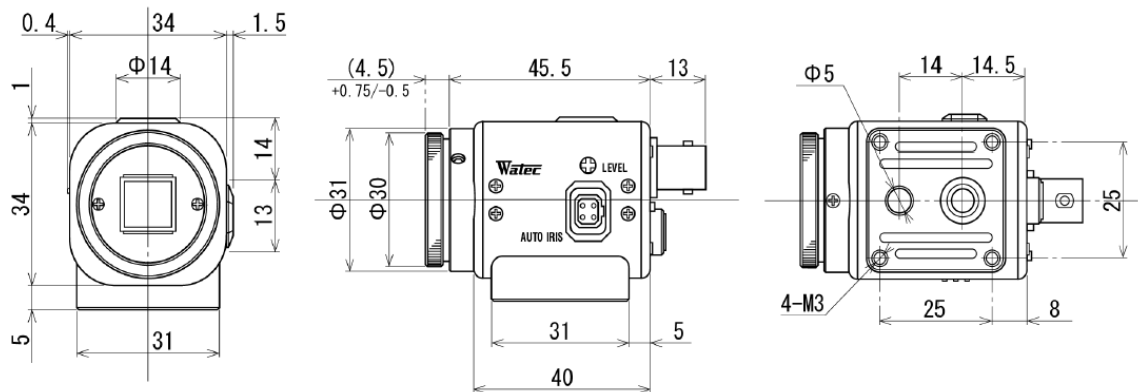


Figura 109: Dimensiones de cámara Waterc modelo 902H3 Ultimate (Fuente: Waterc, 2012).

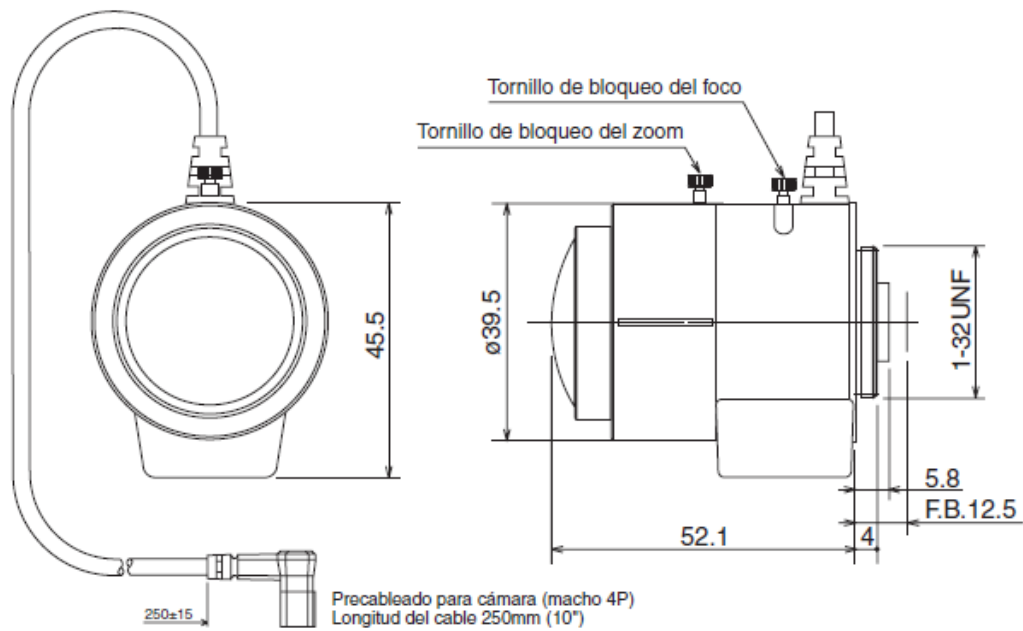


Figura 110: Dimensiones de lente marca Rainbow modelo L163VDC4P (Fuente: Rainbow, 2012).

Las dimensiones de la pieza en forma de “L” de acrílico se muestran en la Figura 111:

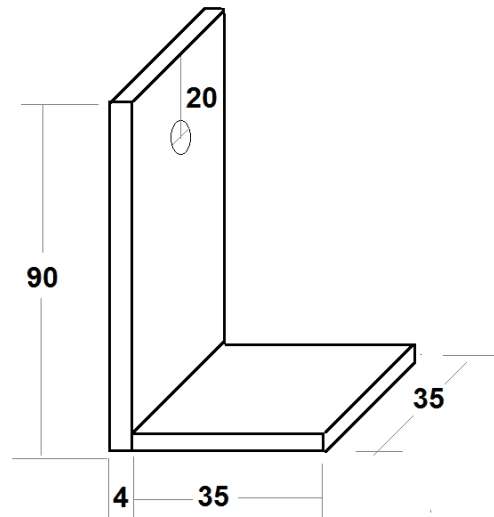


Figura 111: Dimensiones de ele de acrílico, en mm.

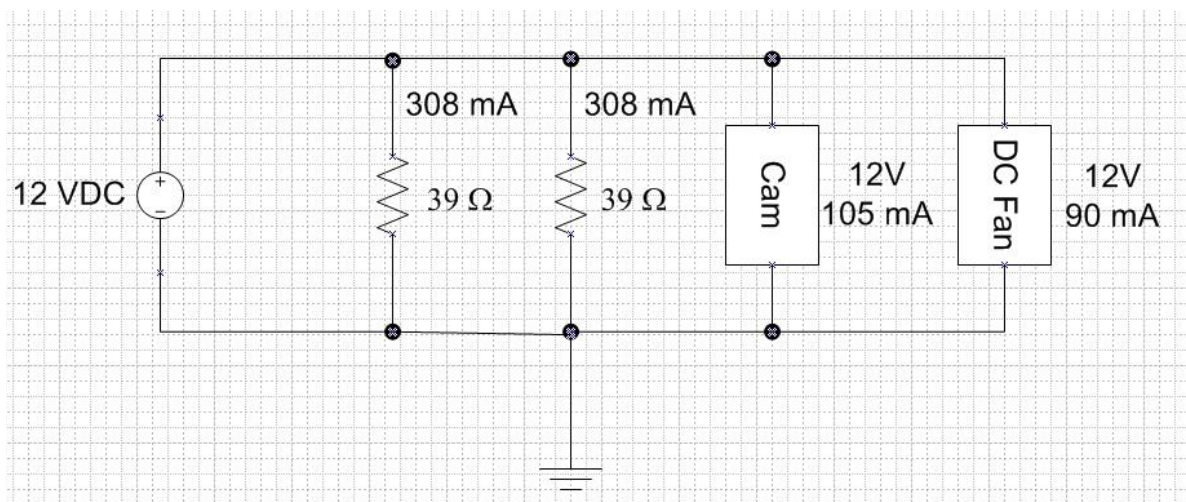


Figura 112: Esquema eléctrico del sistema (valores nominales).

Voltaje nominal [V]	Rango op. Voltaje [V]	Corriente nominal [A]	Vel. Nominal [rpm]	Flujo aire [m ³ /min]	Presión estática [Pa]	Rango Temp. [°C]	Vida media [h]
12	7-13,8	0,09	4.100	0.40	38,2	(-10,70)	60.000

Tabla 17: Características técnicas de ventilador Sanyo-Denki 109P0612H701 (Sanyo-Denki, 2012).

	P.U. [\$U]	Cantidad	Subtotal
Pieza en forma de ele Acrílico	30	1	30
Cámara Watec 902 H3 Ultimate	5820	1	5820
Lente ojo de pez Rainbow L163VDC4P	4220	1	4220
Ventilador PC Sanyo-Denki 12V 0.09A	130	1	130
Resistencia 39 ohm 5%	25	2	50
Tubo PVC p/ exterior	60	0.2	12
Tapa c/rosca p/ Tubo PVC 100	280	1	280
Globo vidrio 7 cm	140	1	140
Fuente 12VDC 1A	300	1	300
Cable coaxial con terminales BNC	25	6	150
Otros (tornillería, material eléctrico)	200	1	200
		TOTAL \$U	11332
		TOTAL US\$	567

Tabla 18: Lista de componentes y costos asociados del prototipo definitivo. El monto en dólares americanos se calculó en base a una cotización de 20 \$U/US\$.

Componente	Precio (US\$)
PC c/ proc. Dual Core G630 2.7 GHz, RAM DDR 3 4Gb, HDD 400 Gb SATA.	329
Componentes de Tabla 18	567
Capturadora de video USB EASY-CAP y conectores	32
Monitor estándar	25
TOTAL US\$	953

Tabla 19: Costo total por estación, incluyendo impuestos.

12.3 Anexo III: Estrellas de catálogo Vizier.

Lista de estrellas de catálogo utilizada en las calibraciones astro- y fotométrica.

RAJ2000	DEJ2000	Bayer	Const	RA2000	DE2000	Vmag
deg	deg			h:m:s	d:m:s	mag
101.2873	-16.7161	alf	CMa	06 45 08.9	-16 42 58	-1.46
95.9885	-52.6955	alf	Car	06 23 57.2	-52 41 44	-0.72
213.9154	19.1825	alf	Boo	14 15 39.6	+19 10 57	-0.05
219.9012	-60.8353	alf1	Cen	14 39 36.2	-60 50 07	-0.01
279.2346	38.7836	alf	Lyr	18 36 56.2	+38 47 01	0.03
79.1723	45.998	alf	Aur	05 16 41.3	+45 59 53	0.08
78.6344	-8.2017	bet	Ori	05 14 32.2	-08 12 06	0.13
114.8256	5.225	alf	CMi	07 39 18.1	+05 13 30	0.37
24.429	-57.2366	alf	Eri	01 37 42.9	-57 14 12	0.46
88.7931	7.407	alf	Ori	05 55 10.3	+07 24 25	0.5
210.9562	-60.3729	bet	Cen	14 03 49.4	-60 22 22	0.61
297.6958	8.8683	alf	Aql	19 50 46.9	+08 52 06	0.76
68.9802	16.5092	alf	Tau	04 35 55.2	+16 30 33	0.86
247.3521	-26.432	alf	Sco	16 29 24.4	-26 25 55	0.91
201.2983	-11.1614	alf	Vir	13 25 11.5	-11 09 41	0.97
116.329	28.0261	bet	Gem	07 45 18.9	+28 01 34	1.14
344.4129	-29.6222	alf	PsA	22 57 39.0	-29 37 20	1.16
191.9307	-59.6887	bet	Cru	12 47 43.3	-59 41 19	1.25
310.3579	45.2803	alf	Cyg	20 41 25.8	+45 16 49	1.25
219.9012	-60.8353	alf2	Cen	14 39 36.2	-60 50 07	1.33
152.0932	11.9672	alf	Leo	10 08 22.3	+11 58 02	1.35
104.6565	-28.9722	eps	CMa	06 58 37.5	-28 58 20	1.5
113.6498	31.8884	alf	Gem	07 34 35.9	+31 53 18	1.58
186.6499	-63.099	alf1	Cru	12 26 35.9	-63 05 56	1.58
187.7916	-57.1131	gam	Cru	12 31 09.9	-57 06 47	1.63
263.4021	-37.1036	lam	Sco	17 33 36.4	-37 06 13	1.63
81.2827	6.3497	gam	Ori	05 25 07.8	+06 20 59	1.64
81.5731	28.6075	bet	Tau	05 26 17.5	+28 36 27	1.65
84.0531	-1.2019	eps	Ori	05 36 12.7	-01 12 07	1.69
138.3005	-69.7173	bet	Car	09 13 12.1	-69 43 02	1.69
332.0583	-46.9611	alf	Gru	22 08 13.9	-46 57 40	1.71
193.5074	55.9598	eps	UMa	12 54 01.7	+55 57 35	1.77
51.0806	49.8613	alf	Per	03 24 19.3	+49 51 41	1.79
165.9319	61.7509	alf	UMa	11 03 43.6	+61 45 03	1.79
122.3831	-47.3367	gam2	Vel	08 09 31.9	-47 20 12	1.83
107.0977	-26.3931	del	CMa	07 08 23.4	-26 23 35	1.84
276.0434	-34.3847	eps	Sgr	18 24 10.3	-34 23 05	1.85

125.6285	-59.5095	eps	Car	08 22 30.8	-59 30 34	1.86
206.8849	49.3134	eta	UMa	13 47 32.3	+49 18 48	1.86
264.3296	-42.9978	tet	Sco	17 37 19.0	-42 59 52	1.87
89.8823	44.9475	bet	Aur	05 59 31.7	+44 56 51	1.9
99.4281	16.3992	gam	Gem	06 37 42.7	+16 23 57	1.92
252.1668	-69.0278	alf	TrA	16 48 39.9	-69 01 40	1.92
306.4121	-56.7352	alf	Pav	20 25 38.8	-56 44 07	1.94
131.176	-54.7084	del	Vel	08 44 42.2	-54 42 30	1.96
95.6748	-17.9561	bet	CMA	06 22 41.9	-17 57 22	1.97
141.8969	-8.6586	alf	Hya	09 27 35.2	-08 39 31	1.97
239.8758	25.9203			15 59 30.1	+25 55 13	2
10.8974	-17.9866	bet	Cet	00 43 35.3	-17 59 12	2.01

Tabla 20: Datos contenidos en archivo .tsv, del catálogo Vizier, de las 50 estrellas más brillantes del cielo.