

# Determinación de la altura de la cobertura nubosa mediante visión estereoscópica digital

## Determination of the cloud base height by means of digital stereoscopic vision

Masi W S<sup>a\*</sup>, Rodriguez Colmeiro R<sup>a\*</sup>, Verrastro S<sup>a</sup>, Salvador J<sup>b c</sup>, Wolfram E<sup>b</sup>

a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento Ingeniería Electrónica

b Centro de Investigación en Láseres y Aplicaciones, UNIDEF (CONICET-MINDEF)

c Unidad Académica Río Gallegos, Argentina

Recibido: 10/11/14; aceptado: 25/03/15

Dentro de los parámetros que caracterizan a una nube, la altura de su base es un factor dominante en la determinación de las propiedades radiativas infrarrojas de la misma y por lo tanto un parámetro fundamental a cuantificar. Por ello, en el presente trabajo se desarrolló una metodología para la determinación de la altura de la cobertura nubosa (Cloud Base Height: CBH). La misma consta de 3 etapas principales: 1. La caracterización del sensor de cada cámara en laboratorio a través de un banco de calibración óptico; 2. Un procedimiento de posicionamiento de las cámaras en el exterior para su correcta alineación y estabilización; 3. Un algoritmo de procesamiento digital de imágenes en lenguaje MATLAB, el cual a partir de dos imágenes simultáneas estima la CBH aplicando el principio de visión estereoscópica en distintos puntos de interés. Las mediciones obtenidas del sistema, compuesto por un par de cámaras digitales emplazadas una distancia conocida entre sí (100 m), fueron contrastadas con un lidar para su validación. Analizando dos casos principales, uno con nubosidad alta (8000~12000 m) y otro con múltiples capas de nubosidad baja (800~4000 m), se determinó para el primer caso una incertidumbre máxima de altura de base de nubes menor al 38% y para el segundo caso una incertidumbre máxima menor al 10%. Se pudo determinar que las principales fuentes de incerteza en esta metodología están asociadas con factores provenientes de la caracterización de las cámaras y su alineación con la vertical en el exterior del sistema. Los resultados de esta metodología aportan una herramienta alternativa para la determinación de la CBH, constituyéndose en un sistema de relativo bajo costo con respecto a los ceilómetros comerciales.

*Palabras clave: Visión Estéreo – Procesamiento Digital de Imágenes – Visión Artificial – Cámara Digital – Nubes – Cobertura Nubosa – Altura de Nubes – Atmósfera – CBH*

Among the parameters that characterize a cloud, the height of its base is one of the key factors in the determination of the infrared radiative properties of the clouds, and hence one of the main parameters to measure. Therefore, in this paper we have developed a method for the determination of the Cloud Base Height (CBH). It consists of 3 main stages: 1. The characterization of each camera sensor through a laboratory optical bench calibration; 2. A method to deploy the system outdoors for proper alignment and stabilization; 3. An algorithm for digital image processing in MATLAB programming language, which estimates the cloud base height from two simultaneous images using a triangulation procedure at different points of interest. The resulting measurements of the system, composed of a pair of advanced compact cameras deployed with a known separation (100 m), were checked against a lidar system for validation. Two major cases were studied, one with high clouds (8000~12000 m), and other with multiple layers of low clouds (800~4000 m), resulting for the first case in a maximum uncertainty of less than 38 % of its CBH, and for the second a maximum uncertainty of less than 10 % of its CBH. It was possible to determine the main sources of uncertainty which are associated with the characterization of the digital cameras and the alignment with the zenith in the deployment. The results of this method give an alternative tool for the determination of CBH, making a relative low cost system with respect to commercial ceilometers.

*Keywords: Stereo Vision – Digital Image Processing – Artificial Vision – Digital Camera – Clouds – Cloud Cover – Height of Clouds – Atmosphere – CBH*

---

\* [sebastianmasi@hotmail.com](mailto:sebastianmasi@hotmail.com) ; [ramiro89@gmail.com](mailto:ramiro89@gmail.com)

## I. INTRODUCCIÓN

El balance radiativo del sistema Tierra-Atmósfera está modulado principalmente por las nubes; por lo tanto, el entendimiento de la interacción de las nubes y la radiación es uno de los problemas más importantes en los estudios relacionados con el clima<sup>1</sup>. Dentro de los estudios de cambio climático global, uno de los principales objetivos que la comunidad científica internacional tiene, es el de mejorar la exactitud de los modelos de circulación general capaces de predecir cuándo y en que magnitud se presentará el calentamiento global debido al aumento de los gases de efecto invernadero, sin duda el impacto antropogénico al clima de nuestro planeta más importante de nuestra era. Las investigaciones han demostrado que la retroalimentación radiativa provocada por las nubes es el efecto directo más importante que determina la magnitud de la posible respuesta del clima a las actividades humanas<sup>2</sup>.

Comparado a los otros factores que determinan los niveles de radiación solar que arriba a la superficie de nuestro planeta, tales como columna de ozono total, los aerosoles y el albedo del suelo, los efectos de las nubes no están tan bien modelados a partir de los principios básicos. Esto se puede atribuir a las dificultades intrínsecas en la determinación de las características de las nubes<sup>3</sup>.

Es por ello que se han realizado notables esfuerzos tecnológicos en el desarrollo de técnicas para la determinación de las características principales de la cobertura nubosa como son el tipo de nube, la porción o superficie del cielo que estas cubren, la altura de su base y sus propiedades ópticas entre otros factores.

En particular, entre todos los parámetros que caracterizan a las nubes, la altura de su base (Cloud Base Height: CBH), es un factor dominante en la determinación de las propiedades radiativas infrarrojas de las nubes, y por ende uno de los principales parámetros a medir para reducir las incertezas asociadas con la interacción nube-radiación. Sin embargo es uno de los parámetros menos medidos y generalmente estimados a partir de observaciones visuales de los operadores de los servicios meteorológicos con alto rango de incertidumbre.

Dentro de los sistemas actuales para la determinación de la CBH se encuentran los radares y los lidars<sup>4</sup>. Ambos dispositivos miden el tiempo de vuelo de una señal emitida y reflejada o dispersada por el blanco, en este caso la nube. Un tipo particular de lidar infrarrojo, el ceilómetro, es el instrumento que generalmente se utiliza en los aeropuertos de distintos lugares del mundo para la determinación autónoma de la CBH, dato de gran valor para las maniobras de despegue y aterrizaje de los aviones.

Como alternativas para la medición de la CBH con estos sistemas de elevado costo, se han propuesto técnicas que utilizan el concepto de visión estéreo<sup>5</sup>. De la misma forma que el sistema visual humano puede percibir la profundidad usando dos ojos, la altura de las nubes pueden ser calculadas usando dos cámaras que miren el mismo campo de nubes. El método empleado

es conocido como visión estéreo de nubes y ha sido implementado a nivel de investigación por diferentes grupos alrededor del mundo<sup>6,7</sup>.

El alineamiento con el plan estratégico científico tecnológico nacional que impulsa los desarrollos nacionales pone de relieve los esfuerzos para dominar el estado del arte de metodologías que puedan desarrollarse en el país en el marco de los programas de investigación de I+D de las universidades nacionales y los centros de investigación del estado. Es por ello que este trabajo desarrolla, evalúa y aplica las distintas etapas de la metodología de determinación de la altura de la base de las nubes utilizando visión estéreo de imágenes digitales de la cobertura nubosa.

Este trabajo se ha organizado de la siguiente manera: en la Sección II, se describen los fundamentos matemáticos y geométricos para la triangulación de las imágenes, así como también la descripción del sistema instrumental utilizado y la metodología utilizada para el tratamiento digital de las imágenes a partir de las cuales se calcula la CBH, que incluye la caracterización de las cámaras empleadas, la generación del banco de imágenes y el tratamiento digital de las mismas. En la Sección III se presenta un análisis de las principales fuentes de incerteza asociadas a la metodología aplicada, mientras que en la Sección IV se muestran los resultados obtenidos en las experiencias de campo y la correspondiente validación con las mediciones de la CBH obtenidas con el lidar elástico operativo en la División Lidar del CEILAP (CITEDEF-CONICET). En las técnicas de sensado remoto activo de la atmósfera se utiliza un transmisor (p. ej. un radar o lidar), para enviar pulsos de radiación hacia la atmósfera, donde son dispersados por moléculas, aerosoles e inhomogeneidades en la estructura de las capas atmosféricas. Una porción de esta radiación retrodispersada es registrada utilizando un detector adecuado. Un ejemplo de este tipo de instrumentos son los sistemas LIDAR (Light Detection And Ranging) que utilizan láseres cuyos pulsos son enviados a través de la atmósfera.

En la sección final de este trabajo se abordan las conclusiones y perspectivas futuras, con especial énfasis en los aspectos críticos que posee la técnica de visión estéreo de imágenes digitales para la determinación de la CBH.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Principio de funcionamiento

En esta sección se describe el principio de visión estereoscópica, el cual históricamente ha sido empleado para medir distancias que son inaccesibles o muy difíciles de estimar mediante un método convencional<sup>8</sup>. Imágenes analógicas estéreo de nubes han sido tomadas y analizadas por más de 100 años<sup>9</sup>, junto con la metodología utilizada y sus respectivos elementos para determinar la altura de la base de nubes. Para ello la orientación y alineación del sistema resulta de gran importancia habiéndose desarrollado un protocolo de armado del sistema de forma repetible en el tiempo con diferentes tipos de cámaras, el cual consta de una

primera etapa en laboratorio, luego una toma de imágenes en campo y un conjunto de algoritmos de procesamiento digital de imágenes.

A través del sistema de la figura 1, compuesto por dos cámaras digitales disponibles en el mercado y de bajo costo, separadas una distancia conocida y dispuestas verticalmente en dirección al cenit con su correcta alineación y disparadas de forma simultánea, se obtienen 2 imágenes del mismo sujeto con una diferencia angular entre ellas.

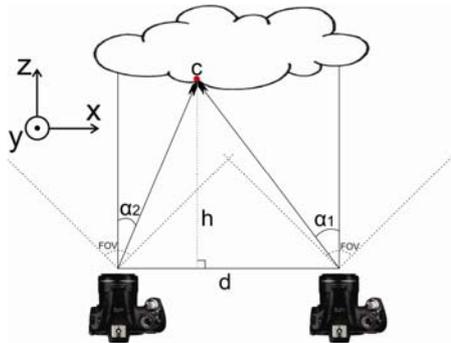


Figura 1. Esquema simplificado del método para la determinación de la altura de un punto distante mediante visión estereoscópica digital, aplicado a una formación nubosa.

Si en ambas imágenes se identifica un punto C común, la distancia desde la ubicación de las cámaras hasta el punto puede ser calculada mediante trigonometría. La CBH en un punto de la nube se determina mediante la ecuación 1 donde se expresa la relación entre la distancia de separación de las cámaras y los ángulos formados en cada cámara entre el cenit y el punto común en cuestión. Repitiendo este proceso para múltiples sectores de la nube se logra obtener una parametrización de la misma en función de la altura.

$$h = \frac{d}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} \quad (1)$$

Existe una altura mínima, a partir de la cual los campos de visión comienzan a solaparse, la misma se representa mediante la ecuación 2. Para el caso de una separación entre cámaras de 100 m y con un campo de visión (Field Of View: FOV) de 55° esta altura es de 96 m.

$$h_{\text{mínima}} = \tan(90^\circ - FOV) \cdot \frac{d}{2} \quad (2)$$

El área de solapamiento de un par de imágenes estéreo es calculada mediante la ecuación 3 donde d es la distancia entre cámaras [m], f es la distancia focal empleada [mm], s es el tamaño del sensor CMOS [mm] y h es la altura de la nube [m]. Para nubes ubicadas a 1 km de altura el solapamiento entre imágenes es del 95% mientras que para nubes de 10 km de altura el solapamiento es del 99,5%. Un alto nivel de solapamiento trae como ventaja una correlación entre imágenes más fácil, rápida y confiable<sup>7</sup>.

$$\text{Solapamiento}_{[\%]} = \left(1 - \frac{d \cdot f}{2 \cdot s \cdot h}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

## Descripción del sistema empleado

El sistema empleado consiste en dos cámaras digitales Canon SX40HS<sup>10</sup> con sensor CMOS 1/2.3" configuradas para generar un mapa de bits de salida JPG de 1200x1200 píxeles. La distancia focal es 6 mm o su equivalente en película de 35 mm, 24 mm. Las imágenes son almacenadas en una memoria SDHC y una vez finalizada la toma de datos son descargadas para su posterior análisis.

El disparo de las cámaras es realizado de forma manual mediante dos operadores que en forma sincronizada ejecutan un disparo cada 60 segundos mediante un protocolo de control para minimizar retardos. La distancia de separación entre cámaras es fijada en 100m como muestra la figura 2. Según el ensayo realizado en laboratorio el FOV de las cámaras en estas condiciones es de  $\alpha_x = \alpha_y = 55^\circ$ . Al ser la relación de la imagen 1:1, el ángulo de visión horizontal y vertical es el mismo. El ángulo de cada pixel

idealmente es  $\alpha_{\text{pixel}} = \frac{\alpha_x}{1200} = 0,045^\circ \frac{^\circ}{\text{pixel}}$ .



Figura 2. Disposición física en el exterior del sistema de cámaras utilizado para la determinación de la CBH.

## Metodología para la determinación de la CBH

Para lograr obtener la CBH a partir de un conjunto de imágenes adquiridas simultáneamente es necesario realizar tres pasos principales: la caracterización de las cámaras empleadas, la generación de un banco de imágenes y por último el análisis y tratamiento mediante procesamiento digital de imágenes.

## Caracterización del conjunto Sensor-Lente

El proceso de caracterización es obtenido dentro de una sala oscura con iluminación artificial controlada, donde todas las cámaras son ensayadas con la misma luz ambiente distribuida de forma homogénea sobre la retícula de calibración, la cual se encuentra parametrizada mediante líneas rectas horizontales, verticales y círculos concéntricos. Un diodo laser y un banco XYZ micrométrico son utilizados para lograr una correcta alineación de todo el sistema, logrando como resultado un paralelismo entre la retícula de calibración y el elemento frontal de la lente de la cámara, el centro óptico de la lente se encuentra ubicado en línea recta con el centro de la retícula. Se asume que el plano del sensor CMOS se ubica de forma paralela al elemento

frontal de la lente. Mediante el posicionamiento micrométrico y buscando simetría en el patrón reflejado es definida la incidencia normal del haz del láser, logrando así una correcta alineación de todo el sistema. En la figura 3 se observa el sistema de caracterización montado en laboratorio.

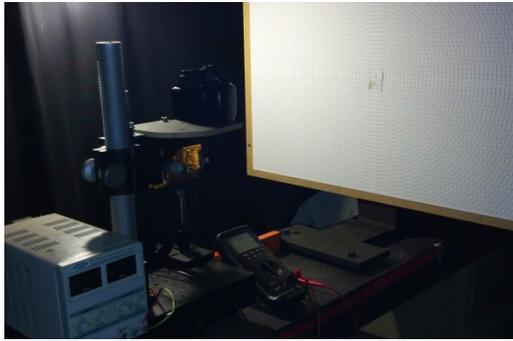


Figura 3. Alineación laser del conjunto Sensor-Lente-Retícula mediante el banco XYZ micrométrico para iniciar el proceso de caracterización y determinación de la constante de calibración.

Una vez lograda la alineación, es tomada una imagen de la retícula de calibración y la distancia hasta la misma es medida mediante un sensor Sharp electroóptico<sup>11</sup>. A partir de estos datos es calculado el FOV y un parámetro fundamental llamado constante de apertura. Esta constante relaciona la distancia, en pixeles, al centro óptico de la imagen de un punto característico con su ángulo de apertura. Dicha constante es fuertemente dependiente de las aberraciones de la lente. Se define la constante de apertura según la ecuación 4.

$$cte_{apertura} = \frac{\text{ángulo de apertura al punto}}{\text{cantidad de pixeles desde el centro al punto}} \quad (4)$$

En la figura 4 se presenta el resultado de dicha función, calculada para cada división circular de la retícula y su extrapolación polinómica. Dicho valor idealmente debiera ser constante en toda la imagen pero debido a las distorsiones radiales propias de la lente, su valor disminuye a medida que se aleja del centro. Las aberraciones esféricas pueden despreciarse para regiones centrales de las imágenes.<sup>8</sup>

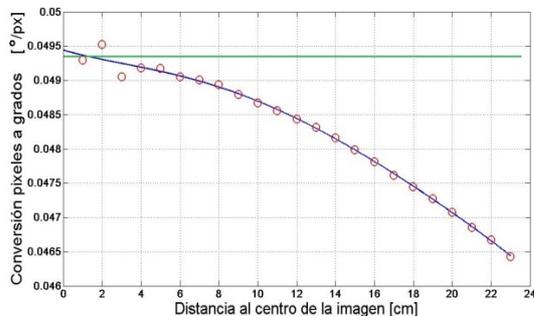


Figura 4. Valores de la constante de apertura (ec. 4) para cada distancia al centro óptico de la lente (rojo). Línea de extrapolación polinómica (Azul). Valores de la constante en caso de no existir aberraciones esféricas en la lente (Verde).

### Toma de imágenes en campo

Al momento de realizar la experiencia en campo, las 2 cámaras son alineadas con respecto al cenit. Como muestra la figura 5, existen 3 grados de libertad que deben ser alineados y corregidos<sup>8</sup>: ángulo en eje x  $\theta_x$ , ángulo en eje y  $\theta_y$ , rotación  $\theta$ . Los dos primeros grados de libertad son fijados mediante un nivel de burbuja. Esto permite alinear el elemento frontal de la cámara digital paralelo a la bóveda celeste. La rotación  $\theta$  es minimizada al momento del montaje del sistema utilizando puntos de control conocidos en campo y es corregida mediante un algoritmo de procesamiento digital de imágenes.



Figura 5. Grados de libertad en la alineación de las cámaras a) Vista frontal es alineada mediante nivel de burbuja b) Vista lateral es alineada mediante nivel de burbuja c) Vista superior es alineada mediante puntos de control en campo y luego corregida por software.

### Tratamiento digital de la imagen

Para el cálculo de la CBH es necesario aplicar distintos algoritmos de procesamiento digital de imágenes. Estos son utilizados en función de facilitar el apareamiento entre las imágenes y disminuir errores de cálculo en la estimación de la altura. Mediante el tratamiento digital y a partir de los datos obtenidos en la caracterización del conjunto Sensor-Lente se busca reducir una serie de errores sistemáticos que presentan las imágenes. Dentro del tratamiento digital se realiza un recorte y centrado de la imagen, eliminando áreas no caracterizadas de la lente y generando la coincidencia del centro óptico con el centro real de la imagen. También se deben corregir digitalmente otros aspectos de las imágenes obtenidas de la experiencia en campo. Estas siempre presentan algún grado de rotación relativa entre sí. Dicho efecto puede ser causa de imperfecciones en el procedimiento de instalación del montaje en campo, así como también causa de cambios ambientales durante la toma de imágenes en campo.

Finalmente se realiza una adecuación digital de las imágenes para poder realizar la búsqueda de puntos característicos. Mediante este acondicionamiento se eliminan los canales verde y azul de la imagen RGB por contar con poca información para el procedimiento empleado<sup>7</sup>, conservando el canal rojo como el único canal de luminancia a evaluar de cada imagen. Una expansión del histograma es aplicada con el fin de aumentar el rango dinámico y contraste de la imagen. Dicha adecuación de las imágenes impacta significativamente en la efectividad del operador matemático de búsqueda de puntos característicos.

### Selección de puntos característicos

La CBH es calculada en distintos puntos característicos de la formación nubosa, dando como resultado la parametrización en función de la altura de

la bóveda celeste. Estos puntos a seleccionar deben cumplir con una serie de criterios para ser utilizados en el cálculo de la CBH.

**Capacidad de discriminación:** Los puntos deben ser distintos de puntos circundantes, es decir, no se seleccionará un punto solo por formar parte de una formación nubosa si este no presenta ninguna diferencia con los hallados en su entorno cercano, debe existir una mínima variabilidad en el valor de luminancia del punto con respecto a sus vecinos.

**Estabilidad:** El punto debe ser robusto con respecto a la relación de señal ruido de la imagen y las distorsiones esperadas.

**Baja frecuencia:** Se deben evitar puntos que respondan a un patrón en la imagen. Además de cumplir con su diferencia en un entorno cercano, los puntos deben ser únicos a nivel global en la imagen. Si bien esta es una característica deseable por ahorrar tiempo de procesamiento, se pueden eliminar en un paso posterior a la estimación de la altura.

El método descrito por W. Förstner y E. Gülch<sup>12</sup>, comprende las características señaladas, el mismo provee un operador óptimo para la búsqueda de esquinas y lóbulos que cumple con los requisitos para la posterior correlación. Este operador fue aplicado sobre una de las imágenes mediante una implementación provista por la universidad de Bonn<sup>13</sup>.

### Correlación de puntos característicos

Mediante el proceso de correlación cruzada bidimensional normalizada se estima el corrimiento entre una ventana cuadrada perteneciente a la imagen 1 de la cámara A y la imagen 2 de la cámara B. Dicha ventana cuadrada se encuentra centrada en uno de los puntos característicos anteriormente hallados. La diferencia entre el centro de la ventana, en el sistema de coordenadas de la imagen 1 y la posición del máximo de correlación, en la imagen 2, corresponde a un desplazamiento en píxeles ( $\Delta Px$ ) sobre el eje imaginario que comparten las imágenes. En la figura 6 se observa el resultado buscado mediante la correlación de puntos característicos.

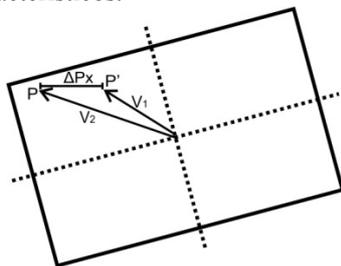


Figura 6. Representación del resultado de la correlación entre dos imágenes.  $V_1$  indica la distancia al centro de la ventana correlacionada en la imagen 1.  $V_2$  la posición del máximo de correlación según la imagen 2.  $\Delta Px$  representa la separación en píxeles entre ambos puntos.

### Cálculo de la CBH

La CBH no cambia significativamente dentro de un rango de 0,5 km.<sup>14</sup> Siendo este caso límite en la detección de nubes altas. Ventanas de correlación de 50x50 píxeles fueron empleadas y a partir del

corrimiento relativo de cada una de ellas, fue calculada una altura por cada punto característico. En una nube alta (~10000 m) el área de esta ventana corresponde a 160.000 m<sup>2</sup> (400x400 m). En caso de ser una nube baja (~1000 m) el área encerrada por esta ventana corresponde aproximadamente a 1600 m<sup>2</sup>.

Se adopta al ángulo  $\alpha_1$  de la ecuación 1, como el perteneciente a la imagen 1. Al ser esta imagen la que es tomada como referencia en el proceso de correlación, su valor es siempre nulo. El valor del ángulo  $\alpha_2$  se calcula a través de  $\Delta Px$  multiplicado por el valor de la constante de apertura, obtenida mediante el proceso de caracterización. Cabe destacar que este ángulo  $\alpha_2$  ahora tiene un valor diferente al esquematizado en la figura 1 llamándose  $\alpha_2'$ . Una vez obtenido su valor y a través de la ecuación 5 se calcula la CBH sobre la ventana evaluada. Este proceso se repite para cada uno de los puntos característicos existentes en la imagen. El resultado final del método es una altura asociada a una serie de ventanas centradas en los puntos característicos hallados para cada imagen.

$$h = \frac{d}{\tan \alpha_2'} \quad (5)$$

### III. ANÁLISIS DE ERRORES

#### Principales fuentes de error

En esta sección se realiza un estudio de las principales fuentes de incerteza que conlleva esta metodología. Durante el desarrollo del método se detectaron cuatro fuentes significativas que introducen un error sistemático en la medición. Debido a la imposibilidad de controlar totalmente sus parámetros asociados se genera una incertidumbre sobre el valor final de la medición de la CBH.

#### Diferencias en la ubicación de los centros ópticos.

Este error sobre el centro óptico se refiere a la diferencia entre el centro real del mapa de bits JPG y el obtenido a través del proceso de caracterización. Esto se observa en la figura 7. Todas las imágenes adquiridas son de 1200x1200 píxeles, siendo el centro real de las mismas 600x600 píxeles.

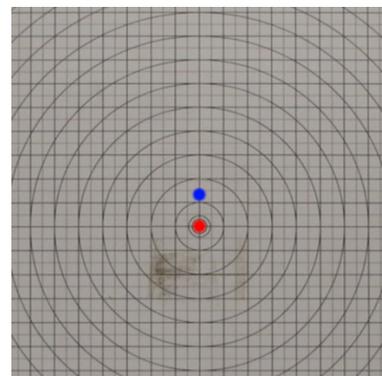


Figura 7. Fragmento central de la imagen tomada durante el proceso de caracterización. Centro óptico de la cámara A (Rojo) y Centro real del mapa de bits (Azul).

La figura 8 representa los diagramas vectoriales de dos fotografías superpuestas. Se representa por el par de ejes en línea llena el centro de las imágenes 1 y 2, cuyo centro es C. En línea punteada se representa el par de ejes correspondientes a una imagen 2', en este caso, con un centro óptico desplazado del real y llamado C'. Los vectores V<sub>1</sub> y V<sub>2</sub> representan las distancias al punto característico P<sub>c</sub> según la imagen 1 y 2 respectivamente. El vector V<sub>2</sub>' pertenece al sistema primado, representando el valor de V<sub>2</sub> al estar afectado por un error V<sub>e</sub>.

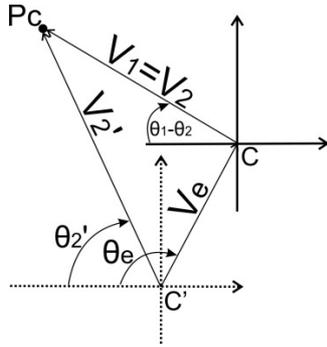


Figura 8. Representación esquemática del error cometido debido a la diferencia en la ubicación de los centros ópticos. C representa la posición real del centro óptico y C' la posición detectada. El error se representa por medio del vector V<sub>e</sub>.

Se considera un punto en el infinito, el cual se encuentra, en la misma posición para ambas imágenes. Haciendo un estudio vectorial del diagrama presentado se puede definir el corrimiento ideal del punto característico P<sub>c</sub> como:

$$\Delta P_x = |V_1|e^{i\theta_1} - |V_2|e^{i\theta_2} \quad (6)$$

Siendo el corrimiento afectado por este error:

$$\Delta P_x' = \Delta P_x + \Delta P_e \quad (7)$$

Donde el término de error  $\Delta P_e$  es:

$$\Delta P_e = -|V_2|e^{i\theta_2} \quad (8)$$

Este error tiene un impacto negativo sobre la estimación de la CBH y debe ser reducido durante la etapa de caracterización. Debido a la precisión de la ubicación del centro óptico a través el haz láser utilizado en el procedimiento de calibración, el mismo es minimizado.

### Rotación relativa entre cámaras

La rotación relativa entre cámaras es producida en la instalación de las cámaras en el exterior y se trata de una falta de alineación de los sensores CMOS de las cámaras. Al quedar los sensores rotados con respecto al eje compartido en un ángulo  $\theta_e$  se produce un corrimiento adicional. En la figura 9 se presenta un diagrama vectorial de dos imágenes superpuestas afectadas por este error. El par de ejes representados en líneas llenas corresponden al centro de la imagen 1 y 2 en su posición ideal. El vector V<sub>1</sub> apunta a la posición de P<sub>c</sub> correspondiente a la imagen 1 y el vector V<sub>2</sub> apunta a P<sub>c</sub>', que es la ubicación del punto P<sub>c</sub> en la imagen 2. La diferencia entre ambos genera un desplazamiento ideal  $\Delta P_x$ . En línea punteada se

representa otro par de ejes de coordenadas, también centrado en C pero rotado con respecto al original según  $\theta_e$ . Este nuevo par de ejes muestra la posición de la imagen 2 cuando se encuentra girada con respecto a la imagen 1. Según este nuevo sistema de coordenadas el punto P<sub>c</sub>' ahora se desplaza hasta el punto P<sub>c</sub>". La nueva posición del punto P<sub>c</sub>' se encuentra representada por el vector V<sub>2</sub>'. Generando entonces un error que se refleja en un desplazamiento  $\Delta P_x'$ . La diferencia entre ambos desplazamientos se denomina  $\Delta P_x e$ .

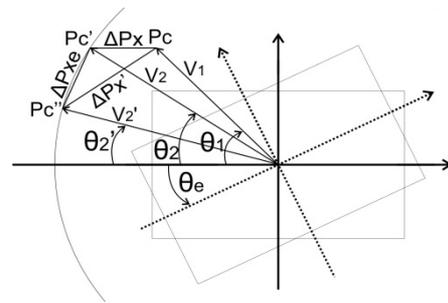


Figura 9. Representación esquemática del error cometido debido a la rotación entre cámaras al momento de armar la toma de imágenes en campo. En línea llena se muestra la posición de los ejes de coordenadas de la imagen 1 y en línea punteada la posición de los ejes de coordenadas de la imagen 2. La rotación relativa entre ambos se cuantifica con el ángulo  $\theta_e$ .

En la ecuación 6 se muestra el valor final de corrimiento del punto P<sub>c</sub>' es afectado por distintas variables.

$$|\Delta P_x| = Z(|V_1|(1 - \cos \theta_e) - |\Delta P_x|(\cos \theta_e)) + Z(|V_1 + \Delta P_x| \sin \theta_e) \quad (9)$$

$|V_1|$ : Responde a la distancia del punto P<sub>c</sub> al centro de la imagen.

$|\Delta P_x|$ : Varía según la altura de la formación nubosa a la que pertenece el punto P<sub>c</sub>.

$\theta_e$ : Error de ángulo relativo.

Este error es corregido digitalmente mediante un proceso de iteraciones sucesivas. Teniendo en cuenta que una formación nubosa generalmente abarca una superficie extensa de la imagen y que mantiene la altura de su base constante para la superficie fotografiada<sup>4</sup>. Este proceso funciona a partir de la exploración de los valores de altura estimados, en distintos puntos P<sub>c</sub>, para distintas rotaciones relativas  $\theta_e$ . Se busca el ángulo de rotación  $\theta_e$  que minimiza la varianza de las alturas obtenidas en el proceso de estimación. Dicho ángulo será tal que  $\theta_c = \theta_e$ .

### Alineación cenital de las cámaras según eje X y eje Y

El error de ajuste de cenit se da en la instalación de las cámaras en el exterior, al realizar la alineación cenital de las cámaras. Este error afecta la imagen de manera compleja, ya que no solo modifica la posición relativa de un punto característico P<sub>c</sub> sino que también ocasiona una compresión/expansión en la representación fotográfica de la base de la cobertura

nubosa.

Debido a la disposición de las cámaras el error afecta significativamente al cálculo cuando se produce sobre el eje que comparten las cámaras. Un error en otra dirección solo deforma la imagen, sin variar la distancia relativa entre puntos característicos.

### Simultaneidad de disparos

Mediante una prueba de sensibilidad se analizó la variación e influencia de un retardo en los disparos de las cámaras para el caso de una nube alta de 12000 m dando como resultado una variación de 3 píxeles en 1,5 segundos, siendo este tiempo el máximo desfase posible entre cámaras.

### Cálculo de incertidumbre

En el cálculo de incertidumbre de la metodología se tuvieron en cuenta los 3 errores más significativos citados anteriormente. En la ecuación 7 se presenta el error absoluto que se provoca en la medición. Donde  $h$  es la altura estimada a partir del desplazamiento relativo entre imágenes sin error ( $\Delta Px$ ) y  $h'$  la altura calculada a partir del desplazamiento con la influencia del error ( $\Delta Px'$ ).

$$u_h = \frac{|h - h'|}{h} \quad (10)$$

El error absoluto en las fuentes mencionadas es considerado una variable aleatoria de distribución rectangular. La incertidumbre final adjudicada a cada medición es calculada según la ecuación 8.<sup>15</sup>

$$(u_{medición})^2 = (u_{CO_1})^2 + (u_{CO_2})^2 + (u_{RR})^2 + (u_{z_1})^2 + (u_{z_2})^2 \quad (11)$$

Los términos  $u_{CO_n}$  corresponden al error ponderado de centro óptico para ambas cámaras. El mismo se define en la ecuación 9.

$$u_{CO_n} = \frac{U_{CO_n}}{k} \quad k = \sqrt{3} \quad (12)$$

El término  $u_{RR}$  es único y corresponde al error de rotación relativa entre imágenes. El mismo se define en la ecuación 10.

$$u_{RR} = \frac{U_{RR}}{k} \quad k = \sqrt{3} \quad (13)$$

Los términos  $u_{z_n}$  corresponden al error de alineación cenital para ambas cámaras. El mismo se define en la ecuación 11.

$$u_{z_n} = \frac{U_{z_n}}{k} \quad k = \sqrt{3} \quad (14)$$

Finalmente la incertidumbre expandida de la medición se define por la ecuación 12:

$$U_{medición} = u_{medición} \cdot k \quad k = \sqrt{2} \quad (15)$$

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el marco de la validación de la metodología propuesta se establecieron mediciones de campo utilizando la configuración experimental descrita en la sección II en el predio de CITEDEF (Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa). Las mediciones han sido contrastadas contra un lidar de retrodispersión elástica que tiene un emisor laser de Neodímio (Nd-YAG) que emite tres longitudes de onda a la atmósfera (1064, 532 y 355 nm)<sup>16</sup>. Las retrodispersiones que producen las moléculas atmosféricas y las partículas presentes que interactúan con el haz laser, son recolectadas con un telescopio de 30 cm de diámetro y un policromador separa las distintas longitudes de onda emitidas para su posterior detección y digitalización. En particular en este trabajo se utilizó la retrodispersión del canal de 532 nm para la detección de la formación nubosa, y se utilizó el cambio en la pendiente de la señal, corregida en rango para la detección de la base de las nubes.

El banco de imágenes obtenido engloba a 12 días en intervalos de 20 minutos entre los meses de Mayo y Octubre de 2014, donde más de 200 pares de imágenes fueron procesadas junto con su contrastación independiente mediante el lidar donde se abarcaron casos de nubes bajas, medias y altas.

A modo de ejemplo se presenta el caso correspondiente al día 30-10-2014 donde en un cierto tiempo  $t$ , se determinó mediante estereoscopia digital una altura media de base de nubes de 1469 m. El método de contrastación independiente en el mismo momento determinó una altura de 1400 m. Este par de imágenes empleadas para dicho resultado, corresponde a un conjunto compuesto por 20 pares en intervalos de 60 segundos. Para correlacionar los valores de altura entregados por el lidar junto con los valores estimados mediante visión estereo se forzó detectar la altura de la cobertura nubosa en una ventana centrada en el centro óptico de las cámaras, siendo esa porción de cielo la misma que mide el haz del láser. La distancia entre la cámara B y la ubicación del lidar es de 5 m. La divergencia del haz láser es 1 mrad.<sup>17</sup>, dando como resultado en 1000 m un radio de cobertura de 1 m y para 10000 m este radio es de 10 m.

Se logró satisfactoriamente determinar la altura de nubes pertenecientes a las tres grandes familias existentes. Nubes bajas (800~3000 m), nubes medias (3000~8000 m) y nubes altas (8000~12000 m)<sup>18,19</sup>.

La tabla 1 expresa el resultado de la medición, en sincronización con el método de contrastación independiente. Para  $t_1$  se observa una altura de 1360 m mientras que para  $t_2$  la altura es de 1400 m. En la figura 10 a) y b) se muestran las 2 imágenes tomadas por las cámaras digitales en el instante  $t_0$ . Luego del acondicionamiento y procesamiento de las mismas, en la figura 10 c) se obtienen los resultados de alturas para

cada ventana centrada en un punto característico. En la figura 11 se presenta la medición de alturas en función del tiempo correspondiente al lidar.

Este mismo procedimiento descrito fue aplicado el día 21-08-2014 donde el caso particular de 2 capas de nubes en el mismo momento se hizo presente. La tabla 2 expresa el resultado de las alturas determinadas mediante visión estéreo en contraste con las alturas determinadas por el lidar. Se logró determinar ambas coberturas nubosas validando la metodología en un escenario complejo. En la figura 12 se presentan los resultados de la CBH en los puntos característicos. La figura 13 presenta el resultado de la medición de alturas correspondiente al lidar.

TABLA 1: CONTRASTE DE LA CBH POR ESTEREOCOPIA DIGITAL CONTRA EL MÉTODO LIDAR PARA EL CASO DE NUBES BAJAS.

Medición	CBH Lidar	CBH Visión Estéreo
t <sub>1</sub>	1360 m	1532 m ± 125 m
t <sub>2</sub>	1360 m	1532 m ± 135 m
t <sub>3</sub>	1400 m	1469 m ± 146 m
t <sub>4</sub>	1420 m	1582 m ± 145 m
t <sub>5</sub>	1400 m	1542 m ± 152 m

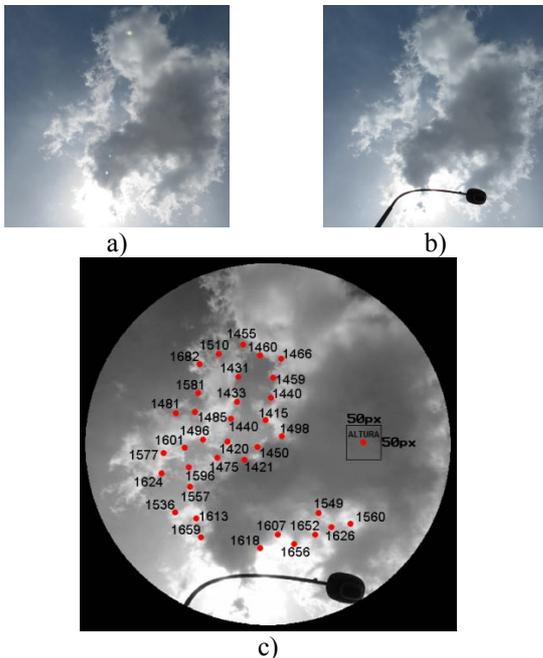


Figura 10. a) Imagen tomada por la cámara A. b) Imagen tomada por la cámara B. c) Resultado del procesamiento del par de imágenes, resultado de la CBH mediante visión estéreo.

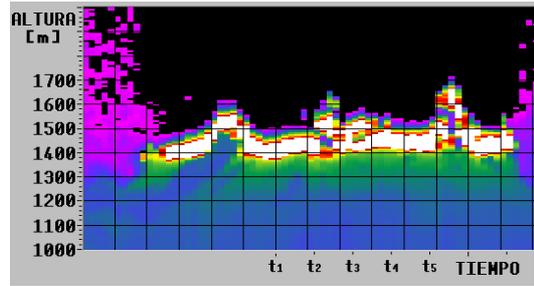


Figura 11. Resultado de la medición por el método LIDAR. Altura en función del tiempo. Los puntos saturados (color blanco y rojo) indican la existencia de una superficie totalmente reflectante correspondientes a una formación nubosa.

TABLA 2: CONTRASTE DE LA CBH POR ESTEREOCOPIA DIGITAL CONTRA EL MÉTODO LIDAR PARA EL CASO DE UNA FORMACIÓN NUBOSA COMPUESTA POR DOS CAPAS.

Medición	CBH Lidar	CBH Visión Estéreo
t <sub>1</sub>	2300 m 3550 m	2512 m ± 672 m 3283 m ± 462 m
t <sub>2</sub>	2410 m 3480 m	2765 m ± 388 m 3497 m ± 517 m
t <sub>3</sub>	2600 m 3500 m	2880 m ± 410 m 3440 m ± 510 m
t <sub>4</sub>	2350 m 3500 m	2714 m ± 362 m 3494 m ± 546 m
t <sub>5</sub>	2580 m 3500 m	2609 m ± 339 m 3418 m ± 516 m

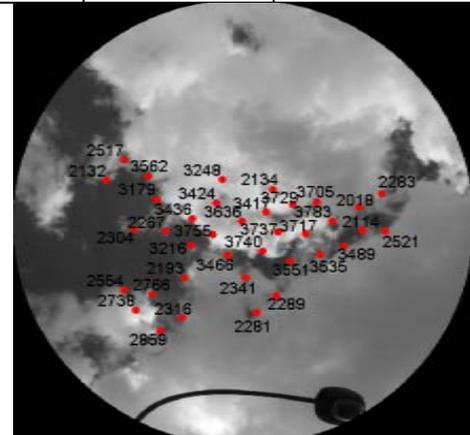


Figura 12. Resultado del procesamiento del par de imágenes con una formación nubosa de dos capas, ambas de la familia de nubes bajas y el valor de la CBH mediante visión estéreo.

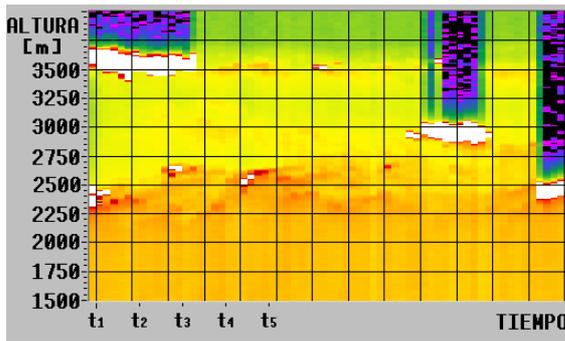


Figura 13. Resultado de la medición de altura por el método LIDAR en función del tiempo para formación nubosa de 2 capas. Los puntos saturados (color blanco y rojo) indican la existencia de una superficie totalmente reflectante correspondientes a una formación nubosa.

En la figura 14 se observa un histograma de este caso particular donde se muestra la distribución de alturas de cada una de las ventanas centradas en los puntos característicos, habiendo dos picos máximos de concentración de alturas alrededor de 2300 m y 3400 m.

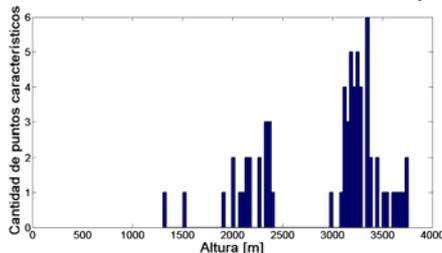


Figura 14. Representación en forma de histograma del valor de la CBH para los distintos puntos hallados en una imagen con una formación nubosa de dos capas.

Debido al mecanismo en que el algoritmo Förstner-Gülch encuentra los puntos característicos de la cobertura nubosa, estos son generalmente los bordes de la misma. Alrededor de esos puntos se forma la ventana de correlación la cual muchas veces tiene gran porcentaje de cielo descubierto. Así mismo estos bordes son termodinámicamente inestables no siendo en todos los casos representativos de la CBH introduciendo una mayor variabilidad a nuestra estimación.

La configuración experimental adoptada y el proceso de calibración restringen el nivel de ajuste de los parámetros de control a cierta incertidumbre. Para la caracterización del centro óptico por medio del haz láser y banco XYZ micrométrico se fijó una exactitud de  $\pm 0,5$  píxeles tanto en el eje x como en el eje y. Este error fue acotado mediante la realización de sucesivas pruebas de sensibilidad evaluando el error cometido. La sensibilidad del método de corrección del error de rotación relativa entre cámaras mediante el procesamiento digital también fue evaluada empíricamente en laboratorio y en pruebas de campo, determinando un límite de corrección de  $\pm 0,5^\circ$ . El error de alineación cenital de las cámaras deriva de la exactitud del elemento de nivelación, en este caso un nivel de burbuja de 50cm de largo fue empleado. El

mismo indica una exactitud de  $4 \frac{\text{mm}}{\text{metro}}$ , correspondiendo a un  $\theta_e = \pm 0,23^\circ$ .

La incertidumbre expandida obtenida, correspondiente a nuestro sistema experimental y proceso de calibración, se traduce en una banda de error para cada altura medida. La misma es de 38% para la familia de nubes altas, 13% para la familia de nubes medias y 8% para la familia de nubes bajas.

Finalmente en la figura 15, se resumen todos los casos contrastados y sincronizados con el sistema independiente lidar hasta 4000 m.

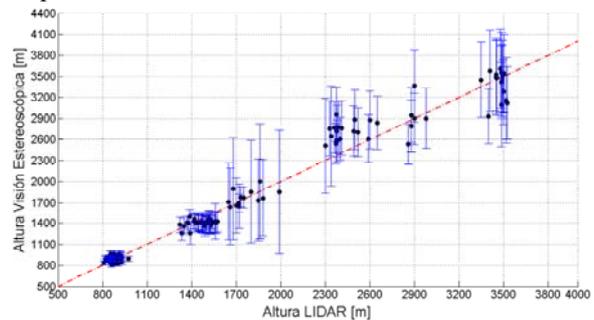


Figura 15. Diagrama de dispersión de alturas obtenidas mediante visión estereoscópica en contraste con el método lidar para nubes bajas y medias (hasta 4000 m.). Los puntos representan el valor obtenido y las líneas de cota vertical la incertidumbre asociada.

Se pudo determinar exitosamente la CBH en distintos casos pertenecientes a las 3 familias de nubes mediante el sistema experimental de visión estereoscópica. La comparación con el sistema lidar muestra que la gran mayoría de los puntos de los casos de comparación junto con su banda de error se encuentra en el entorno de la recta unidad. En la tabla 3 se resumen los resultados del día 28-10-2014 correspondientes a un caso de nubes altas.

TABLA 3: CONTRASTE DE LA CBH POR ESTEREOSCOPIA DIGITAL CONTRA EL MÉTODO LIDAR PARA EL CASO DE NUBES ALTAS.

Medición	CBH Lidar	CBH Visión Estéreo
t <sub>1</sub>	11150 m	8447 m $\pm$ 2761 m
t <sub>2</sub>	11120 m	9720 m $\pm$ 3523 m
t <sub>3</sub>	11100 m	10221 m $\pm$ 3793 m
t <sub>4</sub>	10880 m	8846 m $\pm$ 3113 m
t <sub>5</sub>	10770 m	9506 m $\pm$ 3511 m
t <sub>6</sub>	10700 m	9850 m $\pm$ 4297 m
t <sub>7</sub>	10500 m	9001 m $\pm$ 3746 m
t <sub>8</sub>	10800 m	8286 m $\pm$ 3738 m

$t_9$	10710 m	8260 m $\pm$ 3384 m
$t_{10}$	10580 m	10020 m $\pm$ 3659 m

Debido al error cometido por el método empleando una distancia entre cámaras de 100 m para la familia de nubes altas (>8000 m) los resultados obtenidos están en correlación con lo esperado.

## V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En el presente trabajo se estableció un protocolo experimental para la determinación de la altura de base de nubes, se determinó una metodología para la caracterización del equipo empleado, un protocolo de toma de imágenes en el exterior para la generación de un banco de imágenes y se desarrolló una serie de algoritmos de procesamiento de imágenes que constan de la selección de puntos de interés, la correlación bidimensional de dichos puntos para obtener el desplazamiento entre imágenes y finalmente el cálculo de la CBH a través de la constante de calibración hallada anteriormente.

Se determinó la altura de la familia de nubes bajas con un nivel de coincidencia contra un método independiente con un 82% de eficiencia. Se hizo un análisis de los errores de las fuentes características de incerteza del método y se pudo contrastar el funcionamiento mediante un método independiente de medición de la CBH. La sincronización en la toma de imágenes resultó ser un punto crítico pese a que se estableció un protocolo de control de disparos entre operadores. Es altamente recomendable diseñar un sistema de disparo automatizado y reemplazar las cámaras digitales por un conjunto que permita dicha función. Se planifica ampliar el presente trabajo y continuar con la toma sistemática de imágenes para establecer una base de datos de todos los posibles casos de nubes y analizar situaciones particulares de capas de nubes de distinta altura presentes simultáneamente en las imágenes. Primeramente se buscara implementar un algoritmo de auto alineación de las cámaras mediante estrellas brillantes<sup>20</sup> para disminuir la incertidumbre debido al montaje del sistema, principalmente el error producto de la alineación cenital. También se evaluará la posibilidad de usar múltiples distancias de separación entre cámaras empleando 3 cámaras digitales para adecuar la medición según el caso y minimizar la banda de error.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva SECTIP (FRBA/UTN) así como también a la Secretaría de Asuntos Estudiantiles SAE FRBA y Rectorado UTN por la beca de estudio a parte de los miembros del presente proyecto. A toda la cátedra de Proyecto Final integrada por Sebastián Verrastro, Ignacio Camba, Daniel José Abate y Pablo Sanchez por el apoyo y el seguimiento del mismo. Además queremos agradecer a los miembros de la División Lidar del CEILAP, en especial a Pablo Ristori y Sebastián Papandrea por la operación del lidar y los datos adquiridos que fueron

utilizados en este trabajo para la validación de la metodología. A Raúl D'Elia por el soporte y suministro de instrumental para el desarrollo de múltiples experiencias y a los revisores del presente trabajo, cuyos comentarios ayudaron a mejorarlo.

## VII. REFERENCIAS

- 1- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Bernsten, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on C limate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (2007).
- 2- V. Eyring, T. G. Shepherd, D. W. Waugh (Eds.), *SPARC CCMVal, SPARC Report No.5, WCRP-132, WMO/TD-No.26*, (2010).
- 3- J. Calbó, D. Pagès, J.-A. Gonzáles, *Reviews of Geophysics*, 43th ed, RG2002, doi:10.1029/2004RG000155. American Geophysical Union, (2005).
- 4- A.P. Cracknell, L. "Hayes, *Introduction to Remote Sensing*", second ed., Taylor & Francis, (2007).
- 5- M.C. Allmen, W.P. Kegelmeyer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, pp. 97–113, (1996).
- 6- F.M. Janeiro, P.M. Ramos, F. Wagner, A.M. Silva, *Measurement*. Elsevier. Volume 43, Issue 5, pp. 684–689, (2010).
- 7- G. Seiz, E.P. Baltsavias, A. Gruen, *Engineering & Remote Sensing Vol. 68*. Hoenggerberg, 8093 Zuerich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, sec. 9, pp. 941–951 (2002).
- 8- F.M. Janeiro, F. Carretas, K. Kandler, F. Wagne, P.M. Ramos, *Measurement*. Elsevier, Volume 51, pp. 429-440 (2014).
- 9- C. Koppe, "Photogrammetrie und Internationale Wolkenmessung". Braunschweig, Germany: Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, (1896).
- 10- Canon, "PowerShot SX40HS Camera User Guide and Manual". Canon Inc. (2011).
- 11- SHARP Corporation, "GP2Y0A21YK0F Distance Measuring Sensor Unit". Sheet No.: E4-A00201EN. (2006).
- 12- W. Förstner, E. Gülch, Interlaken, Germany: ISPRS Intercomission Workshop, (1987).
- 13- M. Luxen, "Interest Point Detector by Förstner Gülch (Förstner-Operator)". Bonn, Germany: Department of Photogrammetry, Institute of Geodesy and Geoinformation. (2010).
- 14- E. Kassianov, C.N. Long, J. Christy, *American Meteorological Society*, pp 1221-1233, (2005).
- 15- JCGM, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement" in 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. JCGM (2008).

16- L.A. Otero, P. Ristori, J. Fochesatto, E. Wolfram, J. Porteneuve, P.H. Flamant, E. Quel, 22nd International Laser Radar Conference. European Space Agency, ESA SP 561, II, pp. 769-773, (2004).

17- Continuum, "Surelite I-30". Flashlamp Pumped Nd:YAG Datasheet. California, USA: Continuum lasers.

18- Secretariat of the World Meteorological Organization, "Manual on the Observation of Clouds and other Meteors". Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, No. 407, vol. 1, pp. 9-48, (1975).

19- Secretariat of the World Meteorological Organization, "WMO International Cloud Atlas", Volume I and II, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, (1987).

20- R. Kataoka, K. Shiokawa, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, pp. 1543-1548, (2013).