

## PROYECTO DE UN SISTEMA LIDAR TROPOSFÉRICO EN COCHABAMBA, BOLIVIA

Omar Ormachea, Oscar Urquidí, Oscar Claire, Alejandro Durandal, Joseth Yavé,  
Gonzalo Conde y Andrea Cruz

Centro de Investigaciones Ópticas - CIO  
Universidad Privada Boliviana  
oormachea@upb.edu

(Recibido el 25 de octubre 2010, aceptado para publicación el 17 de diciembre 2010)

### RESUMEN

En el presente artículo se presenta los avances en la construcción de un sistema LIDAR monostático coaxial para el estudio de las partículas contaminantes existentes en la capa troposférica sobre la ciudad de Cochabamba – Bolivia y que son producto de la actividad agraria en regiones aledañas, muy intensas principalmente en época seca de poca lluvia y que empañan completamente el cielo. El proceso de construcción de este sistema ha incluido el diseño, ajuste y prueba de la óptica de envío y recolección de la luz láser retrodispersada. El sistema usa dos láseres continuos semiconductores de longitudes de onda  $\lambda=655$  nm y  $\lambda=532$  nm, un telescopio newtoniano de 114mm de diámetro y 1 metro de distancia focal y una cámara digital Canon Xsi como sensor óptico.

**Palabras Clave:** Láseres, Opto-Electrónica, Espectroscopia.

### 1. INTRODUCCION

El estudio del problema de la contaminación del aire se ha convertido en un tema de gran interés a nivel mundial, que comprende investigaciones teóricas y aplicadas así como el desarrollo de nuevas tecnologías [1]. Una de las razones principales es que en las últimas décadas, grandes campañas de mediciones realizadas desde la tierra y el espacio han demostrado que la actividad humana está cambiando la composición de la atmósfera. Problemas como la eliminación del ozono estratosférico, la lluvia ácida, el incremento de concentraciones de gases que generan el efecto invernadero y la deterioración de la calidad del aire, son indicadores de cómo la atmósfera está cambiando rápidamente.

En Bolivia, el problema crece rápidamente. Cada año, la continua quema de áreas forestales y pastizales generan una gran cantidad de partículas contaminantes, que si bien no son registradas científicamente, generan una clara deterioración en la calidad del aire afectando directamente la salud de la ciudadanía [4], [5].

Las técnicas de medición remota con láseres han ido ganando una alta aceptación como sistemas de medición de alto rango no invasivas de la composición química y de las propiedades físicas de la atmósfera. La detección y el análisis de las señales LIDAR (un acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*) recibidas permiten medir las concentraciones relativas de partículas de aerosol suspendidas, así como la concentración absoluta de muchos contaminantes del aire (i.e. O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>), con altas resoluciones temporales y espaciales (1 min y 3,75 m, respectivamente) a lo largo del rayo láser [2]. Para las mediciones de los gases y aerosoles suspendidos, se utilizan la extinción de la luz láser, la retro dispersión elástica e inelástica (Raman) [3].

La tecnología LIDAR es considerada como un sistema costoso en términos económicos debido a sus exigencias tecnológicas. Sin embargo, este tipo de sistemas ha sido desarrollado e implementado activamente en los últimos años a lo largo de América Latina [6], [7], [8]. En Cochabamba, Bolivia, miembros del capítulo estudiantil de la OSA en el centro de investigaciones ópticas de la Universidad Privada Boliviana, han comenzado el desarrollo de un sistema LIDAR que permitirá el monitoreo y estudio de la presencia de partículas contaminantes suspendidas en la capa troposférica. De esta manera, la información obtenida con este sistema, ayudará a cuantificar el daño medioambiental en la región. Este trabajo presenta la primera etapa de desarrollo de un sistema LIDAR.

### 2. MOTIVACION Y OBJETIVOS

El Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad Privada Boliviana dentro de sus líneas de investigación, tiene como prioridad el desarrollo de tecnología láser para diferentes aplicaciones. Una de las aéreas identificadas como prioritarias es el de monitoreo atmosférico, debido a que en Bolivia y, en especial, en Cochabamba, en la época seca del año se tiene una intensa quema de aéreas forestales y pastizales. En esta época crítica, debido a la a la gran polución de la atmósfera, existen actualmente instituciones que realizan la medición de esta contaminación, sin embargo, la toma de medidas experimentales se hace sólo a nivel superficial, siendo muy difícil la toma de muestras a cierta altura.

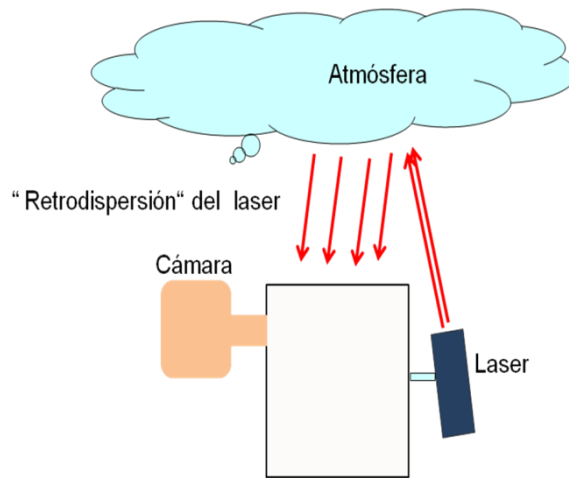
Las consideraciones anteriores han motivado la realización de la presente investigación, cuyo objetivo es el diseño y construcción de un sistema LIDAR troposférico, elemento basado en un telescopio, un sistema de captación de datos ópticos y un láser pulsado.

### 3. DESCRIPCION DEL SISTEMA

En este párrafo, se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento de los sistemas LIDAR.

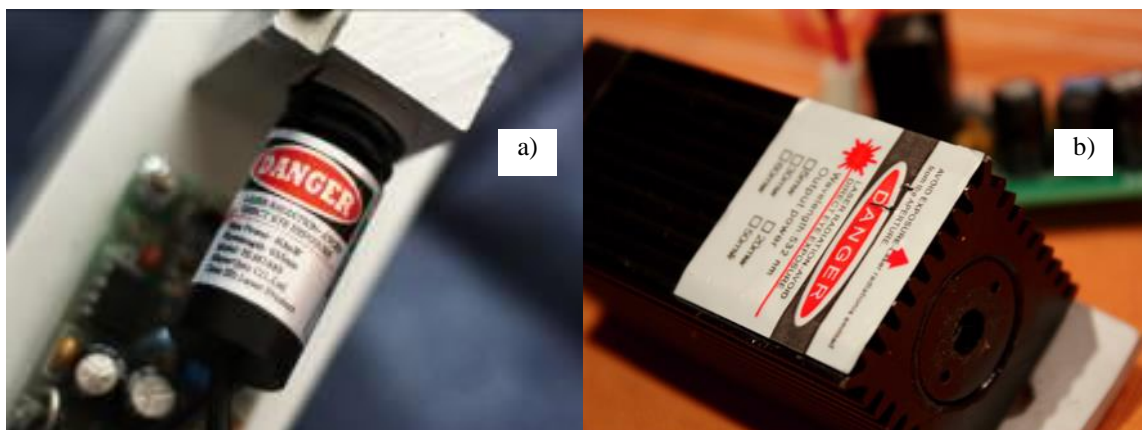
#### ▪ Principio de funcionamiento de un LIDAR

En general, la tecnología LIDAR tiene aplicaciones en geología, sismología y física de la atmósfera. Un sistema LIDAR consiste principalmente de un láser, un telescopio y un sensor el cual generalmente es fotomultiplicador de alta resolución, Figura 1.



**Figura 1** – Diagrama de un sistema LIDAR.

La radiación coherente de alta intensidad emitida por el láser, es enviada a la atmósfera, posteriormente, esta radiación es retrodispersada por los elementos coloidales suspendidos en la atmósfera (polvo, humo, etc.) hacia la Tierra y es recolectada por un telescopio, esta señal óptica es enviada al fotomultiplicador donde se digitaliza y procesa finalmente. La información obtenida por un sistema LIDAR, permite obtener información cuantitativa de las características de los elementos coloidales suspendidos en la atmósfera (por ejemplo su concentración).



**Figura 2** – Láseres semiconductores de: a) 80 mW,  $\lambda=655$  nm, b) 30 mW,  $\lambda=532$  nm.

Para la primera etapa de desarrollo, consistente en el alineamiento óptico y la detección de la señal laser, se utilizaron los siguientes equipos: Como fuentes de luz se usaron dos diferentes láseres continuos de Hlaser Opto CO. Ltd. El primer laser emite en una longitud de onda de  $\lambda=655$  nm y 80 mW de potencia máxima, y el segundo laser emite en una longitud de onda de  $\lambda=532$  nm y tiene una potencia máxima de 30 mW, Figura 2.

Para el sistema de recolección de fotones se usó un telescopio newtoniano de 114 mm de diámetro y 1 m de distancia focal. Para la detección se utilizó una cámara Réflex Canon modelo XSI de 12 Mp y un espectrómetro de construcción propia con una rejilla de difracción de 500 líneas/mm. La Figura 3 muestra el láser y la cámara montados en el telescopio y listos para las primeras pruebas.



**Figura 3** – Láser y cámara montados en el telescopio.

Para asegurar la detección de la luz láser con el telescopio, el láser fue montado encima del telescopio en una montura posicionable. La cámara fue montada directamente en el porta-oculares del telescopio usando un adaptador T-ring. La rejilla de difracción fue ubicada en el adaptador y se posicionó entre el telescopio y el sensor de la cámara. La Figura 4 muestra el adaptador de la cámara con la rejilla de difracción montada.



**Figura 4** – Adaptador con la rejilla de difracción montada.

El análisis de los datos, el procesamiento de las imágenes y los espectros fue realizado en los programas: Photoshop, iris, y vspec.

#### 4. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Para asegurar que la señal recibida fuera correctamente identificada, se calibró el espectrómetro simple usando un espectro conocido. Para ello, se usó el espectro conocido de una lámpara de sodio de alta presión. El sistema fue apuntado a una lámpara de sodio distante y se obtuvo su espectro. La figura 5 muestra la imagen del espectro de difracción de primer orden de la lámpara de sodio.

Para poder usar el espectro después, la imagen fue procesada en el programa IRIS, formando una nueva y mejor imagen del espectro. El espectro que se muestra en la Figura 6 fue después procesado en el programa Vspec para obtener el gráfico de intensidades y longitudes de onda. EL espectro fue calibrado por comparación utilizando el espectro de la lámpara de sodio encontrado en fuentes bibliográficas.

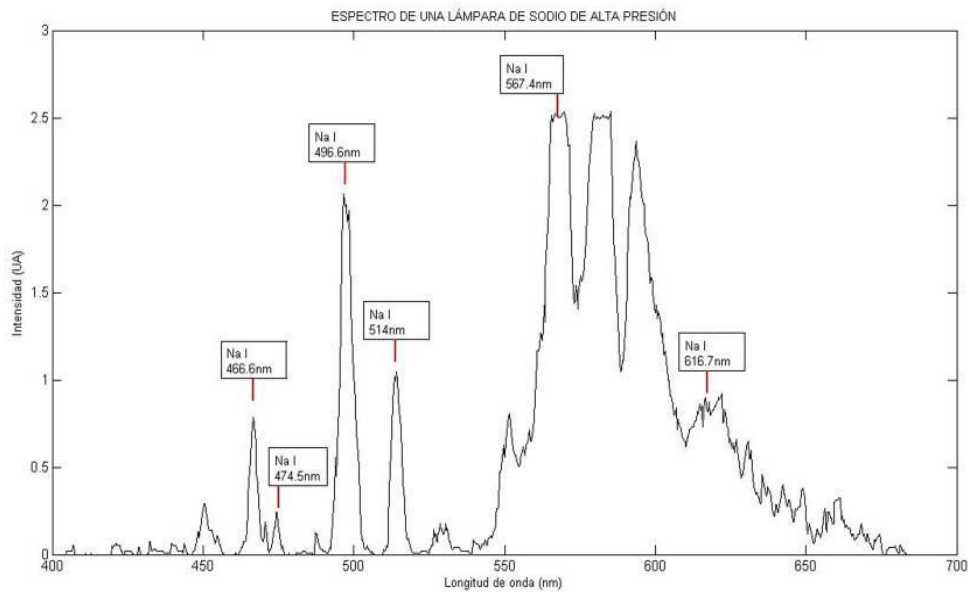


**Figura 5** – Imagen de la lámpara de sodio y su espectro de difracción de primer orden.

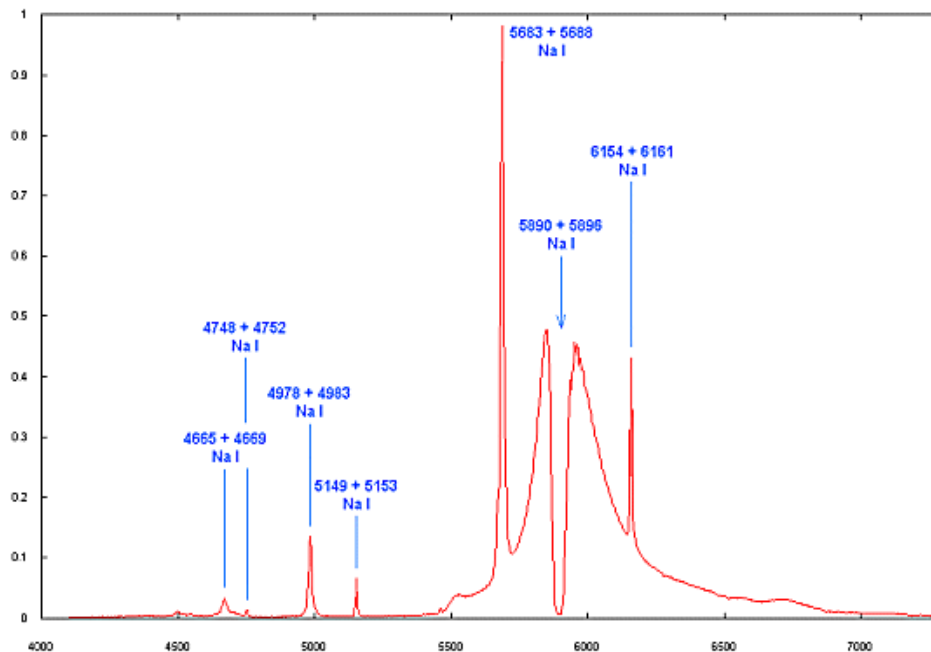


**Figura 6** – Espectro procesado en IRIS.

Después de la calibración, el espectro mostró gran coincidencia en todas sus líneas. La Figura 7 muestra el espectro de la lámpara de sodio obtenido con el sistema y la Figura 8 muestra el espectro ya conocido.



**Figura 7** – Espectro de la lámpara de sodio obtenida con el sistema.



**Figura 8** – Espectro conocido de la lámpara de sodio.

Al final del proceso de calibración, se obtuvo una relación entre las distancias (en píxeles) de la fuente luminosa a cualquier línea espectral (horizontalmente) y la longitud de onda.

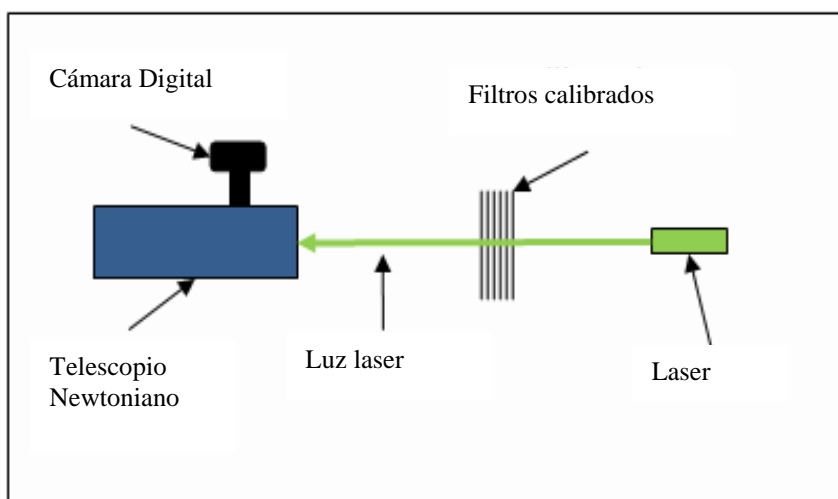
Para medir la potencia de la luz láser retro dispersada, se usó un método de comparación. Como se muestra en la Figura 9, la potencia de comparación se obtuvo apuntando el láser directamente hacia el telescopio, posicionando varios filtros calibrados de transmitancia conocida entre el rayo láser y el telescopio. Se tomaron imágenes con la cámara, usando los mismos parámetros que se consideraron para tomar las imágenes de la luz retro dispersada en la atmósfera.



**Figura 9** – Rayo láser apuntando directamente al telescopio.

Se repitió este proceso usando la combinación de distintos filtros sobrepuestos hasta alcanzar una similitud con las imágenes obtenidas de la luz retro dispersada.

En la Figura 10 se muestra un diagrama de la configuración del sistema usado para simular la luz retro-dispersada y así obtener su potencia por comparación.



**Figura 10** – Configuración del sistema de medición de potencia.

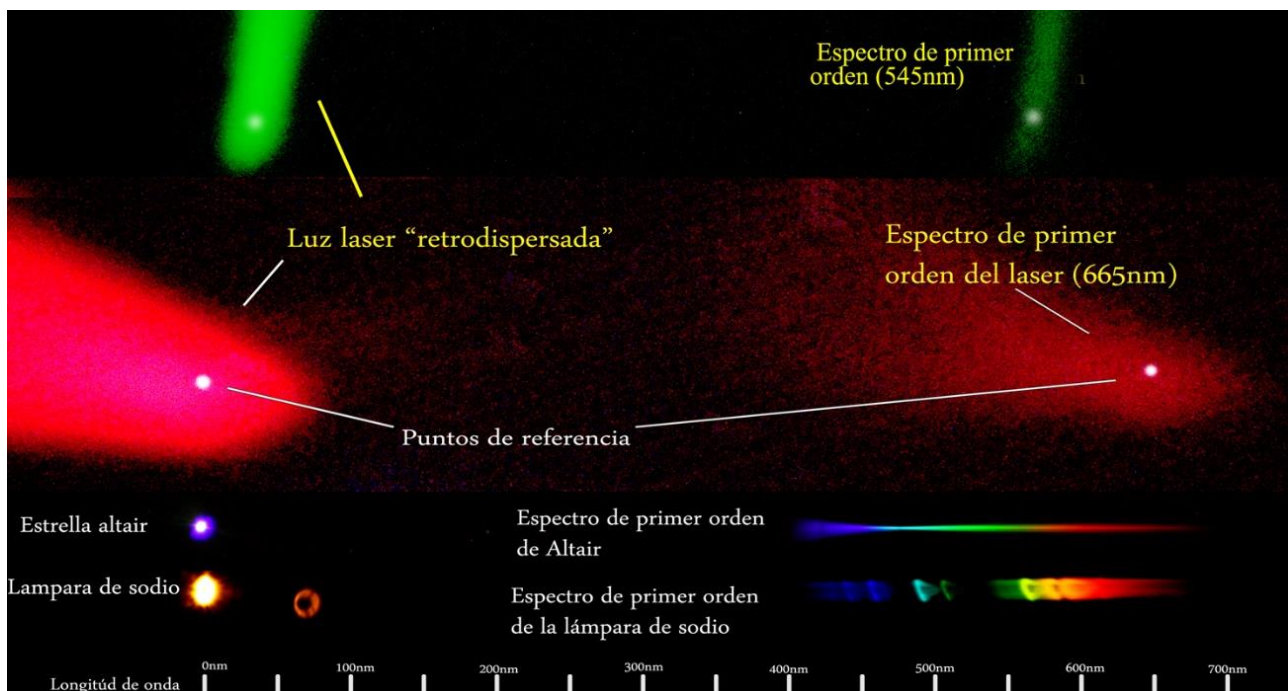
La transmitancia de los filtros mostrados en la Figura 11 es de 0.21% para cada filtro, teniendo una espectro de transmisión bastante homogéneo.



**Figura 11** – Filtros usados en la medición de potencia de la luz retro dispersada

## 5. RESULTADOS

Una vez montado y calibrado el sistema, se realizaron las primeras pruebas. Se obtuvieron imágenes de la luz retro-dispersada, de 4 segundos de exposición y a un *iso* de 1600. Con estas imágenes se pudo comprobar que la señal laser fue recibida y detectada. La Figura 12 muestra, en la parte superior, la luz retro-dispersada de los láseres de 532nm (verde) y 655nm (rojo) y su respectivo espectro de difracción de primer orden a la derecha



**Figura 12** – Imágenes de la luz láser retro dispersada, la estrella Altaír y una lámpara de sodio. Cada uno con su espectro de difracción de primer orden a la derecha.

Para obtener la distancia en píxeles entre el espectro de primer orden y la fuente, se usó un patrón de forma para marcar dos puntos de referencia. Estos puntos se marcaron ajustando de la mejor forma posible el patrón de forma con la forma del espectro. Luego, esta distancia fue medida en píxeles para obtener la respectiva longitud de onda. La longitud de onda de la señal laser recibida para el *primer laser* (verde) fue de  $545 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$  de acuerdo a nuestro sistema de medición, siendo  $532 \text{ nm}$  el valor nominal de la longitud de onda de este laser. La longitud de onda de la señal laser recibida para el *segundo laser* (rojo) fue de  $665 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$  de acuerdo a nuestro sistema de medición, siendo  $655 \text{ nm}$  el valor nominal de la longitud de onda de este laser.

Usando el método de comparación entre las imágenes de la luz retro-dispersada y las imágenes de la luz láser apuntando directamente al telescopio con la atenuación de varios filtros, se determinó que la potencia de la luz láser de 655nm retro-dispersada en la atmósfera era de 2.8nW; siendo 80mW la máxima potencia de salida de este laser. La potencia de la luz láser de 532nm retro-dispersada en la atmósfera fue de 1.05nW, cuando la máxima potencia de salida de este laser era de 30mW.

## 6. CONCLUSIONES

Se logró avanzar en las primeras etapas de desarrollo de un LIDAR básico, compuesto por un telescopio newtoniano, un láser semiconductor continuo y una cámara digital con funciones de exposición manuales, como el sensor óptico.

El procesamiento y análisis de las imágenes usando programas especializados en espectrometría estelar, permitió la identificación de las señales laser retro-dispersadas en la atmósfera para los dos láseres usados en las pruebas. Para el primer laser (verde) se midió una longitud de onda de 545 nm  $\pm$ 10 nm y 1.05 nW de potencia (siendo 532 nm y 30 mW los valores nominales de láser, respectivamente). Para el segundo laser (rojo), se midió una longitud de onda de 665 nm  $\pm$ 10 nm y 2.8nW de potencia (siendo 665 nm y 80 mW los valores nominales de láser, respectivamente).

Este trabajo fue presentado en la VII Reunión Iberoamericana de Óptica / X Encuentro Latinoamericano de Óptica, Láseres y Aplicaciones (RIAO/OPTILAS 2010) en fechas 20-24 de septiembre

## 7. PERSPECTIVAS

Dados los resultados obtenidos en este trabajo, es posible continuar con el desarrollo de un sistema LIDAR completo y más avanzado.

Se tiene previsto la implementación de un láser YAG:Nd<sup>+++</sup> de construcción propia. Este laser es usado en el modo de Q-switch con una intensidad aproximada de 10 MW/cm<sup>2</sup> en su principal armónica y usando un cristal de litio niobato (LiNbO<sub>3</sub>) se puede obtener la segunda armónica (SHG) 532 nm, que corresponde a la longitud de onda que será utilizada en los siguientes pasos de este proyecto.

Con la adquisición de equipo más especializado (fotomultiplicador) y el desarrollo del sistema de adquisición de datos, se podría tener en un corto tiempo un sistema LIDAR operando en nuestra ciudad.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Georgoussis et al. "Monitoring of air pollution and atmospheric parameters using a mobile backscatter lidar system." *Optica pura y aplicada*, vol. 39, pp. 35 – 41, 2006.
- [2] D. Aglio et al. "Development of a Ti:Sapphire DIAL system for pollutant monitoring and meteorological applications." *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 37, pp. 233 – 244, 2002.
- [3] D. Whiteman. "Examination of the traditional Raman lidar technique I. Evaluating the temperature-dependent lidar equations." *Applied Optic*, vol. 42, pp. 2571 – 2592, 2003.
- [4] M. Andrade. "Mitos y verdades acerca del cambio climatico en Bolivia." *Revista Boliviana de Física*, vol.14, pp. 42 – 49, 2008.
- [5] M. Andrade and L. "Blacutt. Evaluación del modelo climático regional precis para el área de bolivia: comparación con datos de superficie." *Revista Boliviana de Física*, vol. 16, pp. 1 – 12, 2010.
- [6] E. Montulla et al. "Tropospheric lidar system project in Cali Colombia." *Optica pura y aplicada*, vol. 39, pp. 29 – 34, 2006.
- [7] L. Otero et al. "Aerosol optical properties by means of a sunphotometer and LIDAR system in Buenos Aires Argentina." *Optica pura y aplicada*, vol. 39, pp. 43 – 47, 2006.
- [8] J.C. Antuña and B. Barja. "Propiedades Ópticas de Nubes Cirros Medidas con Lidar en Camagüey, Cuba." *Optica pura y aplicada*, vol. 39, pp. 11 – 16, 2006.