

PUESTA EN MARCHA DE UNA NUEVA ESTACIÓN DE MONITOREO CLIMÁTICO EN LOS ANDES CENTRALES DE BOLIVIA: LA ESTACIÓN GAW/CHACALTAYA

SET TO WORK OF A NEW CLIMATE MONITORING STATION IN THE CENTRAL ANDES OF BOLIVIA: THE GAW/CHACALTAYA STATION

M. ANDRADE¹, F. ZARATTI¹, R. FORNO¹, R. GUTIÉRREZ¹, I. MORENO¹, F. VELARDE¹, F. ÁVILA¹, M. ROCA¹, M. F. SÁNCHEZ¹, P. LAJ², J. L. JAFFREZO², P. GINOT^{3,2}, K. SELLEGRI⁴, M. RAMONET⁵, O. LAURENT⁵, K. WEINHOLD⁶, A. WIEDENSOHLER⁶, R. KREJCI⁷, P. BONASONI⁸, P. CRISTOFANELLI⁸, D. WHITEMAN⁹, F. VIMEUX^{10,11}, A. DOMMERGUE², & O. MAGAND²

¹ Laboratorio de Física de la Atmósfera, Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés

² Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), CNRS-UJF, Grenoble, Francia

³ Observatoire des Sciences de l'Univers (OSUG), IRD–CNRS–UJF, Grenoble, Francia

⁴ Laboratoire de Météorologie Physique, CNRS–UBP, Clermont–Ferrand, Francia

⁵ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), Unité Mixte de Recherche (CEA–CNRS–UVSQ), Gif–sur–Yvette, Francia

⁶ Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS), Alemania

⁷ Department of Environmental science and analytical Chemistry (ACES), Stockholm University, Suecia

⁸ Institute of Atmospheric Sciences and Climate, CNR, Bologna, Italia

⁹ Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, Estados Unidos

¹⁰ Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire HydroSciences Montpellier, Unité Mixte de Recherche (IRD, CNRS, UM1, UM2), Montpellier, Francia

¹¹ Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Unité Mixte de Recherche (CEA, CNRS, UVSQ), Gif–sur–Yvette, Francia

(Recibido 9 de Febrero de 2015; aceptado 7 de Mayo de 2015)

RESUMEN

En diciembre 2011 se estableció una nueva estación regional (CHC/GAW por su nombre corto) de la red *Global Atmosphere Watch* parte de la *World Meteorological Organization* (WMO) en el Monte Chacaltaya (5400 m snm). El objetivo de ésta es monitorear la composición atmosférica de la región, principalmente gases de efecto invernadero, gases reactivos y material particulado, con el fin de estudiar el transporte de estos elementos hacia la troposfera media y hacia (y de la) la troposfera libre. Para este propósito un consorcio de instituciones europeas y americanas instaló un conjunto de instrumentos en dependencias del Laboratorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) en La Paz, Bolivia. Desde su puesta en marcha CHC/GAW ha funcionado casi continuamente hasta la fecha con pocas interrupciones casi todas relacionadas a descargas eléctricas. Los primeros resultados, correspondientes a los años 2012–2013, son reportados en el presente documento. El transporte de material particulado, producto de la quema de biomasa vegetal, es claramente visible en los datos adquiridos en ese periodo.

Asimismo, el efecto de la contaminación producida en la región metropolitana de La Paz, relativamente cercana a la estación aunque a mucha menor altura, es claramente observado en los datos diarios y promedios temporales más largos. Esos datos sugieren que la estación está en la troposfera libre, especialmente durante la noche, mientras que durante el día es muy común que la advección de aire caliente, debido al calentamiento de la superficie y el incremento de procesos turbulentos, permitan el transporte de material particulado y gases hacia Chacaltaya a través del crecimiento de la capa límite planetaria. Un comportamiento asociado a las temporadas seca y húmeda, es también evidente en los datos.

Código(s) PACS: 92.60.-e — 92.60.hf — 01.52.+r

Descriptores: Propiedades y dinámica de la atmósfera — Composición, química y transporte de constituyentes de la troposfera — Instalaciones de laboratorio nacionales e internacionales

ABSTRACT

A new regional station (CHC/GAW for short) of the *Global Atmosphere Watch*, which is part of the *World Meteorological Organization* (WMO), was set to work in December 2011 at mount Chacaltaya (5400 masl). The purpose of this station is to monitor the atmospheric composition of the region, especially the greenhouse effect gases, reactive gases and particle

material which is carried to the medium troposphere and to (or from the) free troposphere. To this purpose, a consortium of European and American institutions set up various instruments in the Cosmic Ray Laboratory (Institute of Physical Investigations, Universidad Mayor de San Andrés, UMSA, La Paz, Bolivia). From its set to work up to now the CHC/GAW has worked continuously with few interruptions, almost all of them related to lightnings. The first results corresponding to the 2012–2013 period are reported in this document. The transport of particle material (which results from the burning of vegetal biomass) is clearly visible from the data.

The effect of pollution produced in the metropolitan region of La Paz (which is near to the station but at a much less altitude) is also clearly visible in the daily data and in longer time averages. These data suggest that the station is located in the free troposphere, especially at night, while during day time the advection of hot air (due to the warming of the surface and to the increase of turbulent processes) carry particle material and gases to Chacaltaya due to the enhancement of the planet boundary layer. A behavior associated to the dry and humid seasons is also evident in the data.

Subject headings: Properties and dynamics of the atmosphere — Tropospheric composition and chemistry, constituent transport and chemistry — National and international laboratory facilities

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo de diferentes componentes atmosféricos, tanto de origen natural como antrópico, ha concitado el interés de la comunidad científica y de tomadores de decisión en América en los últimos años. Cambios en la calidad del aire, a raíz del crecimiento demográfico e industrial así como del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, han resaltado la importancia del monitoreo de la atmósfera en una perspectiva temporal de varias décadas a fin de establecer posibles cambios en su composición y las causas de los mismos. Sin embargo, en los Andes existen muy pocas estaciones que estudien la atmósfera de forma continua y permanente. Por ejemplo la red *Global Atmosphere Watch* de la Organización Meteorológica Mundial reporta en su sitio web <http://gaw.empa.ch/gawsis>¹ un reducido número de estaciones que se hallan **funcionando** en la región, especialmente en la zona central de los Andes.

Desde hace varios años personal del ahora Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA), dependiente del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), ha usado las instalaciones del laboratorio de Rayos Cósmicos del IIF en el Monte Chacaltaya (pico a 5380 m snm) para realizar estudios de corta duración referentes a la composición de la atmósfera en la región. Estas investigaciones estuvieron relacionadas fundamentalmente al estudio del comportamiento de algunos gases como el monóxido de carbono, (Andrade et al. (2011)) el dióxido de carbono (M.Andrade & Gutiérrez (2007)) (M.Andrade et al. (2015)). Desde el principio el potencial del lugar fue evidente: la altura del laboratorio, su cercanía al Altiplano y la Amazonía así como a la zona metropolitana de La Paz hacen que se puedan estudiar masas de aire de diferente origen. Los estudios preliminares sugirieron que el transporte de material particulado y gases hacia regiones de altura como Chacaltaya era

importante y que los posibles efectos de este transporte podrían tener, a su vez, efectos sobre los glaciares de la región.

El año 2010, un grupo de investigadores del LFA y del *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) francés, por un lado, y del *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR) italiano deciden intentar convertir a Chacaltaya en un centro de monitoreo y estudios atmosféricos. Para este propósito y con ayuda de otros centros de investigación que se plegaron a la iniciativa original, se envía un proyecto a la Organización Mundial de Meteorología (WMO por sus siglas en inglés), para instalar un laboratorio de estudios atmosféricos en Chacaltaya. El objetivo principal fue estudiar el comportamiento de gases y material particulado que llega a esta región, el transporte de estos elementos desde y hacia la tropósfera libre, así como los procesos asociados al comportamiento observado. El proyecto fue aprobado a principios del 2011 y se montó el laboratorio en diciembre de ese año. Las instalaciones fueron adecuadamente preparadas para este propósito a fin de garantizar el cuidado adecuado de los instrumentos y la adquisición correcta de los datos. En la estación se siguen estrictos protocolos de calibración y mantenimiento de los instrumentos ahí emplazados. Desde entonces el laboratorio funciona de manera ininterrumpida y más bien ha crecido en instrumentos y personal. Así mismo el número de instrumentos que permiten apoyar las medidas realizadas en Chacaltaya desde La Paz ha ido en aumento de manera continua.

El presente documento describe el trabajo que se está realizando en el laboratorio atmosférico de Chacaltaya (denominado a partir de ahora CHC/GAW), incluida una descripción del lugar, de la instrumentación existente en la actualidad más algunos resultados a la fecha y proyecciones futuras.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL LUGAR

El laboratorio Chacaltaya CHC/GAW se encuentra localizado a 5240 m snm a 16°21'1.78"S y

¹ Consultada en octubre 10, 2014

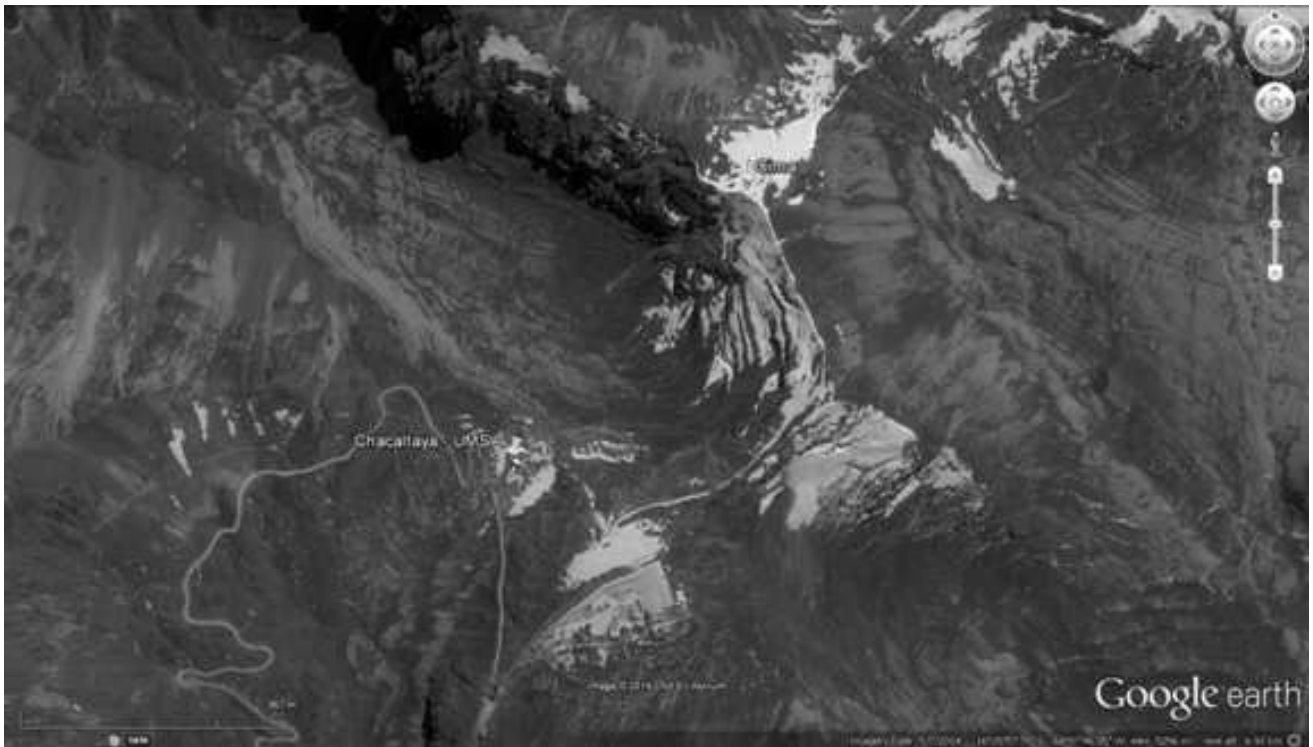


FIG. 1.— Imagen satelital obtenida de Google Earth de la región de Chacaltaya donde se ubica la estación CHC/GAW. Se marcan la ubicación de la estación así como la posición de la cumbre. El camino de acceso es claramente visible.

$68^{\circ}7'53.44''W$ en el Monte Chacaltaya. Comparte infraestructura con el laboratorio de Rayos Cósmicos del IIF–UMSA. En la cima del Monte existe una caseta (5380 m snm) a unos 500 m de GAW/CHC en dirección noreste (ver figura 1), que es utilizada para realizar algunas medidas como se describe ms adelante.

El laboratorio está orientado al este del Altiplano Central a aproximadamente 50 km del Lago Titicaca, el cuerpo de agua más grande la región, y a una distancia aproximada de 17 km al norte del conglomerado urbano La Paz–El Alto (y otras ciudades más pequeñas aledañas a éstas) que actualmente tiene una población aproximada de 1.6 millones de habitantes (INE, 2013). Las denominadas tierras bajas, Amazonía, están a unos 250 km en línea recta hacia el este de la estación en tanto que el Océano Pacífico se halla hacia el oeste a aproximadamente 350 km de distancia.

Las instalaciones son accesibles a través de un camino de tierra localizado a aproximadamente una hora y media por automóvil de las instalaciones del LFA en la ciudad de La Paz, lo que permite acceder al mismo fácilmente para fines de monitoreo, mantenimiento y descarga de información. A la fecha CHC/GAW tiene además acceso a través de Internet y cuenta con servicio de electricidad desde la red principal de electricidad a través de una línea de alta tensión mantenida por el IIF. Asimismo la infraestructura cuenta con personal de vigilancia permanente.

3. INSTRUMENTACIÓN

3.1. Chacaltaya

Al momento de la instalación inicial se emplazó un grupo de instrumentos que han funcionado, esencialmente, de manera continua hasta la fecha. La tabla 1 muestra un listado de los instrumentos/sistemas instalados a la fecha en la estación en Chacaltaya. En diciembre del 2012 se comenzó a tomar muestras isotópicas de precipitación mientras que en octubre 2013 se iniciaron las medidas isotópicas en vapor de agua a través del analizador isotópico de $\delta^{18}O$ y δD , que permite estudiar la historia convectiva e, indirectamente, la procedencia de las masas de aire (Tremoy et al. (2012)). Asimismo el equipo inicial de medida de CO_2 , basado en instrumentos LI–COR (ver tabla 1) ha sido reemplazado en mayo del 2014 por un instrumento Picarro que mide este gas y adicionalmente metano.

3.2. Cota–Cota (LFA)

A fin de complementar las medidas realizadas en Chacaltaya, un grupo de instrumentos fue instalado en las instalaciones del Laboratorio de Física de la Atmósfera (LFA), en el campus de la UMSA (3420 m snm, $16^{\circ}32'20.71''S$, $68^{\circ}3'58.69''W$). Algunos de estos instrumentos/sistemas estuvieron en funcionamiento antes de la fecha de la instalación de CHC pues formaban parte de estudios previos del LFA. La tabla 2 detalla los instrumentos actualmente en funcionamiento en este lugar.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan promedios a nivel estacional correspondientes a datos de los años 2012

TABLA 1
INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN CHACALTAYA.

Instrumento/Sistema	Descripción
Mobility Particle Size Spectrometer tipo TROPOS–SMPS.	El SMPS es un espectrómetro, tipo TROPOS–SMPS, de tamaños de partículas basado en la medición de su movilidad eléctrica, el cual incluye además un Contador de Partículas TSI modelo 3772. El rango de medida es de 10 a 500 nm. Es importante mencionar que este instrumento fue diseñado y construido por el instituto TROPOS (Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig, Germany), para que funcione en las condiciones atmosféricas de Chacaltaya, además fue calibrado usando el instrumento de referencia del WCCAP (A.Wiedensohler et al. (2012))
Absorption Photometer tipo MAAP (Multi angle Absorption Photometer).	El MAAP instalado en CHC/GAW es marca THERMO modelo 5012. Este instrumento mide el coeficiente de absorción de las partículas a una longitud de onda nominal de 637 nm. Para la medición, las partículas son depositadas en un filtro de cuarzo las cuales son iluminadas con un LED. Las medidas de coeficiente de absorción son relacionadas con la concentración másica de carbón negro (CN) ambiental a través de su sección eficaz σ (6.6 m ² /g). Un aspecto importante del MAAP es que mide la radiación dispersada por las partículas y usa las mismas para mejorar el producto final que es la medición del CN equivalente.
Absorption Photometer tipo Aethalometer AE–31.	Las muestras son recolectadas en filtros de cuarzo de manera continua, las cuales son irradiadas secuencialmente cada 5 minutos a 7 longitudes de onda: 370 nm (UV), 470 nm (azul), 520 nm (verde), 590 nm (amarillo), 660 (rojo), 880 nm (infrarrojo) y 950 nm (infrarrojo). El AE–31 mide el coeficiente de atenuación de la radiación debido a las partículas depositadas y determina la concentración másica del carbón negro a través de un factor de atenuación dado por el fabricante.
Integrating Nephelometer tipo Aurora 3000	Este instrumento mide tanto el coeficiente de dispersión total de las partículas como el coeficiente de retro–dispersión de las mismas a 3 longitudes de onda: 450 nm (azul), 525 nm (verde) y 635 nm (rojo). La muestra de aire a analizar es introducida en su cámara óptica y luego es iluminada de manera secuencial por los 3 LEDs. La radiación dispersada es medida por sensores colocados entre 10° y 170°.
Neutral Cluster and Air Ion Spectrometer (NAIS)	El NAIS permite la medición de la movilidad eléctrica tanto de partículas cargadas como de partículas neutras en el rango de 0.0013 a 3.2 cm ² V ^{–1} s ^{–1} que corresponde con el rango de tamaños de 0.8 a 42 nm; aunque las medidas para diámetros mayores a 25 nm tienen menor fiabilidad debido a limitaciones en su matriz de inversión. El NAIS tiene dos diferenciadores de movilidad eléctrica (DMA) idénticos que permite la medida simultánea de partículas cargadas positiva y negativamente.
Analizador de ozono Modelo 49i Thermo Scientific	La concentración de ozono superficial se mide en un rango de 0.05 ppb a 200 ppm por absorción de radiación ultravioleta a 254 nm. El instrumento intercala las medidas entre dos celdas para, al promediar ambos resultados, anular la deriva de la medida. Diariamente y de manera automatizada se verifica la respuesta del instrumento para el cero y una concentración conocida.
Analizador de monóxido de carbono tipo Horiba APMA–370	La concentración de monóxido de carbono (CO), en un rango de 0 a 50 ppm, se obtiene por absorción no dispersiva en el espectro infrarrojo, a 4.6 μ m (2165 cm ^{–1}). Internamente se corrige la interferencia del vapor de agua en el espectro de absorción.
Muestreador de alto volumen (High–Volume Sampler) marca Digitel	El muestreador de alto volumen permite tomar muestras de material particulado en filtros de cuarzo con impactadores intercambiables para la detección de partículas de diámetros aerodinámicos de 10 y 2.5 μ m (PM 10 y 2.5). Si bien el instrumento está diseñado para trabajar a un flujo nominal de 30 m ³ h ^{–1} , dadas las condiciones a 5380 msnm, este flujo se reduce, por lo que las partículas muestreadas son de menores diámetros a los nominales. Los filtros colectados se envían, en condiciones adecuadas, al Laboratorio de Glaciología y Geofísica Ambiental (LGGE, Grenoble, Francia), donde se analiza su composición química (no exhaustivamente).
Analizador de dióxido de carbono adaptado (modelo LSCE–ICOS–Kazán)	Este instrumento fue construido en el Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (LSCE, París) en base a dos detectores Licor 6262 no dispersivos ubicados en paralelo. Permite obtener la concentración de CO ₂ por absorción en el espectro infrarrojo a 4.26 μ m. Para evitar la interferencia del vapor de agua, una trampa de agua se ubica antes de la entrada del instrumento y para evaluar la deriva del mismo, cada 2 horas se inyecta un gas de concentración conocida en el mismo. El instrumento se calibra mensualmente de manera semi–automática.
Analizador de dióxido de carbono y metano tipo Picarro UG ESP–1000	Este instrumento permite medir concentraciones traza de gases a través de espectroscopía óptica de absorción. La tecnología utilizada es el decaimiento de la absorción medida a la salida de una cavidad. La misma cuenta con tres espejos lo cual permite aumentar el camino óptico del haz de luz, aumentando así la sensibilidad de la detección (tecnología <i>cavity ring down spectroscopy</i> o CRDS). El haz de luz se genera con un laser regulable a 6057.1 cm ^{–1} para el ¹² CO ₂ , 6057.8 cm ^{–1} para el ¹² CH ₄ y a 6237.5 cm ^{–1} para el vapor de H ₂ O. El instrumento se calibra cada 15 días de manera automática.
Analizador de isótopos estables de vapor de agua tipo Picarro L2130i	El principio de operación es el mismo que el del instrumento anterior, con la diferencia de que éste está destinado a la cuantificación de los isotópicos del vapor de agua constituidos por deuterio y ¹⁸ O. La detección de HDO, H ₂ ¹⁶ O y H ₂ ¹⁸ O se realiza entre 7193.5 y 7184.0 cm ^{–1} (1.39 μ m). El instrumento se calibra cada 25 horas de operación de manera automática.
Analizador de mercurio gaseoso tipo Tekran 2537A ^a	El instrumento mide mercurio elemental. La muestra de aire pasa por una trampa de oro, en la cual se amalgama el mercurio total presente en la muestra. Luego, el Hg se desorbe a 600°C bajo una atmósfera de Ar en forma de mercurio elemental (Hg ⁰), para luego pasar a una celda de detección, donde su concentración se mide por fluorescencia a 253.7 nm.

^aPara una campaña de un año

<i>Hygroscopicity Tandem Differential Mobility Analyzer (H-TDMA)^a</i>	Este instrumento fue diseñado y construido por el Departamento de de Ciencia Ambiental Aplicada de la universidad de Estocolmo. Con este instrumento es posible medir el factor de crecimiento de las partículas y además poder calcular su higroscopicidad. Básicamente el HTDMA mide el factor de crecimiento de las partículas en dos etapas: en la primera separa de la muestra las partículas con un diámetro específico, y en la segunda se las hidrata con agua destilada y se las hace crecer. Como resultado de este crecimiento se produce una distribución de tamaños de la cual el centro indica el nuevo diámetro de las partículas y la razón entre el diámetro inicial y el diámetro indicado por el centro de la distribución nos da el factor de crecimiento y nos indica si las partículas muestreadas son higroscópicas o hidrofílicas.
Estación meteorológica automática en la cumbre	Conformada por: un anemómetro Young 5103, un barómetro Vaisala PTB110, un radiómetro Kipp & Zonen CNR1, un sensor de T-HR Campbell Scientific HMP45C, un sensor de temperatura del suelo Campbell Scientific CS-107 y un pluviómetro calefaccionado CS-385. La estación pertenece al SENAMHI pero, gracias a un acuerdo de cooperación interinstitucional, el LFA se encarga de la descarga de datos y mantenimiento general de la misma.
Estación meteorológica automática en el observatorio	La estación automática instalada en el observatorio cuenta con un sensor sónico de viento marca GILL para medir tanto la velocidad como la dirección del mismo. También cuenta con sensores de presión, temperatura y humedad de fabricación Vaisala. Los datos son adquiridos automáticamente cada minuto a través de la comunicación TCP/IP.

TABLA 2
INSTRUMENTACIÓN INSTALADA EN DEPENDENCIAS DEL LFA-UMSA EN COTA-COTA.

Instrumento/Sistema	Descripción
Sistema LIDAR (LIPAZ)	Es un sistema elástico y consta de un emisor y un receptor en configuración coaxial. El emisor está constituido por un láser de Nd:YAG emitiendo pulsos de 80 mJ a una longitud de onda de 532 nm (20 Hz) y un expansor de haz 5x. El receptor consta de un telescopio newtoniano ($f = 700$ mm y $\phi = 250$ mm) que colecta la señal de luz retrodispersada en la atmósfera, seguido por un sistema óptico que colima, filtra (1 nm) y enfoca los haces de luz sobre un fotomultiplicador (PMT). Este detector convierte la señal de luz retrodispersada en señal eléctrica, cuya intensidad y retraso temporal se almacena en una matriz para su posterior análisis. El proceso de adquisición de datos se realiza con la ayuda de un osciloscopio Tektronix DPO3014 controlado mediante el puerto GPIB y un programa de desarrollado en Labview. Los datos obtenidos, tres perfiles por segundo, permiten estudiar la evolución de los aerosoles presentes en la atmósfera sobre Cota-Cota en periodos de interés excepto en horas cercanas a mediodía local debido al ruido introducido por luz natural dada la altura que alcanza el Sol en nuestra latitud.
Espectrofotómetro Brewer (ozono & UV)	Es un espectrofotómetro que mide la columna total de ozono y radiación ultravioleta B espectral. El instrumento, a prueba de agua, funciona de manera automática siguiendo al Sol y también realizando medidas cenitales. El instrumento es calibrado contra el Brewer viajero cada dos o tres años.
Piranómetros UV tipo YES UV1	Miden radiación solar UV integral biológicamente efectiva entre 280 y 320 nm. El sistema es regulado térmicamente para garantizar la estabilidad de las medidas.
Fotómetro solar (CIMEL)	Es un fotómetro solar que mide radiación solar a diversas longitudes de onda entre el UV y el IR cercano. El instrumento sigue al Sol y también escanea el cielo para estimar irradiancia solar directa así como irradiancia del cielo que llega a la superficie terrestre. A partir de esas medidas el instrumento mide el espesor óptico de aerosoles (o AOD en inglés).
Impactor (MOUDI, sistema portátil)	Es un impactador en cascada que permite medir el tamaño aerodinámico de los aerosoles entre 0.18 y 18 μ m. El sistema colecta a las partículas en ocho etapas entre esos tamaños. La masa y características químicas del material particulado pueden ser analizadas posteriormente.
Analizador de dióxido de carbono tipo LI-COR 820	Es un analizador de CO ₂ que utiliza técnicas infrarrojas no-dispersivas (NDIR en inglés) para medir la concentración de este gas.
Analizador de monóxido de carbono tipo Horiba APMA-370	Ver tabla 1.

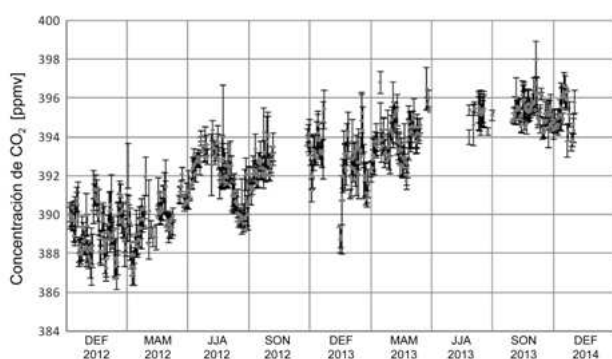


FIG. 2.— Concentración del dióxido de carbono medida en la CHC/GAW entre diciembre 2011 y enero 2014. Se muestran los promedios diarios (puntos azules) en ese periodo así como variabilidad diaria expresada por una desviación estándar de esos datos (barras).

y 2013 de las diferentes medidas realizadas en Chacaltaya. Para este primer reporte acerca de la estación Chacaltaya nos abocamos a datos trimestrales definidos de acuerdo a la tabla 3.

El énfasis en el presente trabajo está centrado en las estaciones húmeda y seca que están claramente definidas en datos meteorológicos de estaciones de la región (M.Andrade et al. (2015)). Los periodos MAM y SON son considerados de transición aunque el mes de septiembre es el mes con mayor actividad de producción de humo debido a la quema de biomasa (M.Andrade et al. (2015)).

El análisis de vientos medidos en la cumbre (5380 m asl) muestra la prevalencia de vientos del oeste en la época seca así como prevalencia de vientos del este durante la época húmeda. Estos hechos son consistentes con estudios anteriores (R.Garraud et al. (2008)). Estas observaciones junto a la ubicación de la estación meteorológica sugieren que la estación mide el comportamiento regional antes que local.

La descripción de las medidas en Chacaltaya por los varios instrumentos instalados ahí se refiere a partir de ahora a los periodos definidos en los párrafos previos a no ser que se indique lo contrario como en el caso de dióxido de carbono que claramente muestra un comportamiento no estacionario.

4.1. Dióxido de carbono

El equipo de medida usado desde diciembre 2011 hasta mayo 2014 está basado en un instrumento descrito en la tabla 1. Los datos que se usan para este trabajo corresponden a diciembre 2011 hasta diciembre 2013 y corresponden a datos horarios en ese periodo. A partir de los mismos se calcularon promedios diarios así como promedios mensuales y estacionales. La fig. 2 muestra el comportamiento de la concentración de CO_2 en CHC/GAW para el periodo analizado. Se observa claramente el incremento en la concentración en los dos años de observaciones pero también dos periodos (nov–dic 2012 y jun–jul 2013) en los cuales no se tiene datos por fallas en el instrumento. Por esta última razón es aún difícil establecer el comportamiento anual promedio del CO_2 medido en CHC. La figura 3 muestra el

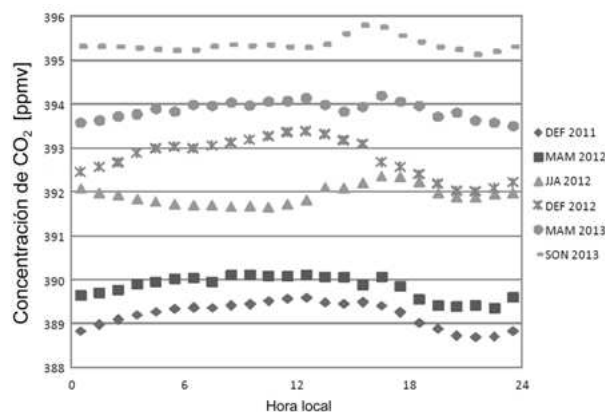


FIG. 3.— Concentración horaria promedio trimestral de dióxido de carbono medida en CHC/GAW. Un incremento claro en la concentración de este gas es visible en el gráfico.

comportamiento promedio diario en los semestres con suficiente información para el periodo de estudio. Una amplitud, diferencia en concentración de CO_2 entre el día y noche, del orden de 1 ppmv es evidente para los semestres DEF y MAM mientras la amplitud es menor en los semestres restantes. Esto contrasta con estudios realizados en el área metropolitana (M.Andrade & Gutiérrez (2007)) donde se observa un claro ciclo diurno con una amplitud del orden de 10 ppmv². Este hecho sugiere una débil influencia de la capa límite planetaria (CLP) en la concentración de CO_2 en Chacaltaya. Finalmente, un ajuste lineal a los promedios trimestrales da un incremento de 3.5 ± 0.3 ppmv/año que es un valor un poco mayor que el reportado en Mauna Loa (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>). Cabe hacer notar que estos datos son preliminares pues la intercomparación y calibración entre los dos instrumentos que miden CO_2 está en proceso.

4.2. Ozono superficial

Las concentraciones promedio de ozono superficial en Chacaltaya son de la misma magnitud que aquellas reportadas en Pico Espejo a 4765 msnm (S.Calderón et al. (2008)), aunque el promedio anual es ligeramente más elevado: 33.6 ppbv³ contra 26.6 ppbv.

En los diagramas de cajas de la figura 4 se presentan los datos de concentración de ozono en el periodo 2012–2013. Allí se observa que los valores más bajos (30.5 ± 5.8 ppbv) se dan entre diciembre y mayo durante la época húmeda en tanto que el valor más elevado (41.0 ± 6.8 ppbv) corresponde a la primavera, que coincide con la época de quemadas en la región. Este último valor es ligeramente más alto que el del trimestre JJA, 39.0 ± 6.3 ppbv, que corresponde típicamente a un periodo seco pero con un número de quemadas mucho menor a SON.

Estadísticamente, los datos que exceden el valor máximo (o son menores al mínimo) se definen como

² Partes por millón de volumen

³ Partes por billón (10^9) de volumen. Equivale a la fracción molar nmol/mol.

TABLA 3
DEFINICIÓN DE LOS TRIMESTRES USADOS EN ESTE DOCUMENTO.

Meses	Acrónimo	Tipo de estación	Observaciones
Diciembre, enero y febrero	DEF	Húmeda	Máxima precipitación típicamente en enero
Marzo, abril y mayo	MAM	Transición húmeda a seca	Marzo todavía tiene una alta precipitación en la región
Junio, julio y agosto	JJA	Seca	Climatológicamente el mes más seco en la región corresponde a julio.
Septiembre, octubre y noviembre	SON	Transición seca a húmeda	Septiembre podría ser clasificado como un mes seco en base a algunas variables

valores atípicos. Sin embargo, un análisis preliminar de nuestros datos sugiere que el gran número de valores por encima del valor máximo se debe a la formación de ozono *in situ* (o transporte lento) gracias a la existencia de condiciones meteorológicas favorables (baja velocidad del viento y días despejados) en combinación con la presencia de precursores. Los precursores necesarios para la formación fotoquímica de ozono incluyen óxidos de nitrógeno de las emisiones de motores de combustión, por lo que la influencia de contaminación urbana en Chacaltaya resultaría una condición necesaria en ausencia de chaqueos (trimestre MAM).

En lo que respecta a los valores por debajo del valor mínimo, estos parecen estar relacionados con transporte de masas de aire con menos precursores, es decir aire limpio, o bien condiciones propicias para la eliminación de ozono *in situ*.

El incremento del valor mínimo entre junio y noviembre parece estar relacionado con un aumento regional de la concentración de ozono, probablemente debido a la quema de biomasa generalizada (chaqueos), como se evidencia en el análisis químico del material particulado.

4.3. Análisis químico de partículas PM_{10}

De las muestras obtenidas en la cumbre (ver descripción en tabla 1) se obtienen concentraciones para varios elementos como levoglucosan, carbono elemental y orgánico, potasio (en su forma soluble, K^+) y otros iones. Las muestras se toman en filtros de cuarzo tanto de día (entre las 9 am y 7 pm) como de noche (de 7 pm a 9 am del día siguiente) de manera intercalada durante 3 a 5 días. De estos compuestos se discuten dos en este trabajo: el K^+ y el levoglucosan. Ambos son empleados como trazadores de quema de biomasa, siendo el primero un trazador inorgánico y el segundo un marcador orgánico producido exclusivamente por la descomposición térmica de la celulosa.

La figura 5 muestra las concentraciones obtenidas por semestre para las temporadas extendidas de lluvias (de noviembre a abril, 29 muestras) y seca (de mayo a octubre, 35 muestras). Si bien el K^+ se encuentra más concentrado en la temporada seca (12.97 ng/m^3 de día y 8.55 ng/m^3 de noche) que en a la temporada húmeda (5.87 ng/m^3 de día y 6.15 ng/m^3 de (7.98 ng/m^3 de día y 4.14 ng/m^3 de noche en época seca respecto a 0.90 ng/m^3 de día y 1.12 ng/m^3

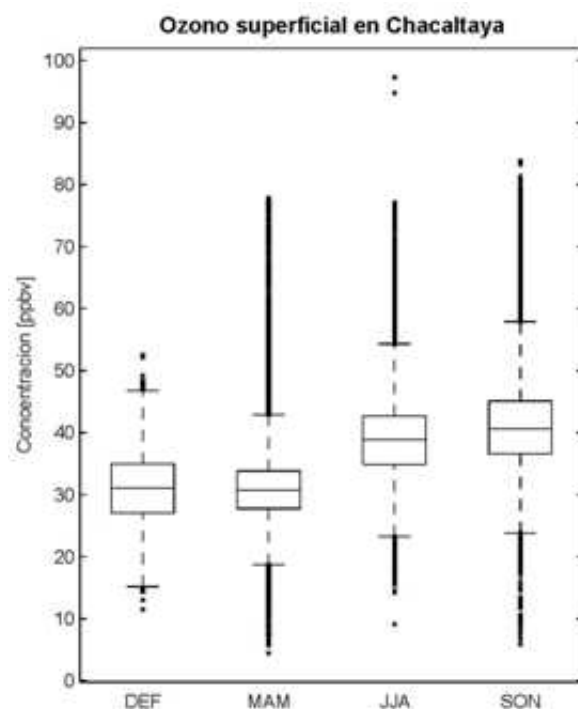


FIG. 4.— Diagramas de cajas para la concentración de ozono superficial en Chacaltaya, por trimestre. La línea horizontal dentro de la caja corresponde a la mediana de los valores. El límite inferior de la caja corresponde al primer cuartil (25%) y el superior al tercer cuartil (75%). Las líneas punteadas hacia ambos lados indican el rango entre los valores máximo y mínimo, definidos como la media ± 2.7 veces la desviación estándar, respectivamente. Las cruces fuera de este rango corresponden a valores atípicos (vea el texto para más explicaciones). Datos del 1/1/2012 al 31/12/2013.

de noche en época de lluvias). Este marcado comportamiento se debe a la influencia regional del material particulado emitido en temporada de chaqueos.

Respecto a las diferencias entre el día y la noche durante la temporada noche), este contraste resulta más evidente en el caso del levoglucosan seca (5b y 5d), en el día cuando se detecta una mayor concentración de ambos trazadores respecto a la noche, lo cual podría dar cuenta de emisiones de fuentes más cercanas, transportadas por la CLP (ver sección 4.5).

Finalmente, las concentraciones nocturnas de K^+ y levoglucosan medidas en CHC/GAW, asociadas al comportamiento de la CLP, sugieren que estos valores corresponden a los valores encontrados en la tropósfera libre de la región.

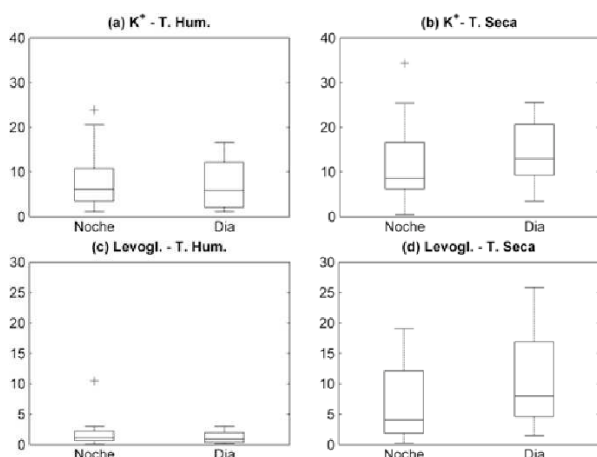


FIG. 5.— Diagramas de cajas (idem que fig.4) para las concentraciones de potasio (K^+) y levoglucosan medidas en GAW/CHC para el periodo 2012–2013. Las medidas están divididas en época seca (MJJASO) y húmeda (NDEFMA). Adicionalmente las mismas se clasifican en noche y día por el tipo de muestreo. Los valores reportados de potasio no han sido corregidos por el posible aporte marino. En todos los casos los promedios medidos están por encima del límite de detección. Para transformar las concentraciones a condiciones estándar (1 atm, 25°C), multiplicarlas por 0.575.

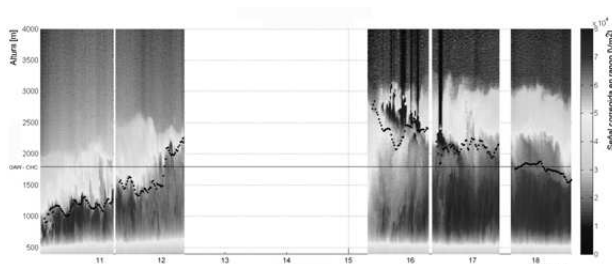


FIG. 6.— Evolución de la capa límite del día 14 de septiembre de 2012 sobre Cota–Cota obtenida con el lidar LIPAZ del LFA. La línea punteada muestra el nivel estimado de la capa límite planetaria obtenido con ayuda del algoritmo de wavelets. Se observa que la altura de la capa límite, para este día en particular, sobrepasa algunas horas el nivel al que se encuentra la estación GAW–CHC (línea negra horizontal continua a 1780 m sobre Cota–Cota).

4.4. LIDAR

Los datos de este instrumento, localizado en Cota–Cota, permiten estimar el comportamiento de la CLP en la región. En este caso, sin embargo, no se tienen datos cada día por razones logísticas y presupuestarias. La figura 6 muestra los resultados obtenidos para el 14 de septiembre de 2012. La línea punteada que se muestra en la imagen, generada mediante la aplicación de la técnica del algoritmo de wavelets (M.Brooks (2003)), muestra la altura de la CLP para diferentes horas del día. Se puede observar que a las 10 de la mañana hora local (14:00 UTC) la altura de la CLP se encuentra a los 1200 metros sobre el nivel de la estación de Cota Cota y que existe una capa residual que se extiende hasta casi los 2000 metros. La actividad convectiva generada por el incremento de la radiación solar se manifiesta en un rápido incremento en la altura de la capa límite,

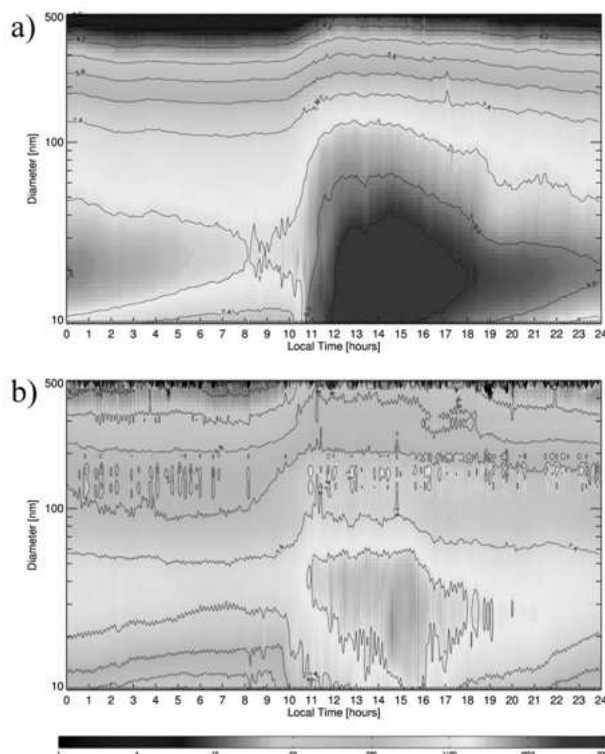


FIG. 7.— Evolución temporal diaria promedio de la distribución de tamaño de partículas que llegan a CHC/GAW en el rango 50–500 nm para a) la época seca (JJA) y b) la época húmeda (DEF). Los colores indican la concentración de partículas mientras que líneas indican valores de número de partículas ($\times 10^{-3}$).

llegando a sobrepasar los 2000 metros alrededor del medio día. La imagen también nos indica la existencia de nubes alrededor de las 15:30 horas (arriba de 4 km, y por tanto no visibles en la imagen) y que la altura de la CLP y las intrusiones de aire limpio proveniente de la tropósfera libre disminuyen por la tarde al disminuir el calentamiento producto de la radiación solar. La región blanca indica que la altura del Sol en ese periodo del día introduce mucho ruido a la señal, debido a la radiación solar, haciendo imposible obtener buenos datos en ese lapso.

La línea negra horizontal de la misma figura, ubicada a 1780 metros sobre la superficie de Cota–Cota y por tanto a 5240 m snm, señala la altura a la cual se encuentra la estación GAW/ CHC. Esto sugiere que la misma podría encontrarse dentro de la capa límite en ciertos momentos del día, especialmente entre las 11 y 16 hora local, y que aerosoles generados en las ciudades de La Paz y El Alto llegan a la estación bajo las condiciones meteorológicas adecuadas. Es importante mencionar, sin embargo, que el comportamiento de la capa límite descrito para este día no ocurre todos los días y que en diferentes ocasiones la altura máxima de la capa límite sobre Cota–Cota no llega a la altura de la estación GAW/CHC. Esto no quiere decir necesariamente que la estación quede en la tropósfera libre pues la altura de la superficie también juega un papel importante al momento de formar la CLP. Este hecho se estudiará más cuidadosamente más adelante.

4.5. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

En base a las medidas tomadas desde enero del 2012 hasta diciembre 2013 se caracterizó la variabilidad estacional y diurna de la distribución de tamaños en el rango de 10 a 500 nm en la estación Chacaltaya. Se observa que la concentración de partículas en Chacaltaya no es constante sino que presenta una dependencia con el tamaño de las partículas. Ahora bien, si se toman partículas de un diámetro dado se puede apreciar que al transcurrir el día la concentración de partículas presenta una dependencia temporal (figuras 7a y 7b). Esta dependencia de la concentración de partículas tanto con el diámetro como con el tiempo se la observó en otros estudios realizados en estaciones con similares características atmosféricas a las de Chacaltaya (K.Sellegrí et al. (2010)). Si las medidas se separan en época seca (JJA) y época húmeda (DEF) claramente se observa que la distribución de tamaños son diferentes en ambas épocas (figura 7a y 7b).

Al observar la distribución de tamaños en época seca se puede apreciar que la mayor concentración de aerosoles se registra en horas con sol entre las 10 y 18 horas. En este periodo, las concentraciones de aerosoles en los modos Nucleación (de 10 a 30 nm) y Aitken (30 a 100 nm) son mayores en comparación con el modo Acumulación (100 a 500 nm). Dentro de este periodo del día la alta carga de aerosoles comienza, en promedio, entre las 10 y 11 horas incrementando primero la carga de aerosoles en el modo Nucleación, luego éstos van creciendo y aumentando gradualmente la carga de aerosoles del modo Aitken. Desde aproximadamente las 19 horas la carga de aerosoles en el modo Nucleación va disminuyendo hasta registrarse los mínimos a tempranas horas del día. El comportamiento es similar en los modos Aitken y Acumulación. Estudios realizados en otros lugares (por ejemplo en la estación francesa Puy de Dôme) indican que, de igual manera, se observa que la distribución de tamaños varía en el transcurso del día (H.Venac et al. (2009)).

Similarmente, se observa que en época húmeda entre las 10 y 18 horas se registran las mayores concentraciones diarias de aerosoles, pero en menor magnitud comparada con la época seca. Un aspecto importante es que el incremento de la carga de aerosoles empieza en el modo Aitken y no en el modo Nucleación como en la época seca (figura 7b). Este hecho puede estar relacionado con las diferentes condiciones meteorológicas de la estación tales como alta humedad relativa y mayor cantidad de precipitación. Por otro lado, esta diferencia también puede indicar que existe una diferente fuente de aerosoles en esta época del año.

Algo que llama la atención es que a pesar de las muy diferentes condiciones meteorológicas entre época seca y húmeda, el incremento en la concentración de partículas en la estación GAW/CHC ocurre entre las 10 y 11 am (hora local) en ambos periodos. Esto parece estar relacionado con el arribo de pre-

cursores y material particulado a la estación proveniente del área metropolitana de La Paz.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Datos obtenidos por diferentes instrumentos operando en CHC/GAW muestran dos cosas de manera clara: a) Existe un marcado incremento de la concentración de aerosoles entre las 10 y 11 am (hora local) y un descenso lento hasta los valores iniciales alrededor de la media noche. b) A nivel estacional existe un claro incremento de material particulado y marcadores de quema de biomasa vegetal en época seca respecto de lo medido en época húmeda.

Datos obtenidos por el sistema lidar en el LFA sugieren que el marcado incremento en la concentración de partículas medido en Chacaltaya (promedio diario) es producto del comportamiento diario de la capa límite. Esto es, Chacaltaya se encontraría en la troposfera libre entre medianoche y 10 am, y dentro de la capa límite entre 11 am y medianoche aproximadamente. Esto implicaría que la contaminación producida por el conglomerado urbano llega a CHC/GAW prácticamente cada día entre las 10 y 11 am. Aunque los datos diarios sugieren que esto ocurre frecuentemente, los mismos datos también sugieren que se necesitan condiciones meteorológicas adecuadas para que dicho material (gases y material particulado) arribe a Chacaltaya. Se requieren estudios más profundos para establecer con claridad los mecanismos involucrados.

Por otro lado, la alta concentración de ozono y de marcadores de quema de biomasa vegetal durante la época seca, quemadas que se producen fundamentalmente en tierras bajas tanto de Bolivia como de países aledaños (Carmona-Moreno et al. (2005)), da cuenta de la representatividad de este sitio a nivel regional. Las medidas de largo plazo corroboran el hecho que humo y gases producto de estas quemadas (o productos secundarios) llegan a Chacaltaya a pesar de la altura de la estación tal como reportan (M.Andrade et al. (2011)).

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

El hecho que la estación GAW/CHC se encuentre parte del tiempo en la troposfera libre pero que a la vez haya una clara señal producida por el área metropolitana cercana hace de este sitio un lugar muy interesante para monitoreo a diferentes escalas de tiempo o campañas intensivas. Los datos indican que la estación mide gases y partículas transportados por masas de aire de origen cercano y también de regiones lejanas. Esto permite estudiar eventos de escala local y regional. Adicionalmente, dada la altura de CHC/GAW, es posible que eventos de transporte de gases y material particulado desde y hacia la troposfera puedan ser estudiados a detalle con la instrumentación existente y/o futura. Resultados a detalle de estos primeros dos años de medidas (2012–2013) son reportados en otros artículos.

REFERENCIAS

- Andrade M., Mamani R., Velarde F., Biggeman D., Zaratti F. & Forno R. (2011), *Revista Boliviana de Física* **20**, 42
- Wiedensohler A. et al. (2012), *Atmospheric Measurement Technologies* **5**, 657
- Carmona-Moreno C., Belward A., Malingreau J.-P., Hartley A., Garcia-Alegre M., Antonovskiy M., Buchshtaber V. & Pivovarov V. (2005), *Global Change Biology* **11**, 1537
- Venac H., Sellegri K., Villani P., Picard D. & Laj P. (2009), *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**, 1465
- Sellegri K., Laj P., Venzac H., Boulon J., Picard D., Villani P., Bonasoni P., Marinoni A., Cristofanelli P. & Vuillermoz E. (2010), *Chemical Physics* **10**, 10679
- Andrade M., Gutiérrez R., Forno R., & Velarde F. (2011), *Monitoreo de Monóxido de Carbono en la Atmósfera de la ciudad de La Paz y Chacaltaya, Informe técnico del proyecto "Monitoreo de monóxido de carbono en la atmósfera de La Paz y el aporte de fuentes por quema de materia vegetal"*, DIPGIS, Universidad Mayor de San Andrés.
- Andrade M. et al. (2015), *First Results from a High altitude (5240m asl) GAW Station in the Central Andes: Chacaltaya (CHC), Bolivia.*(En preparación)
- Andrade M. & Gutiérrez R. (2007), *Potenciamiento de la red de monitoreo de Dióxido de Carbono en el Valle de La Paz*, Informe Técnico, Laboratorio de Física de la Atmósfera, Universidad Mayor de San Andrés.
- Brooks M. (2003), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **20**, 1092
- Garreaud R., Vuille M., Compagnucci R. & Marengo J. (2008), *PALAEO3 Special Issue (LOTRED South America)* **281**, 180
- Calderón S., Iglesias M., Ramoni E., Hoffmann J., Carrillo P., Kreiji R., Hochschild R., Gross B. & Jochen G. (2008), *Revista de Ciencia e Ingeniería* **29**, 97
- Tremoy G., Vimeux F., Mayaki S., Souley I., Cattani O., Risi C., Favreau G. & Oi M. (2012), *Geophysical Research Letters* **39**, L08805