

ALGUNAS TÉCNICAS DE SONDEO VERTICAL DE LA ATMÓSFERA URBANA

J. Adrián Álvarez-Pérez y Napoleón Quiroz-Amoroso y Adalberto Tejeda-Martínez

Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz (México)

E-mail: adrianalvarezp@gmail.com, napoleon108@gmail.com y atejeda.martinez@gmail.com

Resumen

Para la obtención de datos en la baja atmósfera se suelen realizar radiosondeos con globos o algún otro vehículo que transporte los instrumentos de medición, o bien mediante sensores remotos que hacen uso de ondas de sonido o haces de luz. Estos sondeos son necesarios en particular para comprender el comportamiento en la vertical de las alteraciones climáticas por la urbanización. En este texto se hace un repaso de técnicas de sondeos verticales de la atmósfera, y se ejemplifica el uso de drones y de sodares con mediciones en dos ciudades de tamaño medio ubicadas en la porción central del litoral mexicano del Golfo de México: Xalapa, a media montaña (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), y Veracruz, en la costa (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm).

Palabras clave: Baja atmósfera, sensores remotos, técnicas de sondeos verticales.

Abstract

To obtain data in the lower atmosphere, radio soundings are usually carried out with balloons or some other vehicle that transports the measuring instruments, or through remote sensors that make use of sound waves or light beams. These probings are required to understand the vertical behavior of climate change due to urbanization. In this text, a review of vertical survey techniques of the atmosphere was made, and the use of drones and sodars were exemplified with measurements made in two medium-sized cities in the central region of the Mexican coast of the Gulf of México: Xalapa, in the middle of the mountains. (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), and Veracruz, on the coast (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm).

Keywords: lower atmosphere, remote sensors, vertical survey techniques

Introducción

Los efectos de la urbanización en el clima local rebasan el dosel y alcanzan alturas que dependen del clima regional, la cubierta superficial (permeabilidad y propiedades térmicas), su estructura (rugosidad y reflexión de radiación entre los elementos urbanos), y del metabolismo de la ciudad como reflejo de la actividad humana (Landsberg, 1981; Stewart y Oke, 2012). En revisiones sobre climatología urbana, como la de Arnfield (2003) o la de Souch y Grimmond (2006), se evidencia que la preocupación fundamental ha sido la estructura y evolución de los campos horizontales de temperatura, calidad del aire, precipitación, viento y en menor medida radiación

solar. El estudio de la estructura vertical de las atmósferas urbanas es menor en cantidad, pero muy relevante, pues busca, en primer término, la explicación tridimensional del fenómeno a partir de la comprensión de los intercambios de calor sensible y los efectos de los cañones urbanos en la reflexión y dispersión de la radiación solar; del calor latente y del ciclo del agua —permeabilidad y contenido de agua de las superficies—, y de la transferencia de momento mecánico, principalmente por la turbulencia que generan las edificaciones y la superficie. En segundo lugar, las mediciones verticales también son fundamentales para la modelación de la dispersión de contaminantes y de la climatología a escala de la ciudad (Jacobson, 1999).

Por otra parte, Stewart y Oke (2012) se han ocupado de la ambigüedad en la clasificación de zonas como urbanas y rurales. En efecto, en muchos casos el tránsito de una a otra se da en modos graduales que dejan a vastos territorios en la mayor indefinición al señalarlos como suburbanos. Además, como apuntan los mismos autores, la palabra “clima urbano” se puede referir a una multitud de ambientes determinados por las características físicas, económicas, culturales, sociales y otras, de cada ciudad, por lo que proponen una clasificación de zonas climáticas aplicable a estudios térmicos, pero que se pueda extrapolar a otros campos de la climatología urbana. Más adelante regresaremos a este punto.

Hasta aquí, quedan como ideas centrales la necesidad de realizar estudios del comportamiento en la vertical de las alteraciones climáticas por la urbanización, los que tendrían que responder a interrogantes propias del contexto urbano, para lo cual la clasificación de Stewart y Oke (2012) de las zonas climáticas locales (local climate zones) sería de ayuda. La medición de dichas alteraciones es fundamental para anticipar su evolución en las décadas venideras, y muy probablemente será rutinaria hacia mediados del siglo, desde luego con tecnologías insospechadas. Por el momento, el uso de drones y de sodares, como se verá más adelante, es una posibilidad que se ejemplificará con mediciones en dos ciudades de tamaño medio en la porción central del litoral mexicano del Golfo de México, Xalapa, a media montaña (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), y Veracruz, en la costa (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm). Para mayores detalles ver Quiroz-Amoroso (2017) y Álvarez-Pérez (2016).

Técnicas de sondeo

En esta sección se describirán algunas técnicas de sondeo atmosférico, como el uso de globos libres, cautivos o controlados, aviones tripulados y el lidar. En la siguiente sección nos ocuparemos del sodar y el uso de dron.

Globos

Los sondeos con globo libre son ampliamente conocidos: globos de látex con una radiosonda atada a ellos, equipada con sensores que obtienen información de humedad del aire, temperatura, presión atmosférica y, de la trayectoria del globo, se infieren la dirección y rapidez del viento. Esta información es transmitida por ondas de radio a una computadora en superficie que codifica y guarda la información. En observatorios sobre el continente y desde algunos buques, se procura realizar dos lanzamientos por día, a las 0 y 12 horas del meridiano de Greenwich. Los datos están disponibles en la página del Departamento de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Con esta técnica se puede alcanzar una altura de 30 km aproximadamente antes de romperse el globo, y mediciones bajo condiciones de alta convección. Su desventaja es que para campañas intensivas en un sitio en específico donde se requieren varios lanzamientos en un corto periodo, resulta costoso al no poder recuperar los sensores.

Un globo cautivo o sonda anclada consiste principalmente en un globo atado a un hilo resistente enrollado en un malacate o cabestrante con uno o varios sensores meteorológicos atados al hilo de sujeción. Al desenrollar el hilo, el globo eleva los sensores registrando las variables meteorológicas de interés a una frecuencia dada. Se pueden realizar comparaciones entre los datos del ascenso y el descenso del globo, lo que ayuda a depurar datos erróneos por mal funcionamiento de los instrumentos, o en un periodo relativamente corto obtener información de dos sondeos.

Un inconveniente es que la altura que alcanza el globo depende de la longitud del hilo que lo sujeta, por lo tanto, sólo se pueden obtener perfiles de variables hasta alturas de 800 a 1000 m por encima

del nivel del suelo, principalmente por el peso que ejerce el hilo que sujeta el globo, el cual aumenta conforme el globo se eleva, y a la intensidad de viento.

El sondeo con globo cautivo tiene la ventaja de que en la obtención de datos de las capas bajas de la atmósfera no se pierden los sensores, a diferencia de un radiosondeo con globo libre (Gutiérrez- y otros, 2007). En las últimos tres décadas se han sucedido diversos intentos por mejorar estos sistemas de sondeo utilizando materiales más ligeros, hasta poder alcanzar alturas aproximadas de 8,000 m (Bely y Ashford, 1995; Aglietti, 2009).

Los globos meteorológicos controlados (CMET, por sus siglas en inglés) fueron inventados por Paul Voss, del Smith College Picker Engineering Program, en Northampton, Massachusetts. Sobre su funcionamiento y algunas aplicaciones ver Voss y otros (2010). Son globos con volumen de aire controlado por una bomba con válvula que suministra o retira helio del globo a través de una señal transmitida por satélite. Esta técnica de sondeo se utiliza principalmente para estudios en la baja atmósfera para conocer el transporte de los flujos de aire a diferentes alturas y sus correspondientes datos meteorológicos.

Un ejemplo de su uso fue el monitoreo del transporte de contaminantes por corrientes de viento realizado en la ciudad de México en el 2006 en el proyecto Iniciativa para Megaciudades: Observaciones de investigación local y global (MILAGRO, por sus siglas en inglés), donde se utilizaron globos CMET con un tamaño de 0.9 m de diámetro y 3.2 m de longitud con una carga útil de 400 gramos, que contenía una sonda que medía velocidad del viento en la horizontal, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa además de un módem satelital que permitía recopilar los datos y ordenaba al globo realizar ascensos y descenso durante el vuelo.

Cometa de viento

Aquí se le llamará cometa a un dispositivo compuesto por un armazón ligero y plano sobre la cual se extiende y pega papel o tela, con una cola de cintas o trozos de papel, el cual se sujeta con un hilo y se arroja al aire para que el viento lo eleve. En algunas regiones de México se le llama papalote.

Hacia finales de 1980 el Instituto Cooperativo de Investigación de las Ciencias Ambientales (CIRES) de la Universidad de Colorado empleó cometas con una serie de sensores electrónicos atados en intervalos a lo largo de una cuerda para obtener perfiles del campo eléctrico atmosférico en las Islas Navidad en el Pacífico Ecuatorial (Balsley, 1992).

La cometa usada por CIRES posee un diseño de paracaídas aerodinámico tipo Ram – air, que le proporciona estabilidad, portabilidad y la capacidad de cargar equipos con peso razonable a gran altitud. Por lo general se construyen con telas resistentes como las llamadas Mylar, Spectra o Kevlar o combinación de ellas. El área de la cometa se extiende desde 5 m² hasta 20 m².

Para que ascienda y se mantenga la cometa en vuelo a una altura deseada, se requieren velocidades de vientos aproximadas de 5 a 7 m s⁻¹. Los diferentes tamaños de la cometa dependen de la tensión que puede soportar el cabrestante para enrollar o desenrollar la cuerda que sujeta al cometa y la carga útil.

Aviones tripulados-instrumentados

A partir de 1930 el uso de aeronaves tripuladas para realizar sondeos en la atmósfera fue cada vez más frecuente, ya que por su capacidad para obtener perfiles verticales y de áreas extensas a cierta altura, se vio como una forma económica para conocer las características de la atmósfera no superficial en una región (para más detalles de esta técnica, ver Haluani, 2014).

La utilización de esta técnica para la obtención de la altura de la capa límite atmosférica está basada en la detección de discontinuidades de temperatura, como inversiones térmicas en el tope de la capa. Normalmente los sensores se sitúan lejos de la perturbación del flujo que genera el propio avión. Debido a la velocidad del avión (entre 50 ms⁻¹ y 100 ms⁻¹) la respuesta de los sensores tiene que ser suficiente como para ofrecer medidas adecuadas de las características de la capa límite

Lidar

El contenido de humedad, las particularidades térmicas y la concentración de partículas de la capa límite han permitido la utilización de una serie de equipos basados en el principio de funcionamiento del radar, diseñados para medir el espesor de dicha capa en función de las intermitencias detectadas en la interfase entre las dos capas y que suele registrarse como una señal de energía de retorno. En particular el lidar (Light Detection and Ranging) usa la presencia en la capa límite de polvo y contaminación para obtener el espesor de mezcla basándose en la propiedad de esta capa de homogeneizar las concentraciones de los componentes que hay en ella. Transmite hacia la atmósfera un haz luminoso, emitido por un láser

pulsado, que sufre dispersión en la capa límite por la presencia de moléculas del aire, gotitas de lluvia y aerosoles (Garratt,1992).

Sondeos en zonas urbanas de Veracruz

Para evaluar la influencia de la urbanización en el clima en altura, es necesario realizar sondeos atmosféricos con una resolución espacial de decenas de metros o menos. Esto se puede conseguir mediante sensores acoplados a un dron, con un sodar o un lidar, por ejemplo.

Los sondeos que se mostrarán en esta sección se realizaron con dron en la ciudad de Xalapa en los campos deportivos de la Unidad de Servicios Bibliotecarios y de Información (USBI-X en lo sucesivo) de la Universidad Veracruzana (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm) y mediante sodar en la Posta Zootécnica Torreón del Molino de la misma Universidad en la ciudad de Veracruz (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm; Pozotomo en adelante). Ambos sitios caen en los tipos en la clasificación de zonas urbanas de Stewart y Oke (2012) vi(b), es decir, espacios abiertos con edificaciones de altura baja y árboles dispersos (Tabla 1).

Tabla 1. . Propiedades geométricas y de la cubierta superficial de la USBI X y de la POSOTOMO, según las parametrizaciones clasificación de Stewart y Oke (2012), en la zona climática local vi (b). Los valores son adimensionales salvo que se declaren las unidades. Se consideró un radio de 2 km a la redonda del punto de medición.

Propiedad	Valor Aproximado
Factor de vista o fracción de hemisferio celeste visible	0.6 a 0.8
Altura entre anchura de los cañones urbanos	0.3 a 0.8
Porcentaje de superficie edificada	20 a 40
Porcentaje de superficie impermeable	20 a 50
Altura de rugosidad (m). Promedio ponderado de la altura de edificios y plantas (m)	3
Admitancia (J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹)	1,100 a 1,800
Albedo	0.13 a 0.25
Emisión de calor antropogénico (w m ⁻²)	< 25

Sondeos con dron

El vehículo aéreo no tripulado (VANT, por sus siglas en español o dron, término introducido al Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española en su edición de 2013), se define como un vehículo que puede volar semi o completamente autónomo gracias a un ordenador interno y una serie de sensores (UNEP, 2013).

El dron puede elevarse desde cientos de metros hasta kilómetros, dependiendo del modelo y capacidad, que se reflejan principalmente en su precio y si su uso es civil o militar. Además de la capacidad de transportar carga meteorológica útil, el dron es utilizado para capturar imágenes o video y obtener mapeos de un sitio de interés, lo que permite identificar la topografía del lugar, zonas de deforestación, y ayuda a tener un registro gráfico de la zona de estudio (UNEP, 2013).

Las principales ventajas como método para la obtención de datos de la atmósfera es la capacidad de realizar perfiles con una velocidad controlada, como en el caso del multicóptero, que puede mantenerse estático durante el vuelo, lo que ayuda a tener una mejor resolución para sondeos en la capa límite superficial, urbana o rural. Durante el vuelo se pueden obtener imágenes y videos de alta resolución, además de que los sensores que

se utilizan pueden ser recuperados, a diferencia de otras técnicas como los sondeos con globo libre. Al no necesitar equipo adicional más que el control remoto, el dron es ligero y fácil de transportar, además de que se puede desplazar en diferentes direcciones tanto en la vertical como en la horizontal. Puede realizar las mismas funciones que los sondeos con avión instrumentado pero a menor costo tanto de equipo como de personal (Haluani, 2014).

Hay también limitantes que se deben tener en cuenta al usar este método, como el tiempo de vuelo y el peso de la carga de equipo meteorológico útil. No se pueden realizar vuelos en presencia de tormentas o fuertes rachas de viento. Los accidentes de vuelo dependen del mantenimiento del equipo, su buena programación y la experiencia del piloto remoto. La interferencia de señales de radio o de otro tipo puede ocasionar fallas durante el vuelo de los drones operados por control remoto.

Del 9 al 11 de agosto del 2016 en la USBI-X se llevaron a cabo los sondeos que se reportan aquí, con un data logger Raspberry Pi provisto de un sensor de temperatura y humedad relativa (sensor SHT71) y de uno de presión atmosférica (BMP180) (figura 1), adheridos a un dron (figura 2) modelo DJI F500.

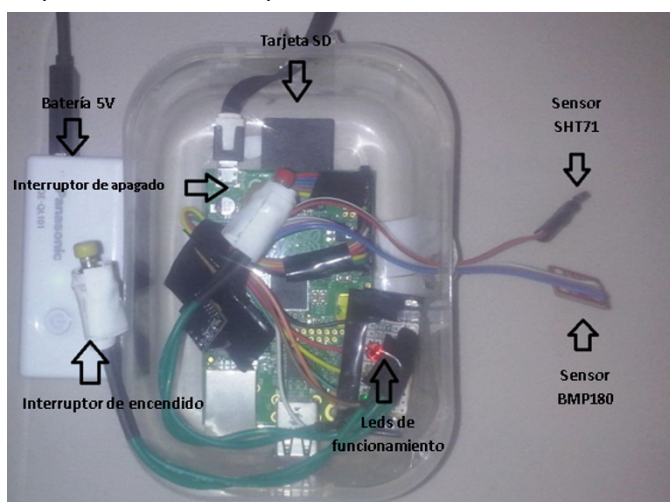


Figura .1 Diseño final de la sonda Raspberry pi modelo B donde los sensores se encuentran por fuera del recipiente que contiene la tarjeta y el circuito.

Además del dron (e) y sonda Raspberry Pi (f), se emplearon baterías LiPo (a), un control remoto (b), un tripié (c), una pantalla que recibe señal de radio (d) y una cámara GoPro que graba el video en tiempo real del ascenso del dron (g) (figura 2). Se montó la sonda Raspberry Pi en la base inferior del dron y fue programada para registrar datos cada cinco segundos. La máxima elevación alcanzada fue de 800 metros a una velocidad de ascenso constante de 3ms^{-1} .

La pantalla con la que cuenta el dron en superficie recibe la señal del video tomado por la cámara GoPro del dron y monitorea la velocidad de ascenso del dron, su estabilidad, la carga de la batería, el

GPS del dron, la altura a la que se encuentra el dron y la detección de fenómenos meteorológicos como nubosidad, corrientes de aire, entre otros (ver figura 3).

De la lectura de la pantalla se obtuvieron datos que se anotaban manualmente cada cien metros: altura, condiciones meteorológicas y características del vuelo como la estabilidad del dron, la variación de la velocidad de ascenso o descenso por rachas de viento y la presencia de nubes, con el fin de complementar el análisis de los perfiles de temperatura y humedad relativa ya que el registro comprende los fenómenos que pueden influir en el comportamiento de estas dos variables (tabla 2). Las



Figura 2. Dron DJI F500 con Raspberry Pi. USBI-X 9 al 11 de agosto de 2016.



Figura 3. Pantalla que se usa para los vuelos con dron.

Tabla 2. Formato para registro de altura cada cien metros del dron y las condiciones meteorológicas y mecánicas durante el vuelo.

Hora de inicio: 19:00	Co.Me.: 7/8	Numero de batería: 2
Hora final: 19:07	Tip.Nub.: Cumulus/Estratocumulus	Fecha: 30/Agosto/2016
Altura [m]	Tiempo de vuelo	Observaciones
100	00:35	Entro a nube en 200 metros de ascenso En 500 metros sale de la nube Corrientes ascendentes (ascenso) Corrientes ascendentes en descenso (desde los 700 m)
200	01:09 [Nube]	
300	01:42 [Nube]	
400	02:13 [Nube]	
500	02:48	
600	02:21	
700	03:54	

figuras 4 a 8 muestran los resultados obtenidos con la aplicación de esta técnica de sondeo con dron.

En general, en las figuras 4 a 8 se observa la disminución de la temperatura con la altura y el registro de inversiones térmicas de entre tres y dos grados. Con respecto al data logger Raspberry-Pi se puede decir que es adecuado para el registro de la variación de la temperatura con la altura y es capaz de detectar inversiones térmicas y variaciones de temperatura debidas al transporte que genera la capa límite turbulenta.

Sondeos con SODAR

El sodar (por sus siglas en inglés Sonic Detection and Ranging) es un instrumento meteorológico para medir la dispersión de ondas acústicas en un volumen de la atmósfera a distancia, sin la necesidad de que se sitúe físicamente en la porción de volumen donde se realizan las mediciones. Se usa para medir velocidad, intensidad y dirección del viento en la vertical, y la estructura termodinámica de la capa baja de la atmósfera. Un sodar es semejante a un radar, excepto que se usan ondas de sonido y no de radio.

Su funcionamiento se basa en una antena que emite pulsos cortos de sonido hacia la atmósfera que las heterogeneidades de la temperatura del aire y de la turbulencia de pequeña escala

dispersan y reflejan. La antena entonces recibe los pulsos producidos por el eco, generado por efecto Doppler, que varían según la rapidez del viento, la turbulencia y la estructura térmica. Estos ecos contienen información detallada sobre la estructura de la turbulencia en la capa límite atmosférica; esta información se obtiene evaluando el espectro de energía acústica que regresa al sodar producido por el eco y así es posible determinar la rapidez del viento.

El sodar registra la energía acústica reflejada, llamada backscatter. La potencia acústica causada por el eco que llega al sodar es proporcional a la turbulencia térmica. Por lo tanto la intensidad del eco contiene la información acerca de la distribución vertical de las capas turbulentas en la atmósfera; cuanto más intensa es la energía acústica reflejada, mayor turbulencia se presenta en la atmósfera. El llamado sodar Doppler usa diferencias de frecuencias llamadas cambio Doppler entre la energía acústica transmitida y la reflejada. Los resultados de la rapidez y dirección del viento en la horizontal representan un promedio en un intervalo de tiempo determinado. Las alturas son asignadas acorde al viaje de la energía acústica emitida por el sodar y al tiempo que tarda la señal desde la antena a los blancos de dispersión y de regreso a los transductores (para más detalles, ver Remtech And Radian Electronics System, 2003).

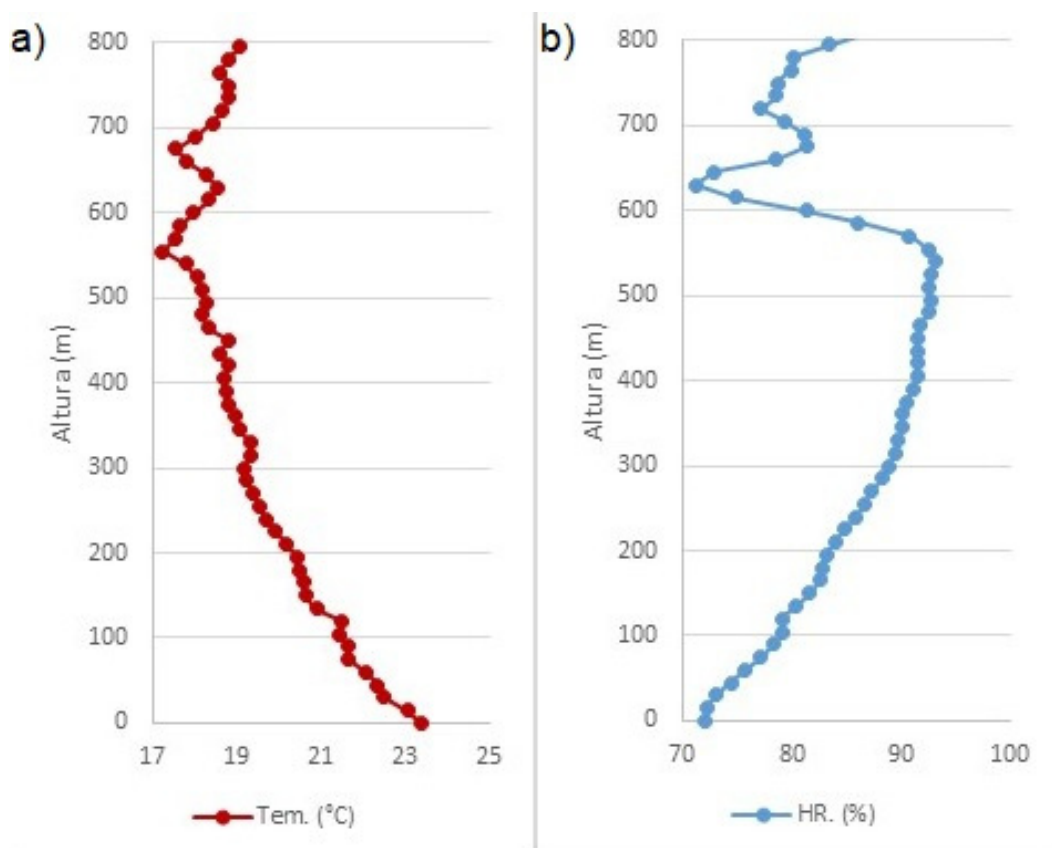


Figura 4. a) Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. b) Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 09 de agosto del 2016 a las 13:10 horas.

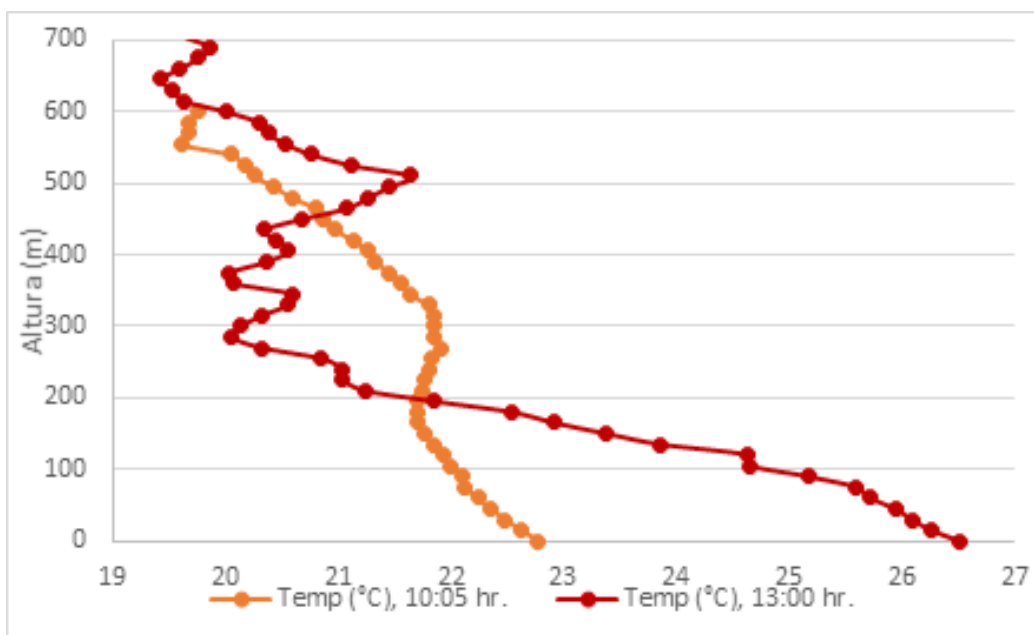


Figura 5. Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 10 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 hOrAs .

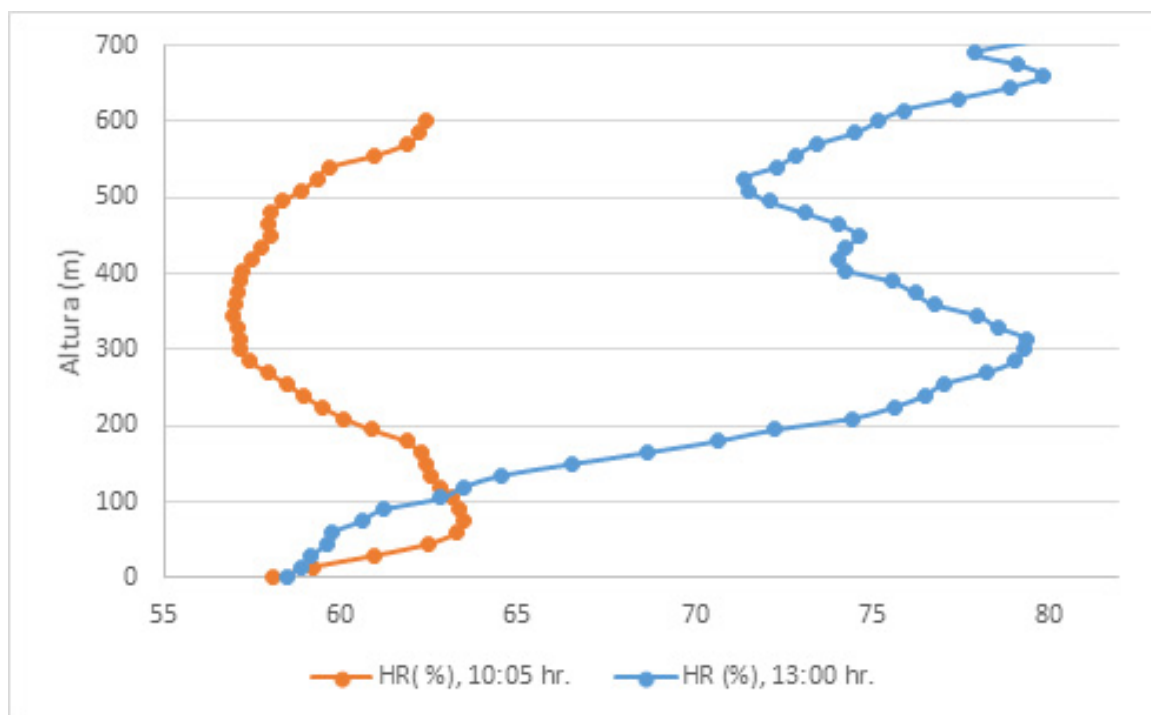


Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 10 de agosto del 2016 a las 10:05 y 13:00 horas.

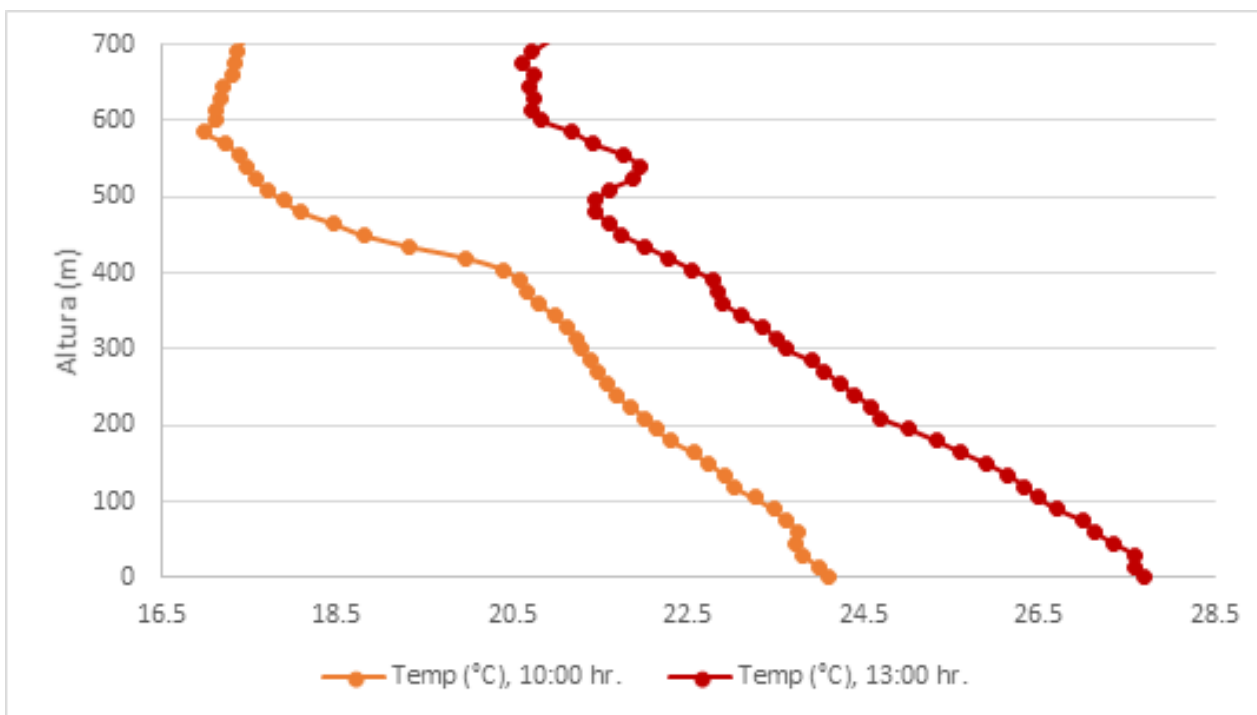


Figura 7. Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBIX. 11 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 horas.

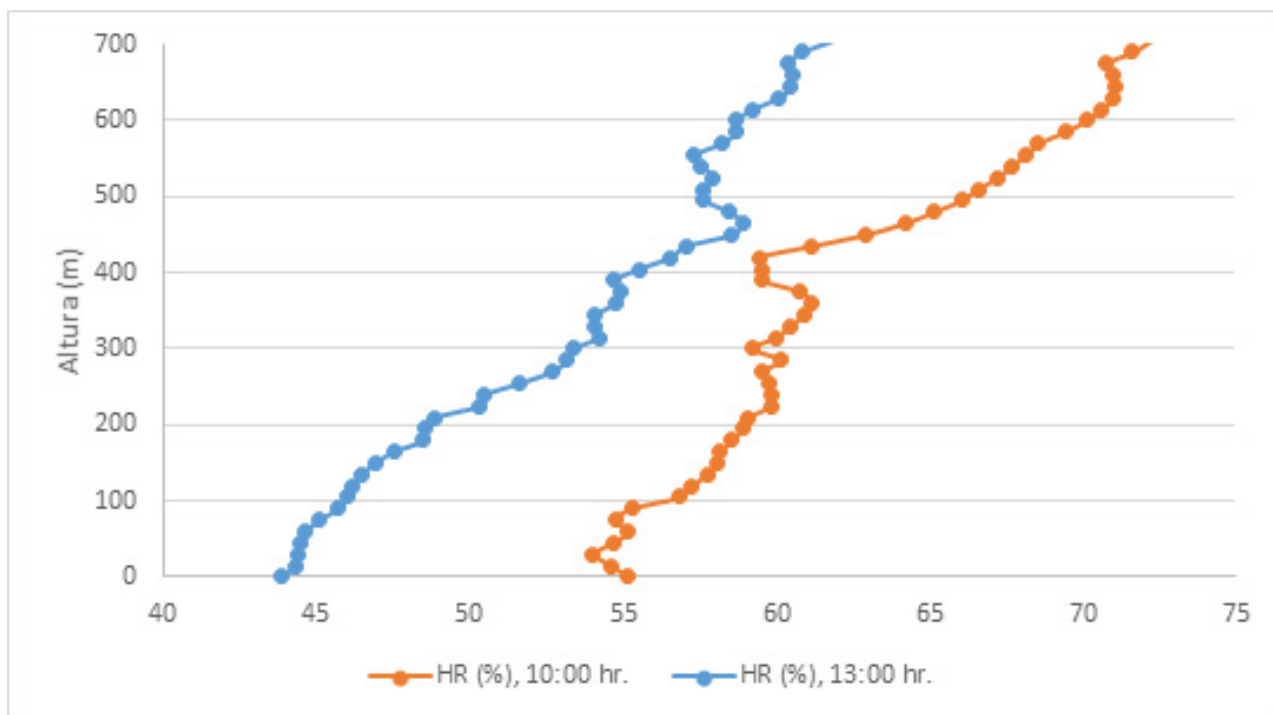


Figura 8. Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 11 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 horas.

Para la descripción del viento tanto en la vertical como en la horizontal en los diferentes perfiles, se ha utilizado un método gráfico que indica la rapidez del viento ascendente o descendente, así como gráficas de la rapidez y dirección del viento en los diferentes niveles a partir de 30 metros sobre la superficie; la distancia entre cada nivel es de 10 metros. Los perfiles de viento horizontal indican la dirección hacia donde se dirigía el viento en cada uno de los niveles a partir del punto de medición.

Como ejemplos se presentan casos de perfiles obtenidos en la Pozotomo. Durante estas mediciones se presentó nubosidad dispersa en la zona montañosa central del estado, interactuando con el frente frío número 19 en el noroeste del Golfo de México y con una débil vaguada en las costas de la entidad.

A las 8:20 horas el viento horizontal fue mayormente con dirección hacia el este entre 40 y 160 metros de altura, a los 30 metros se dirigía hacia el noreste.

Entre 30 y 100 metros la rapidez aumenta de 2.7 a 4.4 m/s, fluctúa entre 4.3 y 4.6 m/s en 110 hasta 150 metros, en 160 metros disminuye hasta alcanzar una rapidez de 3.5 m/s (figura 9). El viento vertical a las 8:20 horas presentó subsidencia entre 30 y 160 metros, aumentando la rapidez de 0.16 a 0.24 m/s entre 30 y 60 metros; también presentó aumento entre 100 y 160 metros de 0.12 a 0.18 m/s, y se presentó una disminución de la intensidad del viento de 0.24 a 0.12 m/s entre 60 y 100 metros (figura 10).

Desde luego estas mediciones sólo son el primer paso de análisis subsecuentes, como el ajuste de perfiles de viento para la componente horizontal que se muestra en la figura 11. El perfil resultó logarítmico (Arya, 1999) con un coeficiente de correlación lineal de 0.6419 entre datos observados y estimados, lo que concuerda bien con teorías sobre el comportamiento de la capa superficial turbulenta.

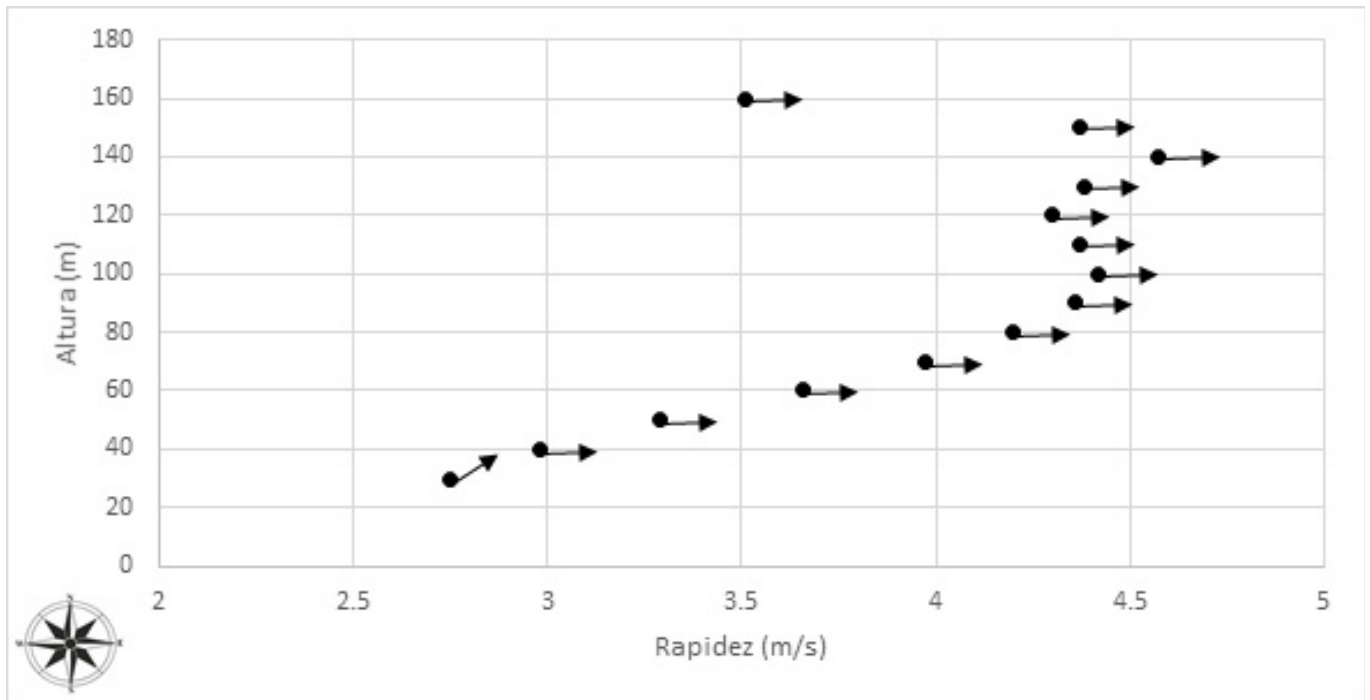


Figura 9. Comportamiento del viento horizontal con la altura a las 8:20 horas. Pozotomo 16 diciembre de 2014.

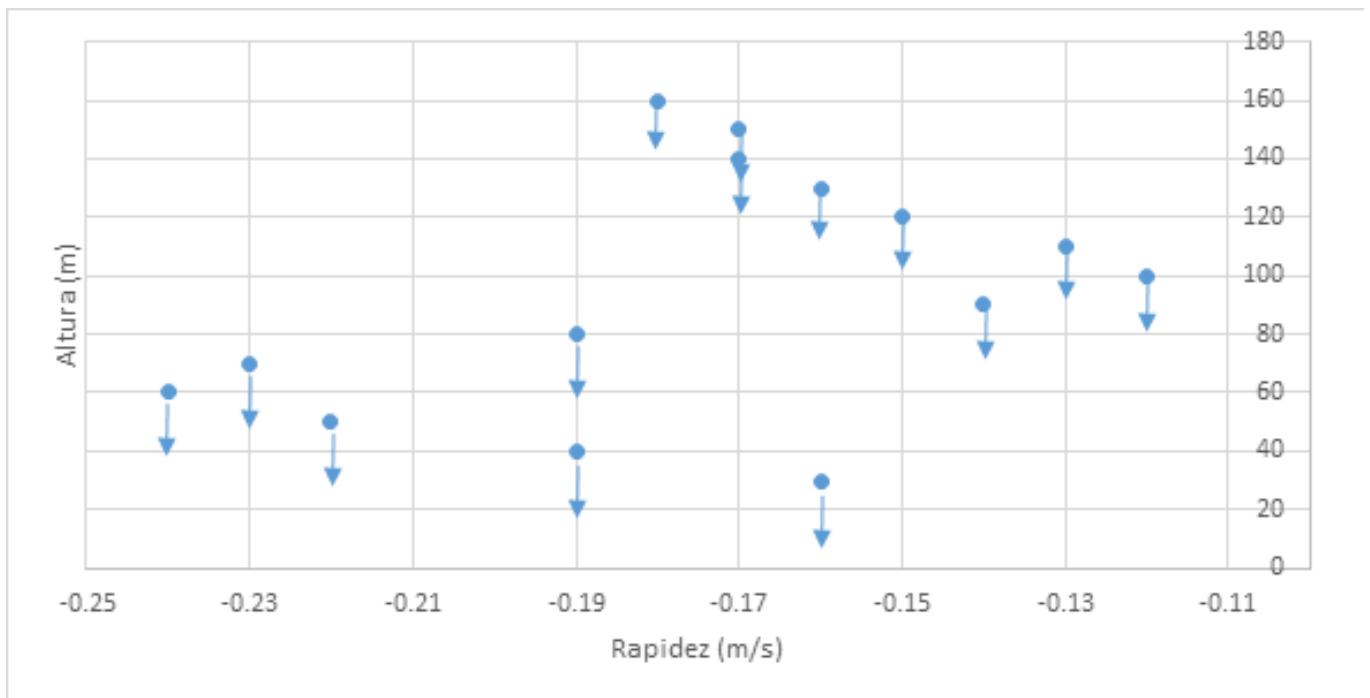


Figura 10. Comportamiento del viento vertical con la altura observado con sodar a las 8:20 horas. Pozotomo, 16 de diciembre de 2014.

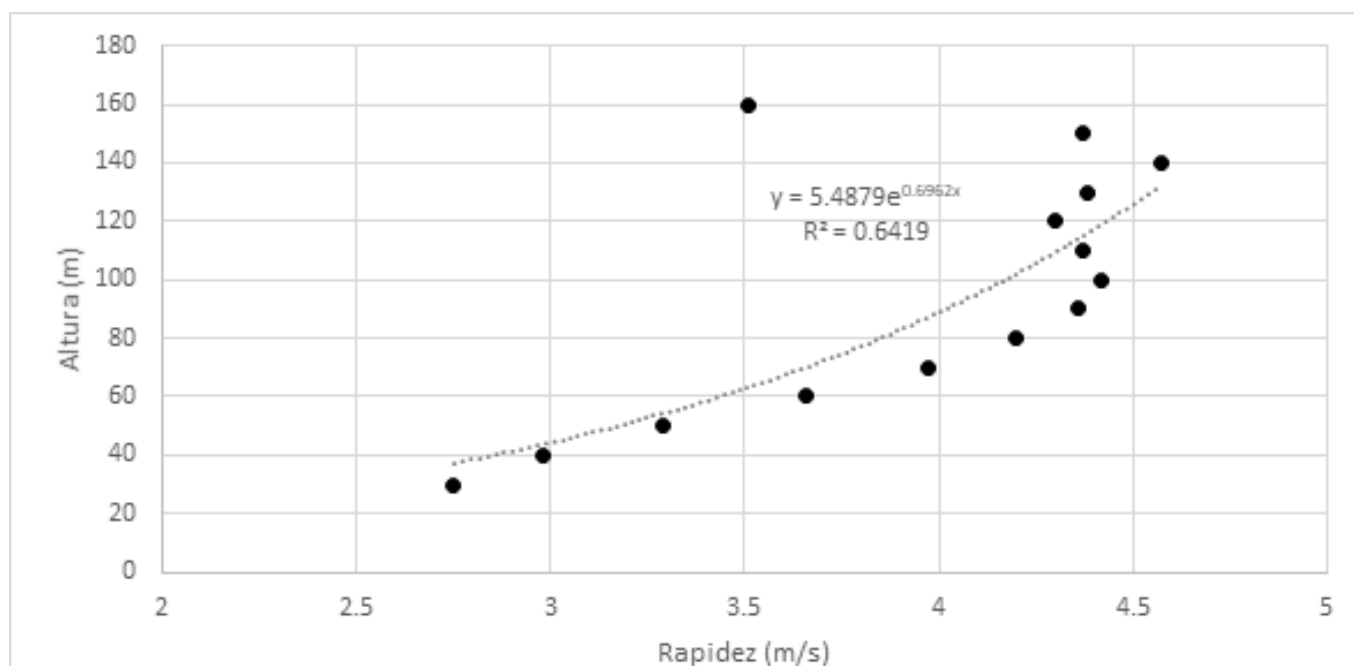


Figura 11. Perfil empírico para la componente horizontal del viento observado con sodar a las 8:20 horas. Pozotomo, 16 de diciembre de 2014.

Comentarios finales

El sodar y el dron son dos alternativas para la realización de sondeos verticales de las atmósferas urbanas, como aquí que se ejemplifican con mediciones en la zona climática local vi (b) según la clasificación de Stewart y Oke (2012). No obstante, dentro del dosel de áreas urbanas compactas de gran, mediana o baja altura (las zonas climáticas locales 1, 2 y 3 de la mencionada clasificación), no son alternativas viables por la obstrucción de las edificaciones, pero sí lo son del dosel hacia arriba. También pueden aplicarse para mediciones de las influencias de la urbe viento abajo en la dispersión de contaminantes, alteraciones de los campos térmicos y de viento, por ejemplo, y, desde luego, sobre superficies no urbanizadas.

El sodar provoca un ruido molesto a la población y los vuelos con dron deben cumplir con la normatividad aplicable al uso del espacio aéreo, lo que en ambos casos limita su uso cotidiano y lo restringe a sólo cortas campañas de mediciones.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los resultados del proyecto Interacción superficie/atmósfera en la zona montañosa central de la vertiente del Golfo de México: observaciones y modelación a alta resolución (CONACYT CB-2012-01; 183040). Los autores agradecen al Dr. David R. Fitzjarrald, de la State University of New York at Albany (SUNYA) las facilidades para hacer uso del sodar, a las autoridades de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Veracruzana, el apoyo para realizar mediciones con el sodar en la Pozotomo, y al Dr. Cuauhtémoc Turrent por sus convenientes y relevantes comentarios en la revisión de este trabajo.

Referencias

Álvarez-Pérez, J.A. (2016). El uso del sodar para estudios de la atmósfera baja en un punto de la costa central del estado de Veracruz. Tesina de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (México), 96 p. (copias disponibles en pdf).

- Aglietti, G. S. (2009). Dynamic response of a high-altitude tethered balloon system. *J. of aircraft* 46 (6), 2032-2040.
- Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. of Clim.* 23 (1): 1-26.
- Arya, S.P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press, London, 307 p.
- Balsley, B. B. (1992). Atmospheric research using kites: here we go again!. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 73, 17-29.
- Bely, P., y Ashford, R. L. (1995). High-altitude aerostats as astronomical platforms. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering* 2478, 101-116. doi:10.1117/12.210916
- Foken, D. T. (2008). *Micrometeorology*. Bayreuth Germany: Springer, 71-76 pp.
- Garratt. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 316 p.
- Gutiérrez, W., García, M., Magaña, V., & Escalante, J. (2007). Diseño y construcción de globo meteorológico cautivo instrumentado. *Ingeniería y Ciencia* 3 (5): 29-42.
- Haluani, M. (2014). La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: historia, tipos y funciones de los drones letales. *Cuestiones Políticas* 30 (52): 46-89.
- Jacobson, M. Z. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press, 556 p.
- Quiroz-Amoroso, J.N. (2017). *Métodos alternos para realizar sondes en la baja atmósfera*. Tesina de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (México). 70 p. (copias disponibles en pdf).
- Remtech And Radian Electronics System, (2003). *Operation and maintenance manual for the PA1, PA2, PA1-LR, and RASS*. Remtech, 117 p.
- Souch, C. y S. Grimmond (2006). Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography* 30 (2): 270-279.
- Stewart, I.D. y T.R. Oke (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93 (12): 1879-1900.
- Stull B. R. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 670 p.
- UNEP. (2013). *Global environmental alert service (GEAS)*. Consultado el 27 de noviembre 2016: http://www.unep.org/pdf/UNEP-GEAS_MAY_2013.pdf
- Voss, P. B., Zaveri, R. A., Flocke, F. M., Mao, H., Hartley, T. P., & DeAmicis, P. (2010). Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (15): 7137–7159.

Manuscrito recibido: 6 de enero de 2023
 Recepción del manuscrito corregido: 28 de febrero de 2023
 Manuscrito aceptado: 3 de marzo de 2023