

ASPECTOS DESCRIPTIVOS DE LA CIRCULACION EN LA CAPA LIMITE ATMOSFERICA DEL VALLE DE ABURRA

Juan David Pérez Arango ¹, Carlos Alberto Palacio Tobón ² y José Fernando Jiménez Mejía ³

¹Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Profesor Asistente, Grupo ISAll – Innovación y Sostenibilidad Aplicadas a Infraestructuras en Ingeniería, Facultad de Ingenierías – Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, jdperez@elpoli.edu.co

²PhD en Ingeniería, Magister en Ingeniería Civil, Ingeniero Civil. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, GIGA, Universidad de Antioquia, cpalacio@udea.edu.co

³ Ph.D(c) en Ingeniería, Magíster en Ingeniería, Ingeniero Civil. Profesor Asociado, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional, E-mail: jfjimene@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Carrera 80 No 65-223, Medellín – Colombia

RESUMEN

El estudio de la capa límite atmosférica es fundamental para comprender los fenómenos atmosféricos a escala local y sus interrelaciones con otros aspectos, como la dispersión de contaminantes en la atmósfera, el efecto del cambio en los usos del suelo sobre el comportamiento de la atmósfera, entre otros. Este artículo presenta algunos aspectos descriptivos de la circulación de los vientos a escala local en los primeros 1000 metros de la capa límite atmosférica del Valle de Aburrá a través de una aproximación conceptual, del trabajo experimental en campo y de la modelación básica con RAMS. Se describen variables como la temperatura, la presión, la humedad relativa y la velocidad del viento. Los resultados obtenidos muestran algunos elementos importantes de la circulación local en términos de estas variables y señala la urgente necesidad de incurrir en procesos de observación continua y modelación de la atmósfera local.

Palabras clave: Meteorología, capa límite atmosférica, sistemas de viento de montaña

Recibido: 15 de Abril de 2011. Aceptado: 17 de Noviembre de 2011.

Received: April 15th, 2011. Accepted: November 17th, 2011.

DESCRIPTIVE ASPECTS ON ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER CIRCULATION OVER THE VALLE DE ABURRA

ABSTRACT

Atmospheric Boundary Layer research is necessary to understand atmospheric phenomena at local scales and its relationships with several aspects as pollution dispersion on the atmosphere or the effects of land use changes on the atmosphere behavior. This paper shows some descriptive aspects on wind circulation at local scale at the first 1000 meters of the atmospheric boundary layer over the Valle de Aburrá through a theoretical approximation, some field experiments and some basic atmospheric modeling with RAMS. Temperature, pressure, relative humidity and wind velocity are described. The results show some important aspects on local circulation related to these variables and point out the need of a continuous measuring and modeling of the local atmosphere.

Keywords: meteorology, atmospheric boundary layer, mountain wind systems.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la capa límite es altamente complejo e incluye una serie de variables cuyo comportamiento es difícil de predecir y estudiar. La circulación en la capa límite es descrita en general por el comportamiento de los vientos, los cuales se mueven según la estructura misma de la atmósfera, la cual en la capa límite varía notablemente en el tiempo y en el espacio a escalas muy pequeñas, respondiendo a los forzamientos de ésta en una escala de una hora o menos [1]. La naturaleza turbulenta de la capa límite debido al contacto directo con la superficie y sus rugosidades variables, es una de las características más importantes de ésta [2].

El trabajo de Adarve y Molina [3], es tal vez la primera aproximación al estudio de la circulación de vientos en el Valle de Aburrá, a partir de datos tomados en superficie. En él se resalta que la circulación en el valle es predominantemente del norte. Ríos [4], hace una primera aproximación al estudio de la inversión térmica mediante el modelo de Whiteman [5]. Mejía [6] plantea un modelo conceptual de la circulación en el Valle de Aburrá, para condiciones de verano y se hace un compendio de las ecuaciones fundamentales para el estudio de la circulación y del comportamiento de la capa límite atmosférica, entre otros aspectos vinculados a los procesos atmosféricos, como el efecto de la topografía o el efecto del urbanismo. Para las condiciones asumidas por Mejía [6], se propone un modelo de circulación diurna en el que las corrientes son predominantemente ascendentes desde el norte del valle hacia el sur recorriendo los cañones correspondientes a las subcuencas más importantes. Otros estudios más recientes como el realizado por el Grupo de Investigaciones Ambientales, GIA de la UPB [7] y el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA de la Universidad de Antioquia [8], han avanzado en el entendimiento del modelo RAMS y su aplicación a las condiciones locales de circulación. Los resultados de los trabajos de Rendón [9], Pérez [10] y Correa et al. [11], aportan elementos de análisis importantes para el entendimiento de la atmósfera local.

El panorama a nivel nacional es semejante, y las publicaciones y resultados de investigaciones conocidas son relativamente pocas [10]. A nivel mundial el estudio de la capa límite desde el punto de vista teórico y experimental así como los

modelos usados para tratar de representar la realidad aborda temas muy amplios y está representada en un vasto número de publicaciones [10].

Este artículo presenta algunos aspectos descriptivos de la circulación de los vientos a escala local en los primeros metros de la capa límite atmosférica para el Valle de Aburrá a través de una aproximación conceptual, de un trabajo experimental que enmarca la medición de algunas variables atmosféricas y finalmente un ejercicio de modelación básica de la circulación en la atmósfera con el modelo RAMS.

2. METODOLOGIA

El desarrollo de este trabajo tiene tres componentes fundamentales que constituyen el estudio del problema en cuestión. Estas tres componentes son la componente conceptual, que da la base teórica del problema, la componente experimental que comprende la adquisición de información en campo y la componente de modelación que permite reconocer aquellos patrones o características evaluadas en los otros dos elementos y aproximarse a una representación físico matemática de la realidad a través de un modelo.

2.1 Componente Conceptual

La estructura de la Capa Límite Atmosférica en adelante CLA, está constituida de manera general por dos regiones, una región interna y una externa (Ver Fig. 1). En la región externa el flujo depende muy poco de la naturaleza de la superficie mientras la fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra puede ser importante; esta región se conoce como la capa *Ekman*. En la capa interna, conocida también como capa superficial, el flujo es altamente dependiente de las características de la superficie y se ve poco afectada por los efectos de la rotación [2]

Para las regiones de altas presiones se reconocen tres componentes fundamentales de la capa límite que son: la capa de mezcla, la capa residual y la capa límite estable, además de una capa superficial [1]. El caso de estudio presentado en este trabajo de investigación toma de esta teoría algunos conceptos para interpretar algunos de los resultados obtenidos.

El estado de la capa límite puede estudiarse a partir de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. Son varias las ecuaciones que

conforman el fundamento de la meteorología de la capa límite: la ecuación de estado, las leyes de la termodinámica, y las ecuaciones de conservación de masa y momentum entre otras. En este trabajo el desarrollo de las ecuaciones se basa en lo publicado por [1], [12], [13]. A partir de estas se llega al desarrollo de las ecuaciones correspondientes a la temperatura virtual, la temperatura potencial y la temperatura potencial virtual, las cuales son fundamentales para la definición de la estabilidad atmosférica, que en definitiva se relaciona directamente con los procesos de circulación.

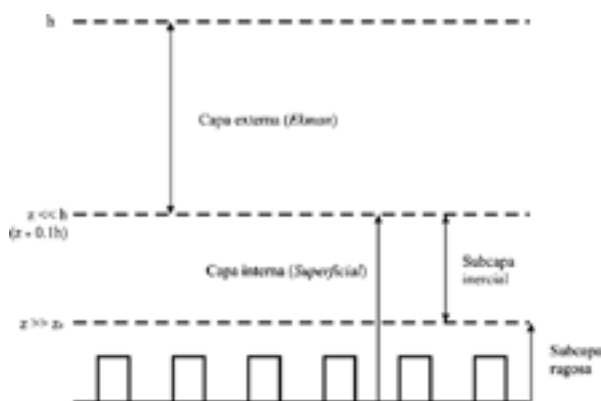


Fig.1. Estructura esquemática de la capa límite atmosférica para flujo aerodinámicamente rugoso en condiciones de estabilidad neutra. En el diagrama, h es la profundidad de la capa límite, z es la altura y z_0 es una longitud característica de la rugosidad Adaptado de [2].

La temperatura virtual es la temperatura de una muestra de aire seco a la misma densidad y presión de una muestra de aire húmedo a temperatura T y puede definirse así:

$$T_v \approx T(1 + 0.608 \omega_v) \quad (1)$$

Donde ω_v es la relación de mezcla de vapor de agua. Un parámetro muy importante usado en este estudio es la *temperatura potencial virtual*, concepto que se relaciona con la *temperatura potencial*, la cual se define como la temperatura que alcanzaría una parcela de aire no saturado si se trasladara adiabáticamente desde su posición hacia abajo, hasta una presión de 1000 mb. De aquí que la temperatura potencial del aire húmedo se define como [13]:

$$\theta_{p,m} = T \left(\frac{1000mb}{p_a} \right)^{\kappa(1-0.25\omega_v)} \quad (2)$$

Donde p_a es la presión del aire húmedo; $\kappa = R'/c_{p,d} = 0.0286$; $R' = 287.04 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$; $c_{p,d}$ es el calor específico del aire seco a presión constante. En ausencia de vapor de agua $\omega_v=0$ y $p_a = p_d$ por lo que la ecuación (2) da lugar a la temperatura potencial del aire seco por lo que se transforma en:

$$\theta_p = T \left(\frac{1000mb}{p_d} \right)^{0.286} \quad (3)$$

De acuerdo con Jacobson [13], la ecuación 3 puede ser usada para calcular la temperatura potencial del aire húmedo. Sin embargo Stull [1] sugiere incluir el valor de la humedad dado que se puede incurrir para algunos casos en errores considerables. Por lo tanto la temperatura potencial virtual (θ_v) permite hacerlo de manera apropiada.

$$\theta_v = T(1 + 0.608 \omega_v) \left(\frac{1000mb}{p_a} \right)^{\kappa} = T_v \left(\frac{1000mb}{p_a} \right)^{0.286} \quad (4)$$

Con este parámetro es posible determinar la estabilidad estática de una atmósfera húmeda no saturada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial z} \begin{cases} < 0 \text{ inestable no saturada} \\ = 0 \text{ neutra no saturada} \\ > 0 \text{ estable no saturada} \end{cases} \quad (5)$$

Como se observa en la ecuación (4) la temperatura potencial virtual, θ_v , depende de la temperatura virtual T_v , que a su vez es función de ω_v de acuerdo a la ecuación (1), y el valor de ω_v es función de la presión de vapor y la presión del aire. En este caso de estudio sólo se conoce la presión del aire y la presión de vapor se deduce a partir de la humedad relativa registrada en los aparatos mediante la siguiente relación:

$$p_v = \frac{f_r p_{v,s}}{100\%} \quad (6)$$

Donde f_r es la humedad relativa (%) y $p_{v,s}$ es la presión de vapor de saturación que obedece a la siguiente expresión:

$$p_{v,s} = 6.122 \exp \left[6816 \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T} \right) + 5.1309 \ln \left(\frac{273.15}{T} \right) \right] \quad (7)$$

Donde la temperatura T está dada en kelvin y la $p_{v,s}$ en milibares. Así el cálculo de la temperatura potencial virtual a partir de los registros de temperatura, humedad y presión se realizaron de la siguiente manera:

- Se calcula la presión de vapor de saturación usando la ecuación (7), que depende de la temperatura absoluta registrada T .
- Se calcula la presión de vapor mediante la ecuación (6).
- Con el valor anterior y la presión registrada, se calcula la relación de mezcla de vapor de agua basados así:

$$w_v = 0.622 \left(\frac{p_v}{p_a - p_v} \right) \quad (8)$$

Siendo p_a la presión de vapor del agua

- Dada ω_v se estima la temperatura virtual T_v usando la ecuación (1)
- Con el valor de T_v se estima la temperatura potencial virtual θ_v mediante la ecuación (4).

Estimado el valor de la temperatura potencial virtual y a partir de la ecuación hidrostática integrada con la suposición de que la temperatura varía linealmente con la altura, se asigna a una altura determinada el valor temperatura correspondiente, obteniendo unos perfiles que permiten identificar el grado de estabilidad estática de la atmósfera a partir de la ecuación (5). Tales condiciones de linealidad en el comportamiento de la temperatura no se cumplen en todos los casos debido a variables como la radiación, la presencia de lluvias aisladas que generan gradientes de presión, los procesos de convección, entre otros.

2.2 Componente Experimental

De las observaciones registradas mediante ambos métodos se obtuvieron series de datos que permiten analizar de manera general el

comportamiento de la capa límite atmosférica local en las condiciones propias del tiempo en que se realizaron. Dicho comportamiento está influenciado por múltiples factores difíciles de predecir y de analizar, siendo muy importante la forma del valle, las condiciones meteorológicas y climatológicas, el forzamiento térmico por efecto de las coberturas del suelo, entre otras. El diseño y ejecución de campañas de medición de variables atmosféricas es un área de la investigación meteorológica incipiente en Colombia, razón por la cual se ha empezado a implementar una metodología de medición de variables atmosféricas en el Valle de Aburrá, apoyados en técnicas conocidas que se espera contribuyan al objetivo ya mencionado [8].

El Valle de Aburrá es un valle localizado sobre la Cordillera Central de los Andes, en el centro - sur del departamento de Antioquia (Figura 2). Conformando la cuenca del río Medellín y sus afluentes, está orientado en la dirección sur - noreste. Su longitud aproximada a lo largo del río es del orden de 80 km y su ancho es variable, con una zona muy amplia en el centro de la ciudad de Medellín. Su altura varía entre los 1100 y los 3000 msnm, con pendientes que varían entre el 0% y el 50%, lo que hace del valle una zona con una topografía compleja.

El principal objetivo de las mediciones en campo es conocer el comportamiento general de la atmósfera local. En este estudio, una campaña de medición tiene dos componentes. La primera está relacionada con la medición de las variables atmosféricas presión, temperatura y humedad relativa y se llevó a cabo usando un globo cautivo al cual se sujetaron 7 data loggers a lo largo de la cuerda para el registro de dichas variables. Estos equipos hicieron registros cada 15 segundos, con precisiones de una cifra decimal para la temperatura en °C, 8 cifras decimales en la medida de la Humedad Relativa en %, y de tres cifras decimales en la medida de la presión en bares. La separación entre cada uno de los *data loggers* varía entre 100 y 150 metros, alcanzando una altura máxima que está alrededor de los 1000 metros sobre el nivel del piso del valle. Este método tiene la ventaja de que se pueden registrar continuamente los valores de las variables asociados a una altura determinada y de manera simultánea. Sin embargo la operación del globo cautivo en una ciudad como Medellín donde el tráfico aéreo es tan alto, hace necesario que las

campañas sean programadas en los días en los que el tráfico disminuye.

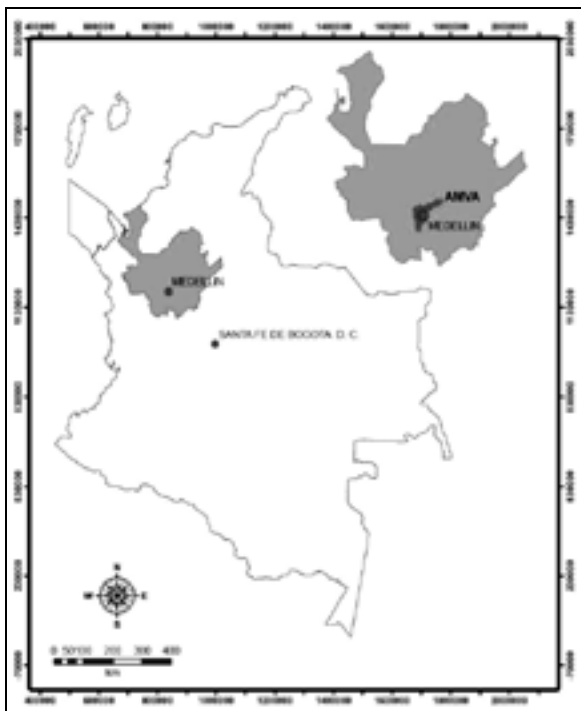


Fig 2. Localización de la zona de estudio

La segunda componente de la campaña comprende la medición perfiles verticales de viento que se realizaron con el método de los globos piloto. Este método ha sido ampliamente usado en meteorología para fines semejantes [5], [14], [15], [16], [17], [18]. De esta manera es posible observar el perfil de vientos hasta alturas de varios miles de metros. Sin embargo con este método es difícil hacer observación cuando hay nubosidad y/o en las horas de la noche. El punto seleccionado para la realización de las campañas fue la cancha de fútbol de la Universidad de Antioquia UdeA; este punto se encuentra cerca del eje del valle a una altura del orden de 1500 msnm, que es representativa de la altura media del mismo (Figura 3). La selección del punto de medición estuvo sujeta a los permisos que otorga la Aeronáutica Civil para llevar a cabo este tipo de experimentos.

Se realizaron dos jornadas de medición. La primera jornada estuvo constituida por tres campañas de medición que incluyen las dos componentes mencionadas anteriormente (globo cautivo y globos piloto) y fueron realizadas los días 5, 12 y 19 de febrero de 2006 en la Universidad de

Antioquia. La segunda jornada estuvo constituida por una campaña de medición en la que se midió la velocidad del viento en la Universidad de Antioquia y al sur del valle en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (Figura 3) el día 24 de febrero de 2007, de modo que se obtuvo esta variable simultáneamente en dos puntos del valle.

2.3 Componente de Modelación

El RAMS es un modelo meteorológico de tipo numérico desarrollado en la Colorado State University, para simular y predecir fenómenos meteorológicos. El modelo RAMS es apto para trabajar en un área limitada de la superficie terrestre, y puede simular fenómenos a pequeña escala tales como tornados, remolinos, flujos de viento entre valles, flujos turbulentos entre edificios, etc. Se eligió el modelo RAMS dada la experiencia adquirida previamente en el grupo GIGA y el fácil acceso al modelo. Sin embargo existen otros modelos que tienen iguales o mejores características para representar los procesos en la capa límite atmosférica.

En RAMS se modela con un dominio cuadrado y el modelo tiene la capacidad de simular procesos a diferentes escalas, gracias a una técnica de mallas anidadas (entendiendo por malla la zona de la atmósfera que se está simulando, la cual a su vez es dividida en una serie de celdas donde se resuelven las ecuaciones de movimiento). En este proceso, se ejecuta el modelo con varias mallas interactivas, una dentro de otra, de modo que la malla más fina resuelve los sistemas atmosféricos de pequeña escala, mientras que simultáneamente la malla más grande simula los procesos atmosféricos a escala sinóptica. Una descripción detallada del modelo puede estudiarse en [19]

Para la implementación del modelo RAMS en un dominio específico se requiere indispensablemente la siguiente información: topografía, tipo de vegetación, temperatura de la superficie marina e información de modelos globales (tanto para las condiciones iniciales como para las condiciones de frontera). El objetivo de este artículo no está en describir en detalle la información utilizada ni las parametrizaciones utilizadas Pérez [10], hace una descripción más amplia del modelo y su uso en este trabajo

Con la información cartográfica del departamento de Antioquia se construyó un modelo digital de terreno inicial con resolución de 3 segundos de

arco. Así mismo se utilizó un mapa de coberturas del suelo reclasificado para RAMS. Con el fin de obtener una resolución espacial que permita resolver los procesos atmosféricos a escala local, se recurrió el anidamiento de dos mallas dentro de la malla matriz, de manera que se pudieran obtener unas buenas condiciones de frontera para la malla que incorporará la topografía local a escala 1:100.000, es decir que el modelo de elevación digital resultante tiene celdas del orden de 90 metros. La malla 1 es de 202 x 202 celdas con un tamaño de celda de 8 km, la malla 2 es de 102 por 102 celdas con un tamaño de celda de 2 km y la malla 3 es de 82 x 82 celdas con un tamaño de celda de 500 m, todas con centro en las coordenadas de la Universidad de Antioquia. En la escala temporal se modelaron 31 horas para cada caso a fin de tener disponibles unas horas

previas y unas horas posteriores. Los días modelados corresponden al 5, 12 y 19 de febrero de 2006. Las horas en que se llevó a cabo la modelación se muestran en la Tabla 1, considerando que la UTL es igual a la UTC-5.

Tabla 1. Tiempos de Modelación en RAMS según el día modelado.

Día	Inicio (UTC)	Finalización (UTC)	Intervalo Analizado (UTC)
050206	0502 00:00	0602 0600	0502 12:00 0502 23:00
120206	1202 00:00	1302 0600	1202 12:00 1202 23:00
190206	1902 00:00	2002 0600	1902 12:00 1902 23:00

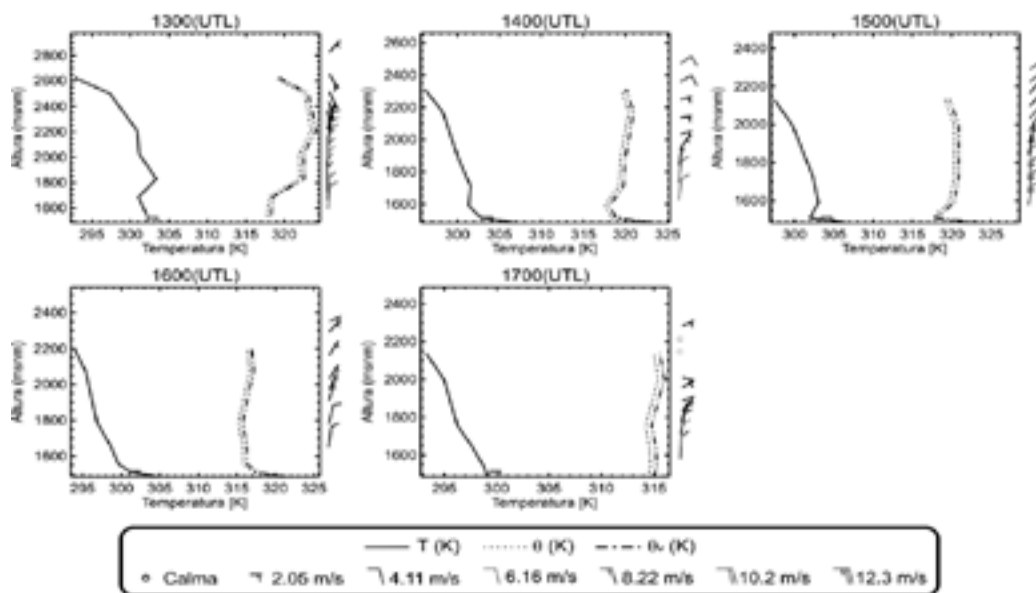


Fig 6. Perfiles de temperatura del aire, temperatura potencial y temperatura potencial virtual registrados el día 19 de febrero de 2006 entre las 13 y las 17 horas.

3. RESULTADOS

3.1 Primera jornada de medición. 5, 12 y 19 de Febrero de 2006

Aunque se obtuvieron perfiles detallados de temperatura y humedad y las respectivas variables mencionadas en el numeral 2, es decir la temperatura potencial y la temperatura potencial virtual, para cada día de medición y hora tras hora desde las 7 de la mañana y hasta las 5 de la tarde,

sólo se presentan algunos resultados. La figura 6, presenta los perfiles de temperatura para el día 19 de febrero acompañadas de los perfiles de velocidad del viento, en algunas horas del día. La Figura 7 presenta para esa misma condición el diagrama de Viento Zonal, Viento Meridional y Temperatura Potencial. En los registros del 19 de febrero se puede observar lo siguiente: entre las 0700 (UTL) y las 0900 (UTL) se observa una marcada tendencia de la atmósfera a permanecer

estable no saturada (no mostrado en la figura), con una zona en la parte superior a una altura de aproximadamente 2200 msnm (unos 700 metros sobre el nivel del piso del valle) en la que se observa una capa neutral. A partir de las 10 AM los perfiles presentan una dinámica menos uniforme, con algunas zonas neutras, otras estables y otras inestables de acuerdo a la definición dada en la ecuación (5). Por lo general las pendientes de las rectas que representan el gradiente de temperaturas potenciales virtuales asociadas a los tramos de inestabilidad están más cercanos a la condición neutral que a la condición de alta inestabilidad. Es particular el comportamiento de la temperatura en la hora 1300 (UTL) en la que se observa la mayor variabilidad. Este comportamiento también se evidencia el día 5 de febrero, con algunas diferencias que obedecen a los valores de radiación que fueron menores. Para el 12 de febrero el comportamiento de los perfiles de temperatura es semejante al observado el día 19. En la figura 7, los dos primeros esquemas corresponden a las componentes zonal y meridional del viento, mientras que la tercera corresponde a la evolución del perfil de temperaturas en el tiempo.

En el caso del 19 de febrero se observa un flujo de aire desde el este, lo cual se observó en los otros dos días de medición. En relación con el viento meridional, la figura muestra la formación de unos flujos del norte que son más comunes a lo largo del día, con unas velocidades mayores a 3 m/s a las 0800, 1000, 1500 y 1700 UTL y la aparente formación de un flujo positivo del sur en las horas de la tarde y en la parte más alta representada en la figura (del orden de 800 a 1000 metros sobre el nivel del valle).

El diagrama de temperatura presenta consistencia con el diagrama anteriormente presentado. Una mirada a la evolución de los perfiles de viento en altura para estos tres días evidencia la fuerte presencia de vientos del este por encima de los 2000 metros por encima del nivel del valle.

Esta característica se preserva para los tres días de medición y puede ser una señal de los vientos del este que pasan por encima del valle de Aburrá. El tema del acoplamiento de los vientos locales con los vientos de escalas superiores se ha abordado en otros trabajos [11].

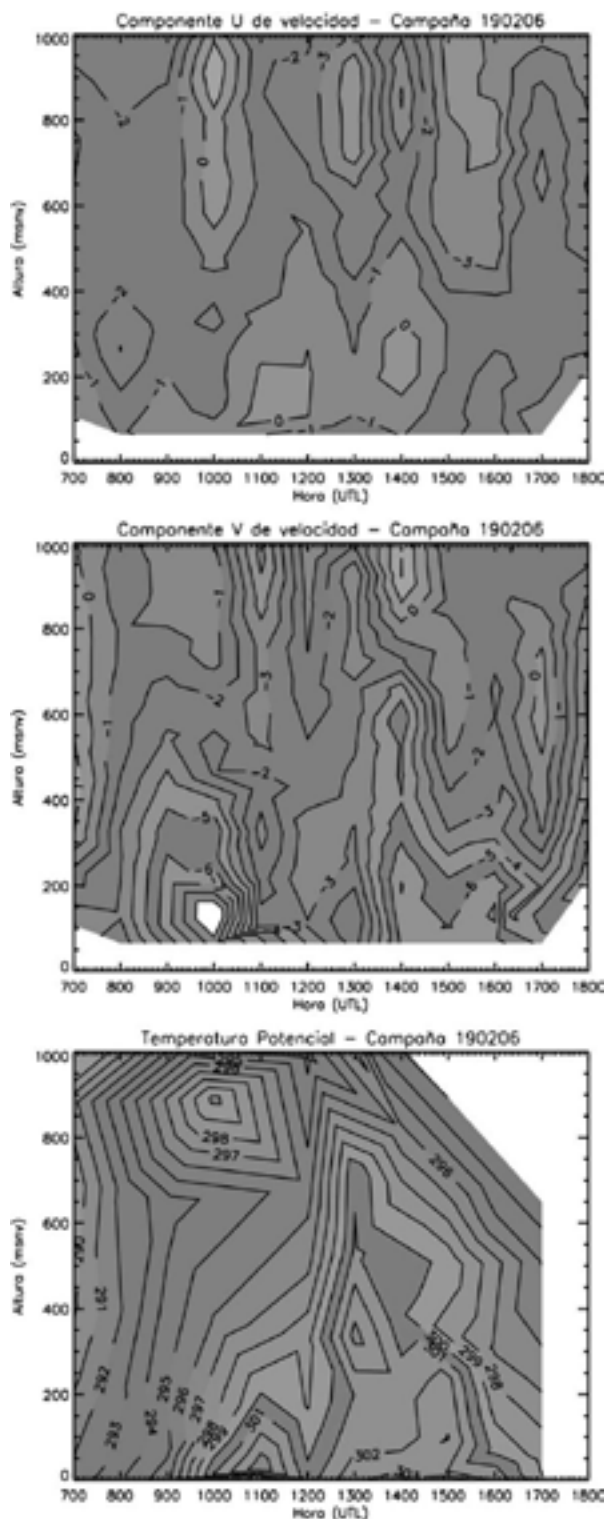


Fig 7. Viento Zonal, Viento Meridional y Temperatura Potencial para la campaña del 19 de febrero de 2006. Las magnitudes de las velocidades están dadas en m/s.

Se observa como en las primeras horas de la mañana (entre las 0700 y las 0900 UTL) existen unos flujos de viento que van preferentemente de sur a norte, con un debilitamiento en la zona centro que ha mostrado un comportamiento especial en las diversas modelaciones realizadas.

Entre las 1000 y las 1100 se observa la formación de una región de divergencia en la zona central, y después del mediodía se inician flujos ascendentes por el valle en dirección norte-sur, los cuales presentan magnitudes mayores que cualquier otro campo de vientos modelado en los días 5 y 12 de febrero.

Esto puede explicarse en parte por los procesos radiativos que se hayan dado en el valle para ese día. A partir de la 1600 (UTC) se observa un debilitamiento de los vientos hasta el final de la tarde cuando se aparecen al sur vientos débiles que soplan en dirección norte. En este sentido se puede decir que para este día en particular, el comportamiento de los vientos al interior del valle coincide con lo planteado por Whiteman [20] en relación a los vientos térmicos, aún superando por algunas horas el forzamiento que el centro de la ciudad puede hacer como modulador de la circulación local.

Adicionalmente se calculó el error de estimación del modelo para variables puntuales (Presión, Temperatura y Humedad Relativa) a partir de las ecuaciones que presenta Pielke [19]. El parámetro E es el error cuadrático medio, el E_{UB} es un error cuadrático medio corregido, y σ y σ_{obs} son las desviaciones estándar de las predicciones y de las observaciones respectivamente. Se dice que el modelo predice adecuadamente los valores puntuales si (1) $\sigma \approx \sigma_{obs}$ (2) $E < \sigma_{obs}$ y (3) $E_{UB} < \sigma_{obs}$. Esta forma de analizar los errores ha sido usada por diversos autores [19 pág. 464]. La tabla 2 presenta estos errores.

Tabla 2. Análisis de error en la predicción de la temperatura, la presión y la humedad relativa superficiales para el 19 de febrero

Variable	E	E_{UB}	σ	σ_{obs}	E_{UB}/E	E_{UB}/σ_{obs}
T [K]	7.12	2.66	1.78	3.7	0.37	0.72
P [hPa]	2.59	1.75	1.39	1.88	0.68	0.93
HR [%]	42.03	18.73	7.18	13.17	0.45	1.42

Las tres variables exhiben errores E que son mayores al valor de σ_{obs} , siendo mucho mayor el asociado a la humedad relativa. Para el valor de E_{UB} sólo la temperatura y la presión se encuentran por debajo del valor de σ_{obs} pero aún así ninguna de las tres variables cumple los criterios establecidos para decidir si el modelo tiene o no la capacidad de predecir adecuadamente los valores puntuales.

La figura 8 muestra como la temperatura ha sido subestimada por el modelo, pero su evolución a lo largo del día se conserva según la tendencia observada. Es necesario anotar que el uso de esta técnica para la evaluación de los errores puede ser pobre ya es posible que exista un desfase temporal y espacial en los datos comparados [1]. En general Los resultados de la modelación no son satisfactorios en relación con el modelo conceptual y con lo observado en campo para los días de medición.

Los errores de modelación están asociados a aspectos como una implementación poco precisa del modelo desde el punto de vista de las parametrizaciones usadas, ya que el alcance mismo del proyecto no permite hacer una validación o calibración lo que implicó hacer uso de las parametrizaciones estudiadas por GIGA [8], Aspectos como la radiación o la difusión turbulenta, son fundamentales en el estudio de la capa límite, y el uso de una u otra parametrización afecta enormemente los resultados. Otra posible causa de error puede estar fundada en que las condiciones de frontera asumidas no representan adecuadamente las condiciones reales del sistema modelado.

3.2 Segunda jornada de medición. 24 de Febrero de 2007

En esta jornada sólo se tomaron perfiles de velocidad de viento y datos de temperatura y presión en los puntos mencionados antes. Una muestra de los perfiles de viento observados en este día se presenta en la figura 9.

Las observaciones evidencian la concordancia de las velocidades del viento en ambos puntos de la región, siendo mayor la magnitud de estas en las horas de la tarde y para la estación de la Universidad de Antioquia. En general los flujos son del este y del sureste. La variación superficial de la presión y la temperatura es relativamente baja

entre los dos puntos de medición, siendo levemente mayor la presión en la Universidad de Antioquia entre las 07 y las 14 horas. Es evidente que la tendencia de la presión a disminuir a medida que avanza el día está presente en los dos puntos, como respuesta al efecto de la radiación sobre la superficie y al aumento de las temperaturas en ambos casos.

Correa et al. [11], reportan que la dirección de los vientos en la vertical para estos dos puntos parece estar relacionada con vientos muy fuertes del SE que entran al valle por la ladera oriental del mismo y varían con relación a la dinámica observada en la primera jornada de medición realizada en el año 2006.

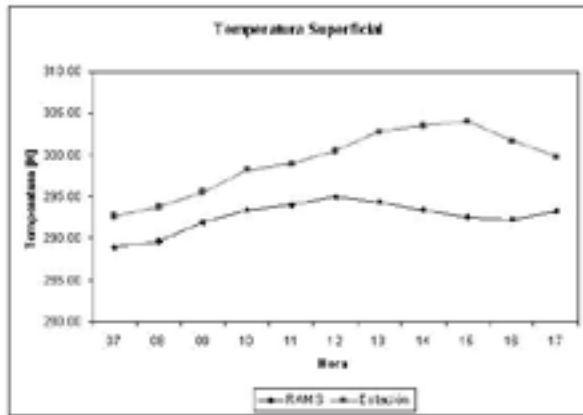


Fig 8. Comparación entre los valores de Temperatura modelados y observados para el 19 de febrero en la estación UdeA.

4. CONCLUSIONES

Es fundamental que el trabajo futuro en modelación y experimentación tenga presente la necesidad que existe de formular esquemas teóricos que permitan comprender adecuadamente lo que sucede en la naturaleza. El uso de las ecuaciones básicas para el cálculo de los perfiles de temperatura, es una herramienta necesaria para identificar el estado de estabilidad estática de la atmósfera. Es así como en este trabajo se identificaron algunos patrones de estabilidad para los días de medición en los que se estableció que en algunas horas del día la atmósfera tenía un comportamiento muy definido. Algunas veces fue estable y otras veces neutral, con presencia de atmósfera inestable en algunos casos que por lo general coincidían con horas

vespertinas en las que los vientos suelen ser más fuertes.

Los registros de viento en la vertical constituyen una novedad en el ámbito local, dado que hasta la fecha en que se realizaron las campañas no se tenían precedentes en la región, y que esto ha motivado la ejecución de nuevas campañas. Estos registros permiten identificar algunos patrones característicos de la circulación aunque de manera puntual, dada la escasez de equipos para medir simultáneamente en varios puntos. Se observa como el perfil de vientos en la Universidad de Antioquia muestra flujos que por lo general vienen del norte con algunas variaciones hacia el noreste y el este y con intensidades muy variables.

Los resultados del modelo, ponen de manifiesto la necesidad de implementar una herramienta de modelación que pueda ser verificada con la realidad. Aunque los campos de viento modelados no pueden ser comparados con ningún campo de vientos real, se observan algunos patrones vinculados a las características descritas por el modelo conceptual con algunas excepciones, sobre todo en las horas de la mañana. Se reconoce la dificultad que existe para la verificación de la validez del modelo por la escasez de información. Se hace necesario ahondar en este tipo de estudios en el Valle de Aburrá como vía expedita para implementar exitosamente modelos de comportamiento en la baja atmósfera

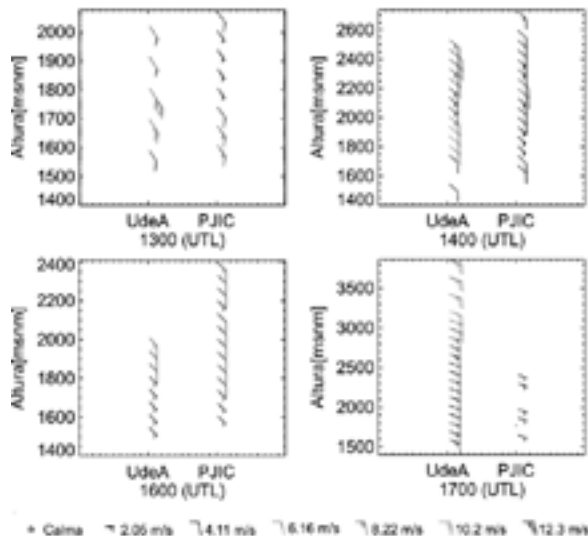


Fig 9. Perfiles de velocidad del viento para la UdeA y el PJC el 24 de febrero de 2007

Se logró un avance importante en el estudio de las condiciones atmosféricas regionales en superficie y en las primeras capas de la atmósfera, área poco explorada en el país.

5. AGRADECIMIENTOS

A GIGA por el apoyo en todas las etapas del proyecto.

A Mike Douglas y John Fredy Mejía de la NOAA, por facilitarnos los equipos de la medición de las variables meteorológicas.

Al Jefe de Aeronavegación de la Aeronáutica Civil regional Antioquia, Señor Germán Freddy Marulanda López por facilitarnos los permisos para realizar las mediciones en el espacio aéreo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Stull, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, 1988.

[2] Garrat, J. R. The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 1992.

[3] Adarve, J. C. y Molina, F. Evaluación preliminar de la circulación de vientos en el valle de Aburrá, Revista AINSA 4(1), 1984.

[4] Ríos, C.A. Procesos de Inversión Térmica en el Valle de Aburrá, Trabajo dirigido de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 2001

[5] Whiteman, C.D. Breakup of Temperature Inversions in Colorado Mountain Valleys, [PhD Thesis]. Fort Collins, CO: Department of Atmospheric Science. Colorado State University, 1980.

[6] Mejía, O. Un Modelo Estacionario de Circulación Atmosférica Diurna en el Valle De Aburrá para época de verano, [Tesis de Maestría], Medellín, Ant: Universidad de Antioquia, 2002

[7] GIA. Aplicación del modelo RAMS para el diagnóstico preliminar del medio físico atmosférico

en la jurisdicción de CORANTIOQUIA, Informe Técnico, Universidad Pontificia Bolivariana, 2003.

[8] GIGA. Estudio conceptual, numérico y computacional del modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) y adaptación de éste a las características físicas e hidrometeorológicas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA, Informe Técnico, Universidad de Antioquia, 2006.

[9] Rendón, A. M. Rompimiento de la Inversión Térmica en el Valle de Aburrá, [Tesis de Maestría], Medellín, Ant: Universidad Nacional de Colombia, 2007

[10] Pérez, J.D. Caracterización preliminar de la circulación en la capa límite atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá, [Tesis de Maestría], Medellín, Ant: Universidad Nacional de Colombia, 2008

[11] Correa, M; Zuluaga, C; Palacio, C; Pérez, J. y Jiménez J. Acoplamiento de la atmósfera libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. Caso de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. Dyna, Año 76, Nro. 158, 17-27, 2009

[12] Wallace J. M. and Hobbs P. V. Atmospheric Science. An introductory survey, Academic Press Inc, 1977.

[13] Jacobson M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling, 1st edn, Cambridge University Press., 1999

[14] Kolev I, Savov P, Kaprielov B, Parvanov O and Simeonov V. Lidar observation of the nocturnal boundary layer formation over Sofía, Bulgaria, Atmospheric Environment 34, 3223–3235, 2000.

[15] Kossmann M and Fiedler F. Diurnal momentum budget analysis of thermally induced slope winds, Meteorol. Atmos. Phys. 75, 195 – 215, 2000.

[16] Kossmann M and Sturman A P. Pressure-Driven Channeling Effects in Bent Valleys, J. Appl. Meteor. 42, 151–158, 2003

[17] Zawar-Reza P, McGowan H, Sturman A and Kossmann M. Numerical simulations of wind and temperature structure within an Alpine lake basin, Lake Tekapo, New Zealand, Meteorol Atmos Phys 86, 245 – 260, 2004

[18] Mejía F and Douglas M. Flow Around the Andean Elbow from WRF Simulations and P-3 Aircraft Measurements During the SALLJEX, in Proceedings of the 8 ICSHMO, Foz de Iguazu, Brazil, INPE, pp. 795–802, 2006.

[19] Pielke R. A., Cotton W. R., Walko R. L., Tremback C. J., Lyons W. A., Grasso L. D., Nicholls M. E., Moran M. D., Wesley D. A., Lee T. J. and Copeland J. H. A Comprehensive Meteorological Modeling System - RAMS, Meteorol. Atmos. Phys. 49, 69 – 91, 1992

[20] Whiteman C. D. Observations of Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain, in W Blumen, ed., Atmospheric Processes Over Complex Terrain. Meteorological Monographs, Vol. 23, no.45, American Meteorological Society, chapter 2, pp. 5–42, (1990).