

CLIMATOLOGÍA URBANA Y DE MONTAÑAS

CARLOS ALBERTO PALACIO

Universidad de Antioquia, Profesor, cpalacio@udea.edu.co

JOSÉ FERNANDO JIMÉNEZ

Universidad Nacional de Colombia, Profesor, jffjimene@unal.edu.co

RESUMEN: Este artículo tiene por objeto presentar en líneas muy gruesas el estado de las investigaciones sobre las condiciones de clima en las ciudades, haciendo un énfasis mayor en las condiciones urbanas de montaña. La investigación de la meteorología para los centros urbanos reclama con urgencia la atención de la sociedad colombiana, debido a la creciente concentración de población en ellos, a los serios problemas de salud asociados con deficientes condiciones de calidad del aire y al rezago de las instituciones gubernamentales en relación con la evaluación, entendimiento y gestión de los procesos atmosféricos que afectan la vida en las ciudades. Los retos son inmensos, y en varios casos ameritan un trabajo interdisciplinario y de colaboración internacional.

PALABRAS CLAVE: Climatología Urbana, Climatología de Montaña, Meteorología de Montañas

ABSTRACT: In this article, the state of research on the climatic conditions in cities, with greater emphasis on urban conditions in the mountains is presented. The study of meteorology for urban centers demands the attention of Colombian society urgently, due to the increasing concentration of population, the serious health problems associated with poor air quality conditions, and the lag of government institutions regarding to the evaluation, management, and understanding of atmospheric processes that affect life in the cities. The challenges are immense and, in some cases, demand interdisciplinary work and international cooperation.

KEYWORDS: Urban Climatology, Climatology of Mountain, Mountain Meteorology

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 2 siglos el desarrollo industrial y de los mercados ha estado asociado a un incremento porcentual de las poblaciones urbanas. En algunos casos las razones del porqué la gente se establece en las ciudades resultan bastante obvias: es allí donde se concentran los capitales y las opciones de empleo, y también son los lugares donde los servicios de salud, educación y cultura aparentemente son mejores. Pero, además, en algunos países, como en el caso de Colombia, las condiciones de vida en el campo son azarasas e inseguras, y los desplazados por la pobreza y la violencia rural llegan por miles a un territorio urbano que carece de las condiciones sociales y de infraestructura para albergarlos. De este modo, a medida que las ciudades crecen, también aumentan los problemas sociales y ambientales que afectan a masas enormes de población.

Por otro lado, se espera que las consecuencias del cambio climático global se manifiesten por doquier

en la Tierra, por mares y continentes, selvas, bosques, praderas y ciudades; pero es probable que las perturbaciones y desequilibrios asociados a él no se repartan de manera uniforme sobre la superficie del planeta (para un pronóstico de los cambios climáticos previsibles para Colombia véase [1]). Y como además de las amenazas de cambio, hay ecosistemas y poblaciones más vulnerables unos que otros, tampoco los riesgos ambientales tienen porqué distribuirse de acuerdo con un patrón geográfico uniforme. Es en las ciudades modernas, confirmamos asombrados, donde las señales de riesgo por alteración del clima podrían ser más acentuadas.

Así es cómo a los científicos y a los ingenieros les corresponde la labor de ayudar a pensar cómo se pudieran afrontar estos problemas ambientales que se nos vienen encima. No tanto para resolverlos, lo cual es un asunto más político que técnico, sino para que las sociedades (y no sólo los gobiernos) tengan elementos de juicio para atender a tiempo las dificultades que

han dejado de ser una cuestión previsible a futuro, ya que ahora están presentes. Este corto artículo tiene por objeto presentar en líneas muy gruesas el estado de las investigaciones sobre las condiciones de clima en las ciudades, pero hace un énfasis mayor en las condiciones urbanas de montaña.

2. METEOROLOGÍA DE MONTAÑAS

La meteorología de montañas tiene por objeto el estudio de los procesos que ocurren en la troposfera baja sobre terrenos montañosos, y más concretamente de aquellos que tienen lugar dentro de la capa límite y en la interacción de ésta con la atmósfera libre. El concepto de Capa Límite Atmosférica (CLA) es a veces confuso: en palabras de Garrat [2], ésta se refiere a “la capa de aire asentada sobre la superficie de la Tierra donde los efectos de superficie (fricción, calentamiento y enfriamiento) se sienten directamente en escalas de tiempo menores a un día, y donde los flujos de momentum, calor o materia son transportados por movimientos turbulentos en una escala del orden de la profundidad de la capa o menos”. En contraste con esta definición, Stull [3], otro autor clásico en la materia, considera que la CLA es “aquella porción de la troposfera baja que siente los efectos de la superficie subyacente en periodos de 30 minutos o menos”. Lo cierto es que la CLA, cuya altura puede variar entre los 100 m y 3000 m -según sean el terreno y sus alrededores, la estación y hora del día-, se interpone entre la superficie de la Tierra y la atmósfera libre (figura 1), mediando por lo general entre ellas una delgada capa estable, que en la noche se denomina *cubierta de inversión* (“*capping inversion*”) y en el día *zona de transición* (“*entrainment zone*”). La estructura térmica de la CLA está acoplada al ciclo diurno de radiación solar, de modo que los fenómenos turbulentos y de transporte en las subcapas que la componen contrastan fuertemente entre el día y la noche.

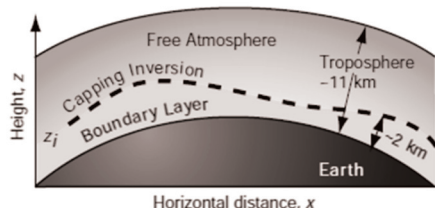


Figura 1. Estructura general de la troposfera [4]

En el día la CLA presenta una primera *subcapa superficial o rugosa*, directamente asentada sobre el terreno (que no desaparece en la noche), donde los intercambios de materia y energía calórica entre la superficie y el aire son muy significativos. Luego viene una *capa de mezcla* (CM) donde especies, partículas y contaminantes que son «emitidos en» o que «penetran dentro» de ella, se dispersan verticalmente, bien por convección o por turbulencia mecánica [5]. La distancia vertical entre el tope de la CM y el terreno se denomina *altura de la capa de mezcla* (ACM), la cual no es propiamente “una” altura sino, más bien, una función temporal de la altura, por cierto algo difícil de determinar de una manera unívoca y directa. Durante la noche la CLA tiende a estratificarse de la siguiente manera: sobre la subcapa superficial se desarrolla una *subcapa estable*, llamada así porque el aire queda atrapado en un medio estáticamente estable, agitado eventualmente por episodios de turbulencia débil e intermitente. Y entre la subcapa estable y la cubierta de inversión, se establece una *subcapa residual*, denominada así porque es un residuo de la CM, la cual disminuye su espesor en la noche mientras aumenta el grosor de la capa estable. La *subcapa residual* desaparece bajo la acción de la CM, cuando ésta evoluciona desde la subcapa superficial hasta alcanzar la zona de transición (figura 2).

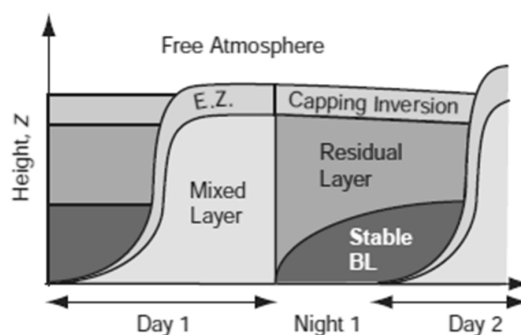


Figura 2. Diagrama de Stull [4] sobre la evolución de la Capa Límite y la Capa de Mezcla, en el día y la noche.

Las figuras (1) y (2) son ciertamente muy explicativas, pero entre ellas hay un factor común que llama la atención: no parecen considerar la existencia de los terrenos montañosos. En otras palabras, ambas figuras se refieren al concepto conocido en la literatura técnica como la “Capa Límite Planetaria”, el cual está fundado en el supuesto de flujos sobre terrenos planos y homogéneos. Este hecho no es tan sorprendente como parece, si se tiene en cuenta cómo los fundamentos de la teoría de similitud para la capa

límite ([6], [7], [8]), los trabajos sobre las patrones espectrales de la turbulencia atmosférica ([9], [10]) y hasta los primeros ejercicios de modelación numérica de diversos procesos que ocurren al interior de la capa límite, parten del mismo supuesto. Todavía hoy se recurre con relativa frecuencia a simplificaciones del tipo “homogeneidad” y “suavidad de la topografía” de los terrenos para avanzar hacia nuevas teorías, modelos o parametrizaciones, a pesar de los desarrollos más recientes en las ciencias y técnicas de la meteorología y la computación. Y aunque, la verdad sea dicha, estos supuestos no resultan ser siempre inconvenientes, a medida que se trabaja en escalas de resolución más finas o cuando la heterogeneidad del terreno es francamente determinante (como en el caso de las ciudades de montaña), se impone la necesidad de introducir refinamientos en los modelos que faciliten el análisis de las características locales de la CLA [11].

Numerosos trabajos en los Estados Unidos, Europa y China, principalmente, ponen de presente las nuevas fronteras de investigación que se abren desde la perspectiva de la meteorología de montañas; publicaciones como la del profesor D. Whiteman [12] ofrecen una excelente introducción al tema y sus variantes, sin agotarlas. Pues no es cierto que los estudios de capa límite hayan respondido todos los interrogantes generales que plantea esta teoría, y que de lo que ahora se trata es de definir la especificidad local de la capa para un lugar determinado. Para mostrar hasta qué punto esto es cierto, enumeremos, a manera de ejemplo, los objetivos generales del proyecto P8 correspondiente al programa europeo de investigación *Mesoscale Alpine Programme* (MAP; [13], [14]) sobre terrenos complejos, a saber:

- 1.) investigar los flujos turbulentos de momentum, y de los calores sensible y latente;
- 2.) contribuir a una descripción general de las capas límites;
- 3.) examinar la interacción de las capas límites alpinas y la hidrología;
- 4.) estudiar la interacción de las capas límites alpinas y los vientos (térmicos) locales;
- 5.) explorar la interacción de las capas límites alpinas y la atmósfera libre;
- 6.) investigar la influencia de los procesos de capa límite en el transporte de contaminantes.

Pero el P8 no se plantea todas las preguntas posibles, ni siquiera las más importantes. Piénsese en las líneas de investigación activas sobre capas límites urbanas (incluso para terrenos planos); piénsese en los problemas numéricos que aparecen cuando la longitud de escalamiento de la turbulencia y la dimensión característica del dominio espacial, Δ , que se usa para representar las ecuaciones de movimiento, tienen el mismo orden de magnitud, como en el problema de la *Terra Incognita* [15]; piénsese en los problemas que acarrea la medición, descripción y parametrización de las capas límites estables...Y aún hay motivos para creer que los patrones generales de evolución de las capas límites de montaña, tan bellamente descritos en la literatura, no han sido suficientemente estudiados.

3. CLIMATOLOGÍA URBANA Y DE MONTAÑAS

Las atmósferas urbanas de montaña son afectadas por los siguientes factores: latitud, altitud, continentalidad (distancia al mar), circulaciones locales y de mesoscala (de vientos y corrientes marinas) y algunas características propias del ambiente de ciudad ([12], [16], [17]), todos las cuales deben tenerse en cuenta cuando se procede al análisis de un sistema climático en particular.

Todas las ciudades, sin embargo, comparten un factor común: la alta heterogeneidad de los procesos físicos que allí tienen lugar, en gran parte atribuible a la variabilidad de las propiedades de la superficie urbana, la alta y también variada rugosidad que introducen las edificaciones, y la complejidad de los flujos de energía, momentum, especies químicas y de humedad. Para tener mejor idea de esto, la Figura 3 esquematiza la situación de la Capa Límite Urbana (CLU) en tres escalas: a) mesoscala, b) escala local y c) microescala. En el nivel de la mesoscala se distinguen las áreas rural, suburbana y urbana, cada una de ellas con distintas intensidad del mezclado turbulento y variabilidad espacio-temporal de la altura de la capa de mezcla. Al nivel de las escalas local y micro, se distingue una subcapa límite convectiva, embebida en la subcapa rugosa, pero en estricto contacto con el piso y las edificaciones; con un tope de la subcapa rugosa más alto en la ciudad, forzado a elevarse por las turbulencias, construcciones y otros elementos sobresalientes del terreno (pequeñas colinas, etc). El movimiento del aire y de las partículas en la capa convectiva es errático y,

por lo general, muy turbulento (sobre todo en las horas de sol), a la vez que su variabilidad espacio temporal es fuerte como consecuencia del contraste en los flujos de radiación que se producen en el heterogéneo territorio urbano [18].

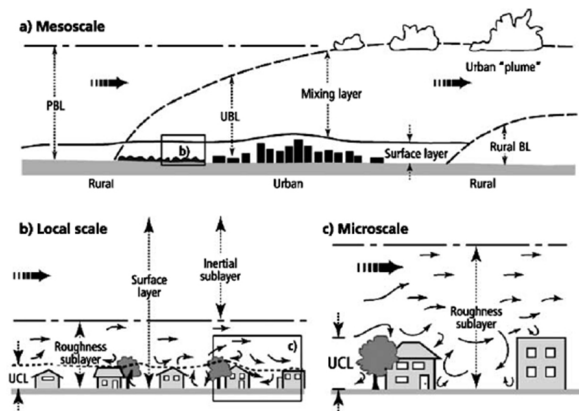


Figura 3. Estructura de la Capa Límite Urbana [19]

Con el fin de representar las transformaciones de la energía que ocurren en la escala urbana, se utiliza la siguiente expresión [20]:

$$Q^* + Q_F = (Q_H + Q_E) + \Delta Q_S \quad (3)$$

Donde los términos a la izquierda representan el balance neto de radiación solar, Q^* (suma de la radiación neta de onda corta, K^* , más la radiación neta de onda larga, L^*), más el flujo de calor antrópico que producen chimeneas, motores, vehículos, sistemas de aire acondicionado y el calor generado por el metabolismo de poblaciones urbanas, Q_F . A la derecha se encuentra el flujo turbulento de calor sensible, Q_H , y el flujo de calor latente, Q_E , más un término de particular relevancia para el balance de energía en las ciudades, denominado flujo de calor almacenado, ΔQ_S , que da cuenta de la energía calórica que fluye y se distribuye a través de edificios, vegetación, malla vial y suelo desnudo, tanto por procesos de combustión como por conducción ([18],[21]).

La importancia de la ecuación (3) radica en que permite ponderar adecuadamente los términos de balance de energía en las ciudades, tanto en la subcapa rugosa como en la capa estable y la capa de mezcla. Algunos de estos fenómenos son: “plumas urbanas”, islas de calor, inversiones térmicas, flujos de energía, circulación de contaminantes entre ciudades vecinas o al interior de

áreas metropolitanas, turbulencia y mezclado en la capa límite, vientos de origen térmico, entre otros.

Otro concepto que facilita el análisis de las atmósferas de ciudad es el de las Zonas Climáticas Urbanas (ZCU), el cual no ha parado de evolucionar desde sus orígenes ([17], [20], [22],[23]), hasta el presente. Una ZCU es un sector de la ciudad que presenta ciertas características, identificables mediante criterios objetivos, que le confieren una cierta identidad climática y territorial. En el informe de la WMO [17] se mencionan los siguientes criterios básicos para identificar las ZCU, a saber: estructura urbana (dimensiones de los edificios, espaciamiento entre ellos, ancho de las calles, espaciamiento entre calles), cobertura urbana (áreas impermeables, suelo desnudo, cobertura vegetal, cuerpos de agua), materiales urbanos (materiales naturales y de construcción) y el metabolismo urbano (fuentes externas de calor, emisión de contaminantes primarios, producción de contaminantes secundarios). Y como ninguno de los anteriores permitiría diferenciar una ZCU de otra a partir de las características propias de la topografía, habría que introducir un criterio adicional: el orográfico, según el cual los procesos en dos ZCU pueden ser significativamente distintos dependiendo de la ubicación geográfica de la ZCU (la base de un valle, la posición relativa de una ladera o de una meseta, las irregularidades del terreno en los alrededores, etc.), incluso si los otros indicadores mencionados antes fueran similares. En otras palabras, si, por ejemplo, dos ZCU, a pesar de coincidir en estructura, materiales, cobertura y metabolismo, se encuentran en laderas opuestas de un valle, podría ser conveniente considerarlas ZCU diferentes para efectos del análisis. El concepto de las ZCU no sólo es útil para el modelamiento y comprensión del clima urbano, sino también para decidir acerca de la ubicación de estaciones de medición y monitoreo atmosférico, y hasta del tipo de instrumentos que pudieran instalarse en cada zona.

El mejoramiento en la resolución espacio-temporal de los Modelos Numéricos de Mesoscala (MNM) ha permitido en las últimas décadas su aplicación a las ciudades, con más o menos fortuna, siendo el principal obstáculo a superar la modelación de los procesos que ocurren al interior del dosel urbano. En los últimos 10 años la tendencia más fuerte ha sido la de “urbanizar” los MNM existentes mediante el uso de parametrizaciones adecuadas al ambiente “ciudad”, tratando de encontrar

valores adecuados para las longitudes efectivas de rugosidad, altura de desplazamiento, profundidad de la subcapa rugosa, flujos de calor, albedo y emisividad de cada tipo de suelo [24]. Los esfuerzos más recientes para “urbanizar” algunos MNM se han logrado por medio de proyectos de cooperación científica internacional como los siguientes: i) el Proyecto COST-Action 715 (*Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems*), cuyo Grupo-2 se dedicó específicamente a discutir los problemas relacionados con el balance de energía superficial y la ACM urbana [18]; ii) el proyecto europeo FUMAPEX, concebido para la integración de sistemas de predicción de la meteorología urbana y de la polución del aire [25]; iii) el proyecto cooperativo europeo ACTION 728 [26], con el cual se buscaba desarrollar sistemas computacionales que aumentaran las capacidades de modelamiento meteorológico de mesoscala orientadas al estudio de la dispersión y la polución del aire; iv) el proyecto para acoplar el *Weather Research and Forecasting* (WRF) a ambientes urbanos [27], con el objeto de mejorar las capacidades de este modelo en operaciones de predicción atmosférica, respuesta a emergencias, modelamiento de la calidad del aire, hidrología y evaluación de los recursos hídricos en las ciudades.

Los esquemas generales disponibles para representar el dosel urbano en los MNM pueden clasificarse en cuatro categorías:

- a.) Modelos de columna o tableta (*slab/bulk type*).
- b.) Modelos de una sola capa.
- c.) Esquemas de múltiples capas.
- d.) Modelos de microescala (*Large Eddy Simulation, Reynolds-Averaged Navier-Stokes*).

Los dos primeros son más simples de acoplar a los MNM corrientes, mientras el tercero y el cuarto requieren información detallada de la morfología de vías y edificaciones, cobertura y humedad del suelo, dinámica de las poblaciones urbanas, entre otras variables.

4. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN EN COLOMBIA

La investigación de la meteorología para los centros urbanos reclama con urgencia la atención de la sociedad colombiana, debido a la creciente concentración de

población en ellos, a los serios problemas de salud asociados con deficientes condiciones de calidad del aire y al rezago de las instituciones gubernamentales en relación con la evaluación, entendimiento y gestión de los procesos atmosféricos que afectan la vida en las ciudades. Por lo demás, las universidades y otras instituciones se han dedicado más al estudio de procesos atmosféricos en la escala sinóptica y de mesoscala tipo- α , que a los fenómenos de escala local o regional, los cuales prácticamente siguen estando ausentes en las publicaciones, los congresos y demás eventos académicos. Sólo en los últimos años empieza a perfilarse con mayor fuerza la importancia que tienen estos trabajos, aunque el nivel de interlocución entre los diferentes grupos de especialistas es bastante pobre y, a menudo, discordante.

Tomemos por caso los trabajos que se han desarrollado en Antioquia, específicamente en el Valle de Aburrá. El artículo de Adarve y Molina [28] es una aproximación preliminar a los vientos de origen térmico, basada en datos de superficie, donde se confirma que el viento diurno asciende en días secos a lo largo del valle, de modo que ingresa a la zona metropolitana por el ramal noreste. Casi 20 años después, Mejía [29] planteó un modelo conceptual de la circulación en el Valle de Aburrá para condiciones secas (es decir, en ausencia de lluvias), e identificó las ecuaciones fundamentales para el estudio de la circulación térmica en la capa límite, teniendo en cuenta algunos aspectos relacionados con la topografía y la malla urbana. Un paso adelante acerca del tema de la circulación de vientos a escala local lo dio Pérez ([30], [31]), quien hizo una aproximación conceptual para el Valle de Aburrá utilizando datos de viento y perfiles de temperatura en los primeros 1000 metros de la capa límite atmosférica, basado en simulaciones numéricas con RAMS (*Regional Atmospheric Modelling Systems*). Otro trabajo interesante es el de Correa et al. [32] donde se analiza la interacción y acoplamiento del viento geostrófico con patrones de circulación al interior del Valle de Aburrá, a partir del análisis de datos horarios de algunas variables atmosféricas. Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren la posible canalización de vientos de mesoscala, inducida por presión y el transporte descendente de momento, al interior del Valle de Aburrá. Luego Hernández [33] hizo un análisis por agrupamiento de las trayectorias que siguen las masas de aire con destino a la baja, media y alta

atmósfera sobre el Valle de Aburrá. Gran parte de estos trabajos han sido realizados por parte del grupo GIGA de la Universidad de Antioquia.

Otra línea de investigación que ha recibido alguna atención en el Valle de Aburrá, es el de las inversiones térmicas. Este fenómeno, que se da con cierta intensidad en todos los valles del mundo, y que no es otra cosa que la ocurrencia de una subcapa estable en la troposfera baja, tiene especial importancia en las zonas urbanas, donde la polución atmosférica puede alcanzar niveles críticos como consecuencia de las restricciones mecánicas a la movilidad del aire. Con el propósito de hacer una primera aproximación a las inversiones térmicas en el Valle de Aburrá, Ríos [34] corrió un modelo puntual basado en un trabajo de previo de Whiteman [35]. Posteriormente, Rendón ([37], [38]) amplió los alcances de este estudio mediante un modelo distribuido para la inversión térmica en el valle, que permitió involucrar la variabilidad topográfica, los albedos reales de la superficie, la variación temporal y espacial de la radiación solar y la influencia de los procesos atmosféricos que tienen lugar en el Valle. En su actual trabajo de investigación doctoral, Rendón se ha dedicado más de lleno al estudio de los procesos que tienen lugar en la interfase suelo-atmósfera, en particular aquellos relacionados con el balance de energía superficial y con la ocurrencia de fenómenos como inversión térmica e isla de calor, en el Valle de Aburrá.

En la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, se resalta la labor del Grupo de Láser y Espectroscopia Óptica, el cual ha avanzado en la configuración de un conjunto de sensores remotos para el monitoreo de la atmósfera de Medellín ([39], [40]). Por su parte el grupo CICLICO de la Facultad de Minas, sin descuidar las investigaciones en clima regional [41] ni los trabajos de medición y monitoreo ([42], [43]), también se ha involucrado en proyectos de educación en temas de clima y meteorología con comunidades escolares y urbanas ([44], [45]) y en el estudio dinámico y termodinámico de la atmósfera del Valle de Aburrá ([46], [47]).

El lector sabrá disculpar la ausencia de referencias sobre trabajos que se hayan hecho o estén marcha en otras ciudades colombianas, pues nuestra información al respecto es escasa e incompleta. Tenemos la certeza de

que se avanza en este tipo de investigaciones en varios sitios del país, pero no nos es posible identificar con claridad las áreas específicas de interés y el modo como se dan las interacciones entre universidades, gobierno central, administraciones regionales y municipales, instituciones ambientales y grupos ambientalistas. Dada la importancia del tema, nos parece que eventos como los Congresos Colombianos de Meteorología, o los Congresos Nacionales sobre Calidad del Aire, podrían favorecer tanto el desarrollo científico en estas materias como el mutuo reconocimiento y sinergia entre grupos.

5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y FUTUROS DESARROLLOS

Las condiciones urbanas y de montaña plantean dificultades adicionales a las que de por sí afrontan los estudios de la capa límite atmosférica. De hecho, tanto las ciudades como los terrenos montañosos corresponden a la categoría que los meteorólogos denominan de terrenos complejos, cuyo estudio, en tanto que área diferenciada, ha crecido en interés durante la segunda mitad del siglo XX hasta el presente ([19], [20], [47], [48], [49]).

Las líneas de investigación más activas en climatología y meteorología urbana cubren áreas de trabajo tan variadas como la optimización de las redes de monitoreo atmosférico, el desarrollo de nuevas tecnologías de medición, el diseño y manejo de bases de datos, el diseño de campañas de medición, la modelación física y numérica de los procesos atmosféricos e hidrológicos, el desarrollo de modelos meteorológicos con módulos acoplados para la predicción de la dispersión y producción de contaminantes en el aire, la conceptualización de diversos procesos que tienen lugar en la CLU, sobre todo en el dosel urbano y en la interacción suelo-atmósfera, las parametrizaciones de la capa límite estable (entre otras, fuertemente asociada a los picos de la concentración de los contaminantes atmosféricos). Los retos son inmensos, y en varios casos ameritan un trabajo interdisciplinario y de colaboración internacional, pero hay un rezago académico, científico y técnico evidente en estas materias en los países de la banda tropical, como puede constatarse en el caso colombiano. A este propósito dice Grimmond [19]: “la mayoría de los estudios sobre clima urbano tienden a estar enfocados en latitudes templadas, y hay varios

tipos de áreas urbanas para los cuales tenemos un conocimiento de observación reducido, notablemente en los trópicos. Es importante que la comunidad dedicada al clima urbano, cuando planea nuevos proyectos de gran envergadura, considere prioritario el estudio de estos casos en ciudades populosas”.

REFERENCIAS

- [1] Ruiz, J.F., Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (Panorama 2011-2100). Nota técnica del IDEAM, P.91. 2010.
- [2] Garrat, J.R., The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press, 316 pp. 1992.
- [3] Stull, R.B., An introduction to Boundary-layer Meteorology. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht-Boston-London, 666 pp. 1988.
- [4] Stull, R.B., The Atmospheric Boundary Layer. En: Wallace, J., Hobbs, P., 2006. Atmospheric Science: an introductory survey, Capítulo 9. 2ª edición. Academic Press. 2006.
- [5] Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S., Joffre, S., Rasmussen, A., Tercier, P., Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmospheric Environment 34, 2000.
- [6] Monin, A.S., Obukhov, A.M., Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. Trans. Geophys. Inst. Akad. Nauk. USSR 151: pp. 163-187. 1954.
- [7] Willis, G.E., Deardorff, J.W., A laboratory model of the unstable planetary boundary layer. J. Atmos. Sci. 31. 1974.
- [8] Nieuwstadt, F.T.M., Turbulence structure of the stable nocturnal boundary layer. J. Atmos. Sci. 35: pp. 2202-2216. 1984.
- [9] Kolmogorov, A.N., The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Doklady AN SSSR 30: pp. 301-304. 1941.
- [10] Kaimi, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, C., Côté, O.R., Spectral characteristics of surface layer turbulence. Q. J. R. Meteorol. Soc. 98: pp. 563-589. 1972.
- [11] Rotach, W., Zardi, D., On the boundary-layer structure over highly complex terrain: Key findings from MAP. Q. J. R. Meteorol. Soc. 133: pp. 937-948. 2007.
- [12] Whiteman, C.D., Mountain meteorology: fundamentals and applications. Oxford University Press. 2000.
- [13] Emeis, S., Rotach, M.W., Working Group on planetary boundary layer (WG-PBL). MAO Newsletter 6: pp. 13-19. <http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/newsletter6.htm>. 1997.
- [14] Volker, H., Gutermann, T., Inter-domain cooperation for mesoscale atmospheric laboratories: The Mesoscale Alpine Program as a rich study case. Q. J. R. Meteorol. Soc. 133: pp. 949-967. 2007.
- [15] Wyngaard, J.C., Toward Numerical Modeling in the “Terra Incognita”. J. Atmos. Sci., 61, pp. 1816-1826. 2004.
- [16] Barry, R.G., Mountain Weather and Climate. 2ª edición. Routledge, London. 1992.
- [17] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Ginebra, Suiza, World Meteorological Organization. Capítulo 11, Parte II: Observing Systems. <http://www.wmo.ch>. 2008.
- [18] Piringer, M., Joffre, S., Baklanov, A., Christen, A., Deserti, M., De Ridder, K., Emeis, S., Mestayer, P., Trombou, M., Liddleton, D., Baumann-Stanzer, K., Dandou, A., Karppinen, A., Burzynski, J., The surface energy balance and the mixing height in urban areas – activities and recommendations of COST-Action 715. Boundary Layer Met. 124: pp. 3-24. 2007.
- [19] Grimmond, C.S.B., Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology. 84: 3-22. 2006.
- [20] Arnfield, A.J., Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int. J. Climatol. 23: pp. 1-26. 2003.
- [21] Roberts, S., Oke, T.R., Grimmond, C.S.B., Voogt, J.A., Comparison of four Methods to Estimate Urban Heat Storage. J. of Applied Meteorology. 45: pp. 1766-1781. 2006.
- [22] Ellefsen, R., Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. Energy & Buildings 15-16: pp. 1025-1049. 1990/1.
- [23] Stewart, I., Oke, T., Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. 9º Symposium on Urban Environment, Agosto 2-6, Keystone, CO (USA). 2010.

- [24] Baklanov, A., Grimmond, C.S.B., Mahura, A., Athanassiadou, M., (EDS). Meteorological and air quality models for urban áreas. Springer, Berlin. 2009.
- [25] Baklanov, A., Joffre, S.M., Piringier, M., Deserti, M., Middleton, D.R., Tombrou, M., Karppinen, A., Emeis, S., Prior, V., Rotach, M.W., Bonafè, G., Baumann-Stanzer, K., Kuchin, A., Toward estimating the mixing height in urban areas: recent experimental and modeling results from the COST Action 715 and FUMAPEX project. Danish Meteorological Institute. Scientific Report 06-06. 2006.
- [26] Baklanov, A., Fay, B., Kaminski, J., Sokni, R., Overview of existing integrated (off-line and on-line) mesoscale meteorological and chemical transport modelling systems in Europe. Joint Report of COST Action 728 and GURME. Website: www.cost728.org. 2007.
- [27] Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C.S.B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A., Zhang, S., The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*. 31: 273-288. 2011.
- [28] Adarve, JC., Molina, F., Evaluación preliminar de la circulación de vientos en el valle de Aburrá. *Revista AINSA* 4(1). 1984.
- [29] 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.
- [30] Pérez, JD., 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.
- [31] Pérez, J.D., Palacio, C. A., Jiménez, J.F., Aspectos Descriptivos de la Circulación en la Capa Límite Atmosférica del Valle de Aburra. *Revista POLITÉCNICA*. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Año 7, Nro. 13, pp. 31-41. Medellín. 2011.
- [32] Correa, M., Zuluaga, C., Palacio, C., Pérez, J., Jiménez, J., Acoplamiento de la escala sinóptica a la escala local del campo de vientos en superficie en una región tropical con topografía compleja. Caso de estudio: el Valle de Aburra, Antioquia, Colombia. *Revista DYNA Universidad Nacional de Colombia, Medellín*. Dyna, Año 76, Nro. 158, pp. 17-27. Medellín. 2009.
- [33] Hernández, J.C., Correa, M.A., Palacio, C.A., Una descripción del transporte atmosférico sobre el área del valle de Aburrá (Antioquia) usando análisis por cúmulos. IX CONGRESO COLOMBIANO DE METEOROLOGÍA. Bogotá. 2011.
- [34] Ríos, C.A., Procesos de Inversión Térmica en el Valle de Aburrá, Trabajo dirigido de grado para Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [35] Whiteman, C.D., Breakup of Temperature Inversions in Colorado Mountain Valleys. PhD Thesis. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA. 1980.
- [37] Rendón, A. M., Rompimiento de la Inversión Térmica en el Valle de Aburrá, [Tesis de Maestría], Medellín, Ant: Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [38] Rendón, A., Jiménez, J., Palacio, C., Modelación del rompimiento de la inversión térmica en el Valle de Aburrá. Libro: TENDENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL. Editorial Universidad de Medellín, 2008.
- [39] Bastidas, A., Nisperuza, D., Design and development of a Tropospheric Lidar to study aerosol particles in Medellin, Colombia. Presented at the International Radiation Symposium (IRS2008), Foz do Iguaçu, Brazil from 3 to 8 August 2008, Session E (General Remote Sensing). 2008.
- [40] Nisperuza, D., Bastidas, A., Development of a tropospheric LIDAR for observations of the Planetary Boundary Layer above Medellin, Colombia. *Journal of Physical Science and Application*, 1: pp.163-169. 2011.
- [41] Poveda, G., El Clima en Antioquia. En: *Geografía de Antioquia*, (M. Hermelín, ed.). Edit. EAFIT, 17p. 2007.
- [42] Henao, A., Ochoa, A., Jiménez, J.F., Osorio, A., Cartagena, C., Poveda, G., Uso de cámaras de video para el monitoreo de las condiciones atmosféricas en el Valle de Aburrá, Colombia. IX Congreso colombiano de meteorología. Bogotá, Colombia. 2011.
- [43] Jiménez, J.F., Palacio, C., Aproximación conceptual al diseño de una red de calidad del aire en el Valle de Aburrá, Colombia. IX Congreso colombiano de meteorología. Bogotá, 2011.
- [44] Jiménez, J.F., Ramírez, C.J., Ochoa, A., Poveda, G., Zapata, C.M., Marín M.I., Red piloto de información

hidrometeorológica para el Valle de Aburrá. Avances en recursos Hidráulicos 18. 2008.

[45] Pulgarín, D., Jiménez, J.F. Prospección estratégica para la red de observadores del tiempo atmosférico. Gestión y Ambiente, Vol14, 2011.

[46] Jiménez, J.F., Ochoa, A., Henao, A., Acoplamiento del ciclo de salida del Sol y el ciclo de los contaminantes atmosféricos en el Valle de Aburrá-Colombia. IX Congreso colombiano de meteorología. Bogotá. 2011.

[47] Ochoa, A., Jiménez, J.F., Ciclo diurno de PM10 en el Valle de Aburrá. IX Congreso colombiano de meteorología. Bogotá, Colombia. 2011.

[47] Whiteman, C.D., Observation on Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain. En: Atmospheric Processes Over Complex Terrain, Chap. 2. (W. Blumen, Ed.) Meteorological Monographs, 23, no. 45. American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 5-42. 1990.

[48] Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. Journal of Applied Meteorology, 38: pp.1262-1292. 1999.

[49] Martilli, A., Current research and future challenges in urban mesoscale modeling. Int. J. Climatol. 27: pp.1909-1918. 2007.