

VENTILACIÓN DE UN CAÑÓN URBANO

Jorge Lassig

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue - Bs. As. 1400 – (8300) Neuquén – Argentina- e-mail: jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar - Te:54-299-4490322

Palabras Clave: cañón urbano, ventilación, número de Froude, canal de agua.

Resumen. Se construyó un canal de agua para determinar los tiempos de ventilación de un cañón urbano bidimensional. La geometría del mismo fue de tipo rectangular ($H/L=0.5$).

Se observó un vórtice principal dentro del cañón, y otro pequeño en contrarrotación ubicados abajo y en la esquina aguas arriba del mismo, facilitando el estancamiento del flujo en esa región. En todos los casos, el centro del vórtice principal se localizó ligeramente corriente abajo del centro geométrico del cañón.

Se obtuvieron los patrones de flujo a distintos números de Froude, acotándose el rango para el cual los patrones son gobernados por la formación de zonas de estancamiento que facilitan la deposición de partículas, y la zona de remolinos con mucha vorticidad que favorecen la limpieza de los cañones urbanos.

Se determinó el nivel de ventilación, consistente en medir los tiempos que demoraba en limpiar un volumen fijo de un líquido marcador, inyectado en el hueco del cañón urbano, para distintas velocidades de la corriente libre.

También se pudo calcular la frecuencia de rotación del vórtice principal.

Área Temática: Dispersión de contaminantes atmosféricos

1 INTRODUCCION

Un cañón urbano es el espacio entre edificios que se alinean continuamente a lo largo de una calle relativamente estrecha. Los contaminantes emitidos en un cañón urbano tiende a dispersarse menos de aquéllos emitidos en un área abierta, la calidad del aire se vuelve un serio problema en la mayoría de las grandes ciudades, sobre todo debido a las emisiones de los vehículos de motor (Nicholson, 1975).

El modelo de flujo (como el número y dirección de la rotación de los vórtices) y las características de dispersión de contaminante, son la preocupación de muchos trabajos de observación (Depaul y Sheih, 1985, 1986; Nakamura y Oke, 1988; Lee y Park, 1994), numérico (Hunter et al. 1990/91, 1992; Sini et al. 1996; Baik y Kim, 1999) y estudios en túnel de viento (Wedding et al. 1977; Hoydysh y Dabberdt 1988; Oke, 1988; Dabberdt y Hoydysh 1991; Klein y Plate, 1999; Huang et al., 2000).

Una herramienta alternativa a un túnel del viento, en estudios de flujo y dispersión en cañones urbanos, son los tanques y canales de agua. Canales de agua (Jong-Jin Baik et al, 2000) y tanque de agua (Liu, H. et al., 2003) fueron utilizados en trabajos anteriores.

2 METODOLOGIA

Como primera aproximación se asumió la hipótesis de un modelo fluidodinámico de dos capas, estable y estratificado, donde la capa inferior está contenida en una cavidad tipo cañón urbano, y la capa en movimiento simula el viento sobre los edificios.

El aire termalmente estratificado puede barrerse fuera del cañón urbano si hay un fuerte viento cruzado. Semejante barrido, resulta en una ventilación del mismo, y ocurre cuando las fuerzas inerciales del viento cruzado dominan a las fuerzas de flotación del aire estratificado. El estancamiento ocurre cuando las fuerzas de flotabilidad (negativa en este caso) exceden las fuerzas inerciales. El número de Froude (Fr) expresa la relación entre estas fuerzas. El mismo se desarrolló originalmente para los estudios de similitud en fluidos incompresibles y de superficies libres (hidráulica), pero se usa cada vez más en estudios atmosféricos de meso-escala concernientes con ventilación de valles por vientos cruzados (Bell y Thompson 1980; Manins y Sawford 1982) y en flujos estratificados encima de barreras corta vientos (Baines 1979), nosotros lo aplicaremos como metodología para evaluar la ventilación de un cañón urbano.

Como primera aproximación consideraremos que la temperatura dentro y fuera del cañón urbano es la misma (modelo de atmósfera hidrostática), entonces se puede utilizar la siguiente expresión del número de Froude:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot H}} \quad (1)$$

Donde U, es la velocidad media del viento horizontal sobre del edificio, H es la longitud característica, es decir la altura del edificio, y g es aceleración de gravedad. En nuestro caso el número de Froude estaría relacionando a las fuerzas inerciales del fluido en movimiento (U) con las fuerzas másicas (peso) del fluido en la cavidad; los números de Froude pequeño indicarían una mayor resistencia del fluido a dejar la cavidad, y los números de Froude más grandes indicarían grandes intercambios entre el flujo superior y el que está entro de la cavidad. Entonces es de interés conocer para una cierta forma geométrica, y una dada estratificación cual es el valor de número de Froude crítico, que comienza con la mezcla y por consiguiente rompe la estratificación.

Los experimentos se llevaron a cabo en un pequeño canal de agua que se construyó a tal fin en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, cuyas dimensiones fueron de 0.02m×0.30m×4m.



Figura 1: Pequeño canal hidráulico que se utilizó para los ensayos.

El fluido experimental es agua. Para visualizar el flujo se usó la técnica del marcador líquido (permanganato de potasio). La velocidad del agua en el canal representa el viento cruzado.

La determinación de los tiempos de ventilación consistió en medir el tiempo que demoraba en salir un volumen determinado de un líquido marcador inyectado en la cavidad que simulaba el cañón urbano, a una velocidad constante de la corriente libre. Para comparar luego los resultados se adimensionalizó el volumen inyectado:

$$V_{\text{adim}} = \frac{V_{\text{iny}}}{V_{\text{cav}}} \quad (2)$$

Donde " V_{adim} " es el volumen adimensionalizado, " V_{iny} " es el volumen de la tinta marcadora inyectado para observar la ventilación, y " V_{cav} " es el volumen de la cavidad estudiada.

3 RESULTADOS

Los resultados muestran que el régimen del flujo está caracterizado por un gran vórtice dentro del cañón, similar a otros trabajos (Ahmad et al, 2005).

En general se identificaron en el fluido tres regiones (ver figura 2):

- Zona superior I: en la que el fluido se mueve sin mostrar perturbaciones, gobernada por la corriente libre.
- Zona intermedia II: de mezcla o de transición gobernada por remolinos pequeños generadas por la cortante (entre el fluido libre y el fluido quieto en el pozo).
- Zona inferior III: dominada por un gran remolino. En esta región encontramos tres sub-zonas:
 - R1: ocupada por un vórtice grande de gran velocidad angular y ocupando un gran porcentaje del área del cañón.
 - R2: con un vórtice mas pequeño, de menor velocidad angular relativa y de giro contrario al vértice de R1.
 - R3: región de mezcla ubicada en la parte superior.

3.1.- Dominio del Vórtice Principal en la Cavidad:

Se forma dentro de la cavidad un vórtice gigante que domina el patrón de flujo, impidiendo que la corriente principal penetre dentro del cañón, y manteniendo alejada a la zona de mezcla,

por lo que la ventilación de la cavidad se logra sólo por la dinámica de este gran remolino. Las figuras 2, 3, y 4 lo ejemplifican. En ellas también se puede observar que dicho vórtice existe tanto para bajos como para altos números de Froude.

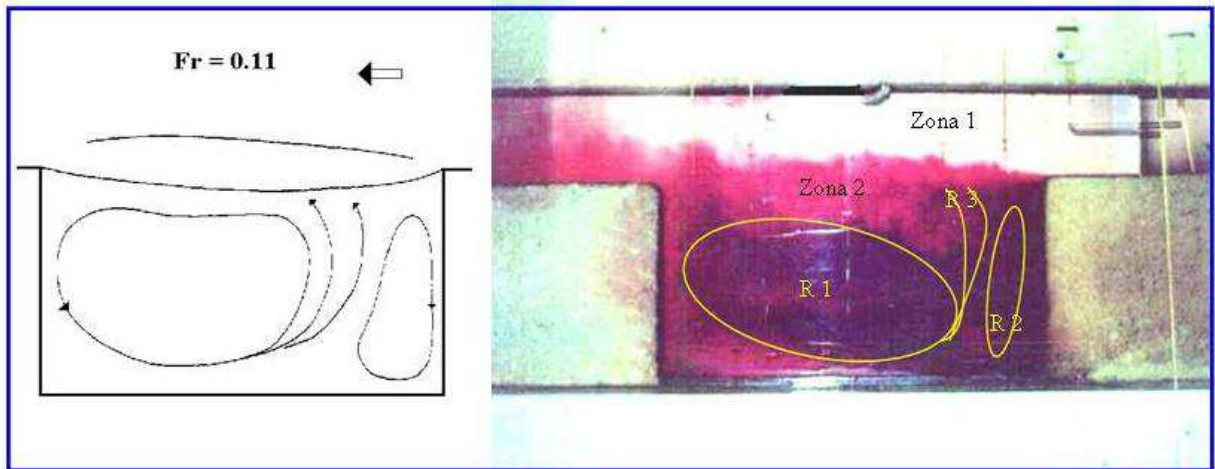


Figura 2: Patrón de flujo para una cavidad rectangular a bajos números de Froude ($Fr=0.11$), son similares a los de $Fr=0.18$ y $Fr=0.28$. R1 es el vórtice principal.

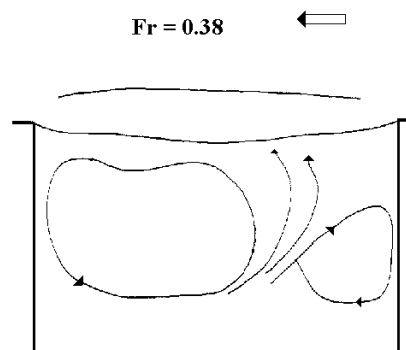


Figura 3: Patrón de flujo para una cavidad rectangular a medianos números de Froude ($Fr=0.38$)

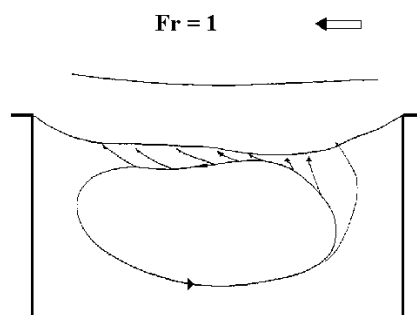


Figura 4: Patrón de flujo para una cavidad rectangular a altos números de Froude ($Fr=1$), a partir del $Fr=0.40$ el vórtice pequeño desaparece.

Dentro de la cavidad el vórtice grande domina el patrón de flujo, impidiendo que la corriente principal penetre dentro del cañón, y manteniendo alejada a la zona de mezcla, por lo que la ventilación de la cavidad se logra sólo por la dinámica de este gran remolino. En ellas también se pudo observar que dicho vórtice existe tanto para bajos como para altos números de Froude.

3.2.- Tiempos de Limpieza

Como este remolino es activado a bajos números de Froude por la cortante de velocidad entre las dos capas de fluido, habiendo poco intercambio entre este y la corriente externa al cañón; a medida que aumenta la velocidad de la corriente libre (en nuestro caso significó aumentar el número de Froude) se hace más intenso el vórtice, y por lo tanto es mayor el aumento de intercambio de masa entre la cavidad y el exterior, esto se manifiesta a través del denominado tiempo de ventilación. Este fenómeno se observa muy bien, pues a bajos números de Froude se aprecian los 2 vórtices, para cuantificar esto los tiempos de limpieza fueron divididos en dos, uno cuando se limpiaba el vórtice grande, y el otro tiempo para la limpieza total, que coincidía con el tiempo de limpieza de las dos sub regiones. A partir de números de Froude superiores a 0.40, los dos tiempos se unifican en uno solo, esto es debido a que la corriente principal penetra más adentro del cañón, y barre la estratificación, por lo que queda bien definida la acción del pequeño vórtice y su extinción.

Se puede observar dos patrones de flujo, el correspondiente a pequeños números de Froude (0.10 – 0.30), donde los tiempos de limpieza son casi constantes, ello se debe a la presencia del pequeño vórtice. Entre Froude 0.30 – 0.40 hay una transición (crítico), y a partir de Froude mayores a 0.40 el vórtice pequeño desaparece y el tiempo de limpieza es pequeño y disminuye lentamente. Lo mencionado se puede apreciar en las figura 5.

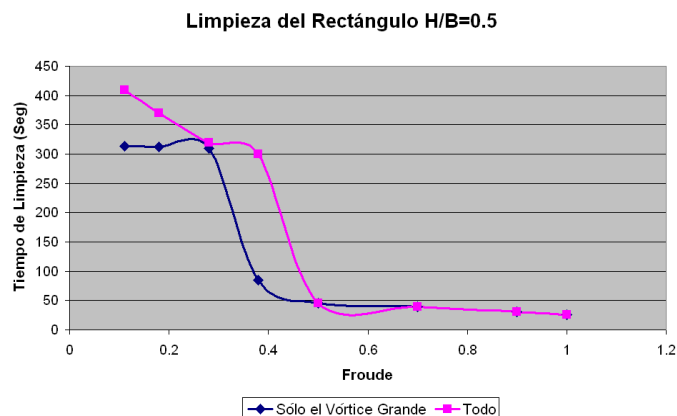


Figura 5: Tiempo que tardó en salir el volumen de fluido marcador de la cavidad que representó al cañón urbano, en función del número de Froude.

Para determinar la frecuencia de giro del vórtice principal, se realizó un segundo ensayo consistente en hacer circular por el canal agua a una temperatura alta (40°C) y en llenar la cavidad con agua fría (2°C), utilizando dos termocuplas, una ubicada en la corriente principal antes de la cavidad, y la otra después de la cavidad, de tal forma que puedan medir las variaciones de las diferencias de temperaturas debidas al desalojo del agua fría desde la cavidad, indicando la frecuencias de rotación del vórtice.

La frecuencia angular del giro del vórtice principal, para antes y después del número de Froude crítico (≈ 0.40). Para un Fr de 0.10 el periodo de rotación fue de 14 segundos, y para un Fr de 0.50 fue de 6 segundos.

3.3.- Tiempos de Limpieza Adimensional

Se adimensionaliza el tiempo de limpieza, dividiendo al mismo por el tiempo característico definido por:

$$T^* = H/V \quad (3)$$

Entonces el tiempo adimensional de limpieza se expresa como:

$$T_{adm} = T / T^* \quad (4)$$

Aplicando esto a la limpieza de cañón de sección rectangular, se obtiene la figura 7.

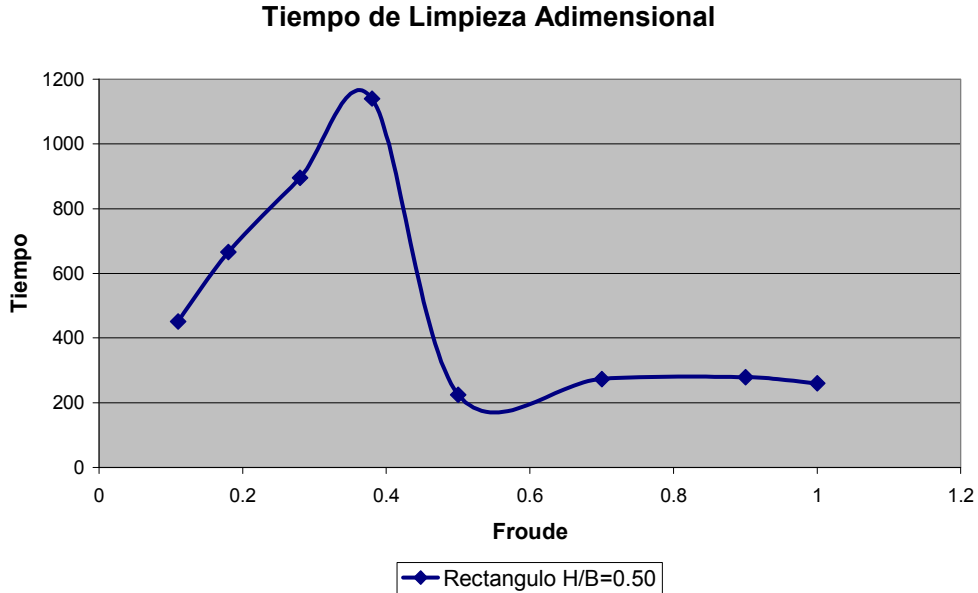


Figura 6: Tiempos de Limpieza Adimensional para el cañón de sección rectangular $H/B=0.50$

En la figura 6 se puede observar bien que existen dos comportamientos distintos para ventilar, queda bien definida la acción del pequeño vórtice y su extinción.

4 APLICACIONES

Podemos aplicar los resultados de estos ensayos físicos, a cañones reales, para ver que resultados obtenemos.

4.1.- Cañón de Sección Rectangular $H/B=0.50$, con Edificios de 10 Metros de Altura

Si el cañón es de sección cuadrada y los edificios son de 10 metros de alto, entonces la escala de longitudes del ensayo es:

$$\alpha = H_{edif} / H_{ensayo} = 10 \text{ m} / 0.1 \text{ m} = 100$$

A partir de la igualdad del número de Froude entre el ensayo y los edificios, se define la escala de velocidades como:

$$\beta = (\alpha)^{1/2} = (100)^{1/2} = 10$$

El tiempo de ventilación se relaciona con el tiempo adimensional como:

$$T = T_{adim} * H / V_{edif} = T_{adim} * 10 \text{ m} / (\beta * V_{ensayo})$$

Por otra parte el volumen adimensional y el volumen inyectado en el ensayo (representará en los edificios el volumen contaminante), se relaciona como:

$$V_{iny} = V_{contaminante} = 0.0125 * V_{cañon} = 0.0125 * 10\text{m} * 20\text{m} * 1\text{m} = 2.5 \text{ m}^3 \text{ x m de ancho}$$

En la figura 7 se graficaron los resultados.

Limpeza de Cañón de Sección H/B=0.50, con Edificios de 10 m

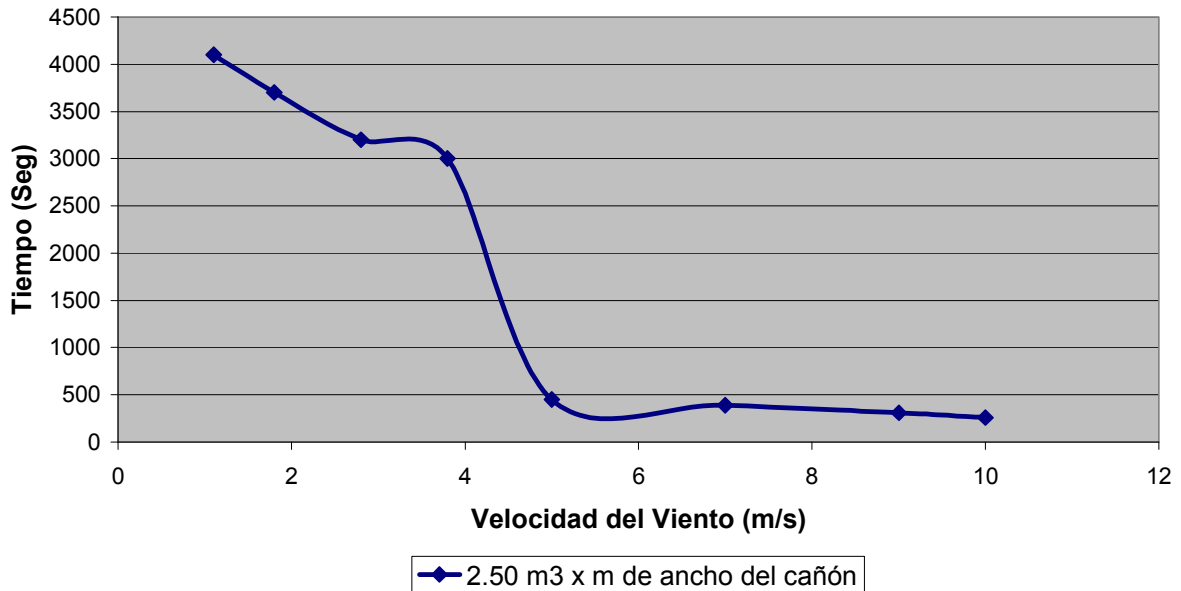


Figura 7: variación del tiempo de ventilación de un volumen contaminante de 2.50 m^3 (por metro de ancho) para un cañón de sección rectangular ($H/B=0.50$), en función de la velocidad del viento a 10 m de altura.

Podemos observar que para velocidades del viento a 10 metros de altura, el tiempo para ventilar un volumen de 2.50 m^3 de contaminante (por metro de ancho del cañón) de igual densidad que el aire presente en el cañón, se requiere más de una hora, si el viento es del orden de 1 m/s .

Para vientos de 3.8 m/s , la ventilación se realizará en 50 minutos, para vientos de 5 m/s , la ventilación se realizará en 7.5 minutos, y para un viento de 10 m/s el cañón se ventilará en un poco más de 4 minutos.

5 CONCLUSIONES

Se propuso un simple método para evaluar la ventilación de los cañones urbanos, consistente en medir el tiempo de limpieza de la cavidad con agua limpia, cuando a esta se le inyecta un líquido colorante.

Los resultados del experimento son interesantes, y podría clasificarlos en:

- 1) Se llega a cuantificar el tiempo de limpieza, y estos pueden extrapolarse a cañones urbanos reales.
- 2) Demuestra la utilidad de los túneles de agua como metodología para estudiar los flujos dentro de los cañones urbanos.
- 3) Los resultados en 2d pueden ayudar a calibrar modelos numéricos en 2d.
- 4) Sería muy interesante utilizar túneles de agua mas grandes para ensayar modelos en 3D, aunque serían mas costosos.

Agradecimientos

El autor de este trabajo agradece a los Ingenieros Fabian Dovis, Claudio Escaudar, Ricardo Parada, y Osvaldo Samudio por la ayuda en la construcción y operación del túnel de agua utilizado para este trabajo, como también a la Dra. Marisa Cogliati en el análisis de series de Fourier para la determinación de la velocidad angular del vórtice principal. La SCYT de la Universidad Nacional del Comahue subsidio el proyecto.

REFERENCIAS

- Ahmad, K., Khare, M. and Chaudhry, K. K.; 2005; Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections a review; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 93, 697-717.
- Baik, J.-J., and J.-J. Kim, 1999: A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *J. Appl. Meteor.*, 38, 1576–1589.
- Baines, P.; 1979 ; Observations of stratified flow past three-dimensional barriers; *J Geophys Res* 84; 7834-7838.
- Bell, R. and Thompson; 1980; Valley ventilation by cross winds; *Journal Fluid Mech* 96 (4), 757-767.
- Dabberdt, W. F., and W. G. Hoydysh, 1991: Street canyon dispersion: Sensitivity to block shape and entrainment; *Atmos. Environ.*, 25A, 1143–1153.
- Depaul, F. T., and C. M. Sheih, 1986: Measurements of wind velocities in a street canyon; *Atmospheric Environment*, 20, 455–459.
- Hoydysh, W. G., and W. F. Dabberdt, 1988: Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons; *Atmos. Environ.*, 22, 2677–2689.
- Huang, H., Y. Akutsu, M. Arai, and M. Tamura, 2000: A two-dimensional quality model in an urban street canyon: Evaluation and sensitivity analysis. *Atmospheric Environment*, 34, 689–698.
- Hunter, L. J., I. D. Watson, and G. T. Johnson, 1990/91: Modeling air flow regimes in urban canyons. *Energy Build.*, 15–16, 315– 324.
- Hunter, L. J., I. D. Watson, and , G. T. Johnson, and I. D. Watson, 1992: An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmos. Environ.*, 26B, 425–432.
- Jong-Jin Baik, Rae-Seol Park, Hye-Yeong Chun, and Jae-Jin Kim; 2000; A Laboratory Model of Urban Street-Canyon Flows; *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 39, (9), 1592–1600.
- Klein, P. K., and E. J. Plate, 1999: Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons; *Atmospheric Environment*, 33, 3973–3979.
- Lee, I. Y., and H. M. Park, 1994: Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons; *Atmos. Environ.*, 28, 2343–2349.
- Liu, Huizhi, Liang Bin, Zhu Fengrong, Zhang Boyin, and Sang Jianguo; 2003; A Laboratory Model for the Flow in Urban Street Canyons Induced by Bottom Heating; *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 20, (4), 554–564.
- Nakamura, Y., and T. R. Oke, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an eastwest oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, 22, 2691–2700.
- Manins, P. and Sawford; 1982; Mesoscale observations of upstream blocking; *QRJ Meteorol Soc* 108: 427-434; 1982.
- Nicholson, S. E., 1975: A pollution model for street-level air; *Atmospheric Environment*, 9, 19–31.
- Oke, T. R., 1988: Street design and urban canopy layer climate; *Energy Building*, 11, 103–113.

- Sassoli, F. and Peruginelli, A.; 1968; Sulla determinazione della scabrezza di fondo nella progettazione di canali a fondo mobile; XI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, Italy.
- Sini, J.F., S. Anquetin, and P. G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons; *Atmos. Environ.*, 30, 2659–2677.
- Snyder, W. H., 1985: Fluid modeling of pollutant transport and diffusion in stably stratified flow over complex terrain; *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17, 239–266.
- Valdez, A.; 1981; *Descriptiva y Dinámica Oceánica*; Instituto de Publicaciones Navales, Buenos Aires, Argentina.
- Vergara, Miguel; 1993; *Técnicas de Modelación en Hidráulica*; Editorial Alfaomega, Mexico.
- Wedding, J. B., D. J. Lombardi, and J. E. Cermak, 1977: A wind tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 27, 557–566.