

## **EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN FLUJOS TURBULENTOS MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

R. D. Vazquez<sup>1</sup>, A. R. Wittwer<sup>2</sup>, E. Perondi<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste.

<sup>3</sup>Departamento de Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul.

**RESUMEN:** Se presenta un procedimiento para la evaluación de la dispersión de contaminantes atmosféricos, a través de ensayos en un túnel de viento, con un modelo reducido. El análisis del campo de concentraciones, se realiza mediante técnicas de procesamiento de imágenes y el uso del modelo Gaussiano. El flujo atmosférico se simula mediante dispositivos de mezcla y rugosidad superficial, en tanto que la emisión se modela mediante una máquina de generadora de humo. El procedimiento permite una estimación del campo de concentraciones para una determinada extensión de la pluma de dispersión y no solo localmente, como en el caso de los sistemas convencionales de medición.

**Palabras clave:** dispersión atmosférica, procesamiento de imágenes, túnel de viento.

### **INTRODUCCIÓN**

Los contaminantes atmosféricos son transportados y dispersados, principalmente, por la acción del viento medio y la turbulencia atmosférica. El proceso de dispersión depende de un gran número de variables características del escurrimiento atmosférico, las condiciones meteorológicas y la duración de la emisión adquieren una gran importancia en el alcance de la dispersión de la pluma. Diferentes estudios muestran que las máximas concentraciones dependen de la altura de la chimenea, pero además son fuertemente dependientes de condición de estabilidad atmosférica. En las emisiones producidas en la capa límite superficial, es decir, a alturas menores a 100 m, la turbulencia mecánica generada por la topografía del terreno y los obstáculos próximos tienen una incidencia primordial.

Los estudios de campo para el análisis de este tipo de proceso de dispersión presentan dificultades tanto en lo referido al control como a los costos de las mediciones. Por este motivo, el desarrollo de metodologías de estudio basadas en el uso de modelos a escala reducida en túneles de viento es muy importante. Para poder modelar correctamente este tipo de fenómeno a escala de laboratorio, es necesario simular el flujo atmosférico y diseñar un modelo de la fuente de emisión teniendo en cuenta las condiciones de semejanza y la relevancia de los diferentes parámetros adimensionales (Wittwer et al., 2003). En un trabajo anterior (Wittwer et al., 2007) se ha presentado un estudio en el que la emisión fue modelada usando helio puro y una mezcla aire-helio. El campo de concentraciones medias y de las fluctuaciones de concentración fue determinado a partir de mediciones realizadas con una sonda aspirante conectada a un anemómetro de hilo caliente.

En este trabajo, a partir de la simulación del flujo atmosférico para la condición de estabilidad neutra en un túnel de viento de capa límite, se modelan emisiones mediante una máquina de humo para fiestas. Para el análisis del proceso de dispersión, se realizan tomas de imágenes y se utilizan técnicas de procesamiento digital (Huber, 1988). El objetivo del trabajo es implementar un procedimiento de análisis que permita evaluar diferentes procesos de dispersión. El procedimiento diseñado permite transformar un método comúnmente cualitativo, como es la visualización de procesos turbulentos, en un método cuantitativo que permite obtener los valores que caracterizan el campo de concentración de contaminantes a lo largo de una pluma de dispersión. Frente a los sistemas de medición de concentración que se usan para este tipo de estudios (Wittwer et al., 2007), este procedimiento, si bien es de menor exactitud, permite analizar de forma simultánea el proceso para una determinada extensión de la pluma de dispersión y no solo localizadamente.

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### ***Modelo Gaussiano de dispersión***

El modelo Gaussiano es un modelo de uso común para el análisis de problemas de dispersión de contaminantes. Básicamente, se supone que el penacho o pluma que se produce a partir de una fuente puntual, presenta una distribución de tipo normal o Gaussiana de los valores de concentración en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento (Figura 1).

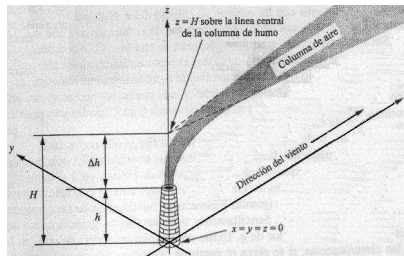


Figura 1: Esquema del modelo de difusión turbulenta de tipo Gaussiano.

Cabe hacer notar que estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades con relieves complejos y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas. Los modelos Gaussianos de dispersión describen, a través de una fórmula simple, el campo tridimensional de concentraciones generado por una fuente puntual en condiciones meteorológicas y de emisión estacionarias. A medida que un penacho progresa en la dirección del viento, el modelo supone que el perfil de concentración, por el proceso de mezcla turbulenta, adquiere una configuración Gaussiana. Si la condición atmosférica es neutra, se desarrollará un penacho en forma de cono. La concentración en la línea central de la pluma será máxima en las cercanías de la fuente emisora y disminuirá en las posiciones más alejadas a sotavento. A medida que la distancia viento abajo aumenta, los extremos de la pluma pueden impactar sobre el terreno. La concentración  $C$  de un contaminante en cualquier punto se expresa como:

$$C(x, y, z) \approx \frac{1}{U} QG \quad (1)$$

donde  $U$  es la velocidad media y  $Q$  es el caudal de gas emitido.

En la literatura específica referida a la contaminación de aire son conocidos como modelos de difusión, en tanto que en el ámbito de la ingeniería se lo denominan modelos de dispersión, usando la palabra difusión en referencia específica a los fenómenos de difusión molecular. En la expresión (1), se puede considerar a  $G$  de la siguiente manera:

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \quad (2)$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2} \quad (3)$$

Donde  $G_y$  es la concentración en la dirección  $y$ , dependiendo de la distancia  $x$ . Del mismo modo,  $G_z$  es la concentración en la dirección  $z$  a la distancia  $x$ . Los valores de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son obtenidos de una gráfica denominada gráfica PGT. En la figura 1, el origen de coordenadas se ubica en la base de la chimenea, con el eje  $x$  alineado en la dirección del viento. La emisión de gas contaminado, que denominaremos columna de humo, inicialmente se eleva en la dirección  $z$  una altura  $\Delta h$ , pero luego se nivela para continuar en la dirección  $x$ , dispersándose en las direcciones  $y, z$ . Lo normal es que la columna de humo se eleve por encima de la chimenea, ya sea porque la emisión se produce a temperaturas más elevadas que la atmosférica, o directamente por la velocidad vertical de salida.

La primera hipótesis del modelo es que la columna de humo se emite desde un punto de coordenadas  $P(0, 0, H)$ , donde  $H$  es la altura efectiva de la chimenea. Se supone que la fuente es puntual y se considera una emisión estacionaria de caudal  $Q$ . Finalmente, se considera que el viento sopla en la dirección  $x$  a una velocidad  $U$  en forma estacionaria. De esta manera es posible calcular la concentración  $C$  en un punto  $P(x, y, z)$ . La condición de estabilidad atmosférica y las propiedades del terreno permiten definir los valores a utilizar en la expresión del modelo. Las distribuciones de concentración a obtener de acuerdo a este modelo, se pueden visualizar en la figura 2.

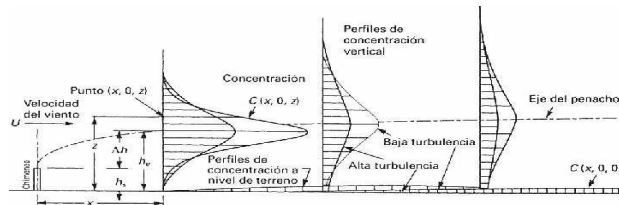


Figura 2: Visualización de los perfiles de concentración a partir del modelo Gaussiano.

### Procesamiento digital de imágenes

El término imagen se refiere a una función bidimensional de la luz y la intensidad, a la que indicamos con  $f(x, y)$ , donde la amplitud de  $f$  en la posición  $(x, y)$  depende de la iluminación de la imagen en esa posición. La luz es una forma de energía y el valor de la función  $f$  puede variar entre  $0 < f(x, y) < \infty$ . Las imágenes que se perciben en las actividades visuales provienen de la luz reflejada por objetos. La función  $f$  se caracteriza por dos componentes, de esta forma:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (4)$$

donde  $i$  es la iluminación y  $r$  la reactancia. La función  $i$  depende de la fuente de luz y  $r$  está definida por las características del objeto. La intensidad de una imagen monocromática se denomina nivel de gris (González & Woods, 1996). En este trabajo, el humo se ilumina con cuatro tubos fluorescentes para obtener las correspondientes imágenes. La zona más oscura se visualiza en la posición de salida de la chimenea y la de mayor iluminación se obtiene en los bordes de la pluma. Para procesar la información contenida en la columna de humo con el fin de obtener el campo de concentraciones, es necesario definir el formato de imagen a estudiar, ya que toda imagen digital posee una estructura o formato.

Se estudian los píxeles de la imagen, empleando una máscara de dimensión 5x5. No se utiliza color y las imágenes son transformadas en escalas de grises. Se sitúa el píxel a estudiar en la posición  $P_{13}$  (Zanuy, 2000), luego se realiza la media aritmética mediante la fórmula:

$$\bar{P}_{13} = \frac{\sum_{n=1}^m P_n}{m} \quad (5)$$

De esta manera, se parte de una matriz fuente, observada en la izquierda de la figura 3, para obtener una matriz destino a la derecha de la misma figura.

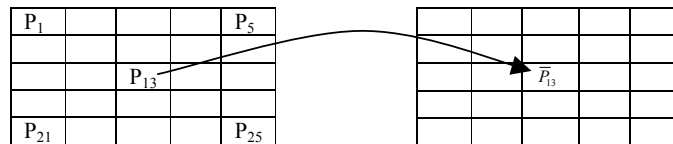


Figura 3: Máscara utilizada para el estudio de los píxeles en la imagen.

Par realizar extracciones de información en imágenes digitales se recurre a programas como MathCad, MatLab, Java o Visual C++. Los dos primeros son software para matemáticas, que posibilitan incorporar paquetes de procesamiento digital de imágenes. En el programa Java, se debe incorporar un paquete especial para imágenes denominado JAI (Java Advanced Imaging) de distribución gratuita y abierta. El caso de Visual C++ 6.0 es especial, ya que es posible realizar operaciones en conjunto con los programas MatCad, MatLab y Java. Los paquetes que se le incorporan al programa Visual C++ pueden ser Imagen Magik y Visión SDK 1.0, ambos de distribución gratuita y abierta.

### DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

A partir de las leyes de semejanza y el análisis dimensional, es posible modelar vientos de capa límite, condiciones relativas a confort en edificios y procesos de dispersión atmosférica, utilizando un túnel de viento. La aplicación de este tipo de análisis, da lugar a una serie de criterios de semejanza y parámetros adimensionales. El trabajo propuesto, de carácter experimental y basado en el uso de modelos a escala reducida, se justifica a partir de las dificultades de la experimentación a escala real y la posibilidad de realizar mediciones bajo situaciones controladas.

La experimentación se realizará en un túnel de viento diseñado y construido en la Universidad Nacional del Nordeste. Es un túnel de circuito abierto cuya longitud total es de 7.5 m, y su cámara de ensayos consiste en un conducto de sección cuadrada de 0.48m de lado y 4.45 m de longitud (Figura 4).



Figura 4: Túnel de viento y dispositivos de simulación de la capa límite.

La simulación de la capa límite atmosférica se efectúa empleando elementos de rugosidad y dispositivos de mezcla apropiados para reproducir una capa límite en condición de estabilidad neutra, de espesor parcial (Figura 4). La finalidad es obtener una capa límite que corresponde a un terreno suburbano equivalente a una categoría B del reglamento argentino de vientos CIRSOC102 (Alvarez y Alvarez et al, 2004).

Los requerimientos de semejanza completa, generalmente no se cumplen en ensayos en túneles de viento. En particular, en esta etapa preliminar del trabajo, además de los criterios observados para simular la capa límite atmosférica, para el modelo de la pluma de emisión solo se realizan consideraciones generales de semejanza. Es decir, no se reproduce un proceso de emisión determinado, pero se consideran parámetros como el número de Reynolds y la relación adimensional de velocidades, no para ser reproducidos, sino como parámetros de comparación.

Para la realización del ensayo se emplea humo, producido por un generador de humo que utiliza un líquido a base de glicerina. La velocidad de salida del humo es de 1 m/seg y la fuente de contaminante es un conducto metálico de 1.02 cm de diámetro interno y 10 cm de alto ubicado en el centro de la cámara. Todas las experiencias son realizadas en régimen estacionario y el control de velocidad del flujo se realiza mediante el anemómetro mostrado en la Figura 5. En la misma figura, se observa un luxómetro que mide la cantidad de luz de los cuatro fluorescentes en la escena, dentro de la cámara de ensayos del túnel de viento.

Las imágenes se obtienen mediante una cámara digital (CCD) SONY de 7.2 MG píxeles. En la Figura 6 se observa, a la izquierda, la chimenea, el fondo negro, piso blanco y el luxómetro, al momento de acondicionar la escena. A la derecha se observa una imagen de la escena, al momento de obtener las medias de las escalas de grises en una región cercana a la chimenea.

En la Figura 7, a la izquierda, se observa una imagen instantánea del humo en la escena, luego una imagen obtenida del promedio de una serie de treinta muestras y, finalmente, la imagen que resulta de la extracción del humo mediante procesamiento digital.



Figura 5: Imagen del anemómetro para control de velocidad y del luxómetro para acondicionar la escena.



Figura 6: Escenas durante el acondicionamiento y al obtener la media de la escala de gris a la salida de la chimenea.

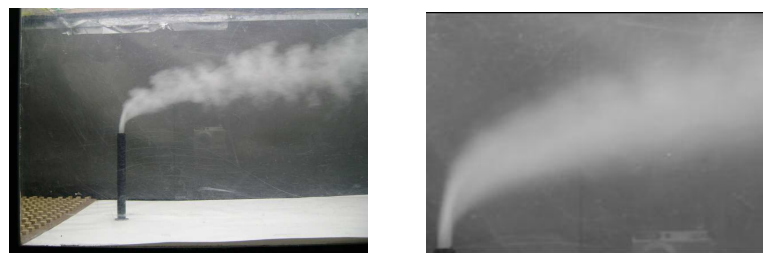


Figura 7: Imagen instantánea del humo en la escena y la imagen promediada.

Es posible obtener las coordenadas del mundo real, a partir de las coordenadas de la imagen expresadas en píxeles. Para ello, se recurre a una relación de escala tomando como referencia un objeto de dimensiones conocidas dentro de la escena.

La chimenea posee una longitud aproximada de 160 mm y su altura en píxeles es de 190. La relación de escala es  $r=160\text{mm}/190\text{píxeles}$ .

Seguidamente se segmenta y recorta la imagen en la región de interés (manteniendo la escala constante). El centro de las coordenadas cartesianas, es el vértice superior izquierdo, aumentando hacia la derecha y hacia abajo ver figura 8.

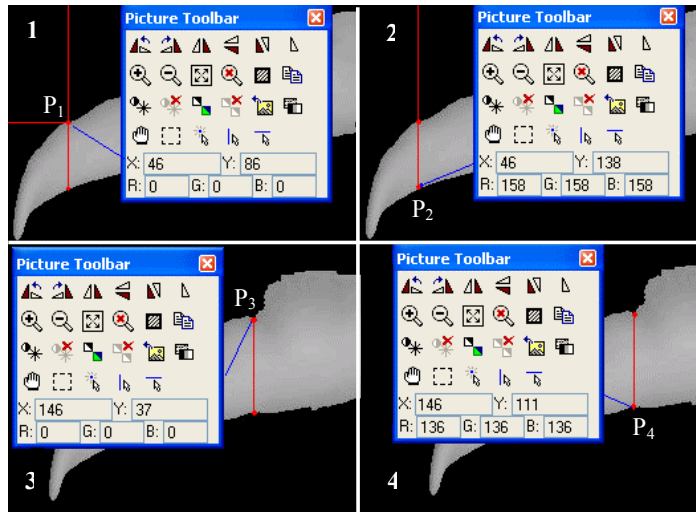


Figura 8: Representa la imagen segmentada y las posiciones en píxeles que limita la region de estudio.

### OBTENCIÓN DEL CAMPO DE CONCENTRACIONES

Una vez realizado el acondicionamiento de la escena, se procede a la toma de imágenes para evaluar el campo de concentraciones. Cada imagen obtenida por la CCD indica una situación instantánea, por lo que es necesario realizar una media estadística de las imágenes que permita determinar el campo de concentraciones medias. El promediado se realiza de forma directa mediante un software. Luego, sobre la imagen promediada, se define una región de análisis donde se van a obtener los valores de la dispersión  $\sigma_z$  con respecto a la posición  $x$ .

La expresión (3) puede ser re-escrita de la siguiente manera:

$$G_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_{\max}}{\sigma_z}\right)^2} \quad (6)$$

donde  $G_z(x, z)$  representa la concentración del flujo a la distancia  $x$  y en la posición  $z$ . En esta expresión,  $z_{\max}$  indica la altura  $z$  donde es valor de la concentración es máximo para un mismo valor de  $x$ .

En la imagen segmentada de la figura 9, se observan las regiones de mínima concentración ubicadas en los bordes de la pluma de humo. Mediante el procesamiento digital de la imagen, es posible obtener las coordenadas de los bordes superior e inferior. En la figura 10, se observa un esquema donde la línea de máxima concentración se proyecta en la dirección  $x$ .

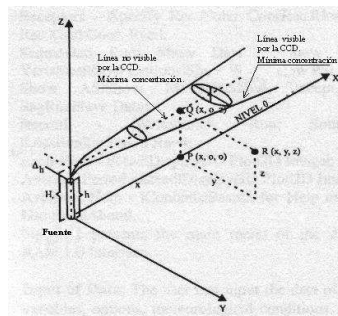


Figura 9: Se observa la línea de máxima concentración y la línea de mínima concentración.

La utilización de la ecuación (6) permite la determinación de  $\sigma_z$  haciendo un ajuste a un conjunto de valores de referencia. Estos valores corresponden, por un lado, a los de mínima concentración de humo en los bordes de la pluma, y por el otro, a los de máxima concentración cuando se satura de humo la escena con velocidad de viento incidente nula (Figura 10).

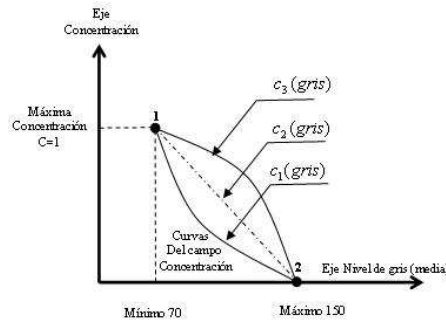


Figura 10: Concentración  $C=$ , mínima escala de gris (escena saturada de humo) – Concentración  $C=0$ , máxima escala de gris (bordes de la columna de humo).

Inicialmente, se considera una relación lineal entre los puntos conocidos 1 y 2, denominada  $C_2$  (gris). Se tienen 3 puntos próximos a 2, que permiten realizar el ajuste a la ecuación (6) y obtener  $\sigma_z$  para una posición  $x$ . La grafica obtenida, para un valor determinado de  $x = 46$ , se visualiza en la figura 11 y permite ver la asimetría de la parte superior e inferior, que implica la existencia de 2 valores de  $\sigma_z$ .

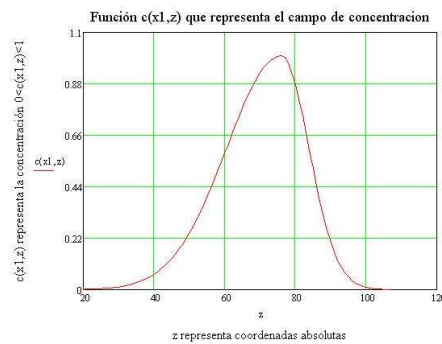


Figura 11: Gráfica de la concentración a partir de  $\sigma_z$

El procedimiento se repite desde  $x = 46$ , en sucesivas posiciones de la imagen, hasta  $x=146$ . De esta manera, se obtiene una serie de valores de  $\sigma_z$  en función de  $x$ . La figura 12 representa la variación de la concentración en el intervalo  $[46, 146]$ , indicándose también, la línea de máxima concentración.

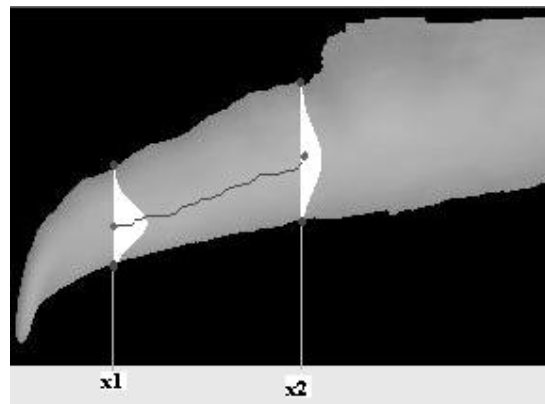


Figura 12: Estimación del campo de concentraciones usando el procesamiento de imágenes y el ajuste Gaussiano.

## CONCLUSIONES

El trabajo presenta un procedimiento para analizar el proceso de dispersión atmosférica, utilizando modelos a escala reducida en un túnel de viento. Para poder estimar el campo de concentraciones, se recurre a técnicas de procesamiento de imágenes. A partir de la toma de imágenes de una pluma de emisión simulada con humo, utilizando el ajuste al modelo Gaussiano, es posible relacionar valores en escala de gris a valores de concentración, en una posición determinada. Los resultados preliminares obtenidos, permiten establecer que es posible realizar una estimación del campo de concentraciones para una pluma bien comportada. De aquí en adelante, se comenzará a evaluar la aplicación de esta metodología en procesos de dispersión de mayor complejidad.

## REFERENCIAS

Alvarez y Alvarez G., Wittwer A. R., Natalini M. B. (2004), "Estudio de escurrimientos turbulentos de capa limite en un túnel de viento de circuito abierto", IV Escola de Primavera em Transição e Turbulência, Pontificia Universidade Católica Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 27 de Setembro à 1º de Outubro de 2004.

González & Woods, (1996). Tratamiento Digital de Imágenes. Capítulo 2, p. 32. Editorial Addison – Wesley / Diaz de Santos.

Huber, A H. (1988), "Video images of smoke dispersion in the near wake of a model building.Part1: Temporal and spatial scales of vortex shedding", Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 31, 189-233.

Wittwer A. R., Loredou-Souza A. M., Camaño Schettini E. B. (2003), "Modelagem do vento atmosférico para estudos de dispersão em túnel de vento", Ciência & Natura, Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, UFSM, Brasil, Vol. Especial, 2003, pp. 217-221.

Wittwer A. R., Loredou-Souza A. M., Camaño Schettini E. B. (2007), "Simulação física de processos de difusão turbulenta de gases poluentes na camada atmosférica superficial", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, AVERMA, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Vol. 11, pp. 08.115-122.

Wittwer A. R., De Paoli F., Loredou-Souza A. M., Camaño Schettini E. B. (2007) E. B. Camano Schettini, A. M. Loredou-Souza, "Wind tunnel study of the concentration fields in a plume emission", Proceedings of International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena, (PHYSMOD 2007), Orléans, France, August 29-31, 2007.

Zanuy M. F. (2000), Tratamiento Digital de Voz e Imagen y Aplicaciones a la Multimedia. Capítulo 3, p. 120. Editorial Marcombo.

## ABSTRACT

A procedure to evaluate the atmospheric pollutant dispersion process using wind tunnel tests is presented. Image processing techniques and the Gaussian model are using to analyse the concentration field. The atmospheric wind is simulated by mixing devices and roughness elements. The emission is modelled using a smoke generator. An estimation of the concentration field on an extension of the dispersion plume is obtained, different to local evaluation realized with conventional measure systems.

**Keywords:** atmospheric dispersion, Image processing, wind tunnel.