

## NTP 345: El control de la ventilación mediante gases trazadores



Le contrôle de la ventilation employant des gaz traceurs  
Ventilation assesment usisng tracer gases

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

### Redactores:

M. Gracia Rosell Farrás  
Ingeniero Técnico Químico

Xavier Guardino Solá  
Doctor en Ciencias Químicas

M. José Berenguer Subils  
Licenciada en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

*La ventilación es una de las herramientas más importantes de que se dispone en higiene ocupacional, tanto en medios industriales como no industriales, para controlar o eliminar la contaminación ambiental, ya sea mediante la ventilación llamada general (ventilación por dilución o por desplazamiento) o mediante sistemas de extracción localizada. Uno de los procedimientos utilizados para valorar la eficacia de la ventilación es mediante el empleo de los llamados gases trazadores*

### Introducción

Para que un sistema de ventilación sea eficaz se precisa un buen diseño, una instalación correcta y un mantenimiento adecuado. Para medir o estimar la eficacia de la ventilación y comprobar si ésta se mantiene a lo largo del tiempo pueden utilizarse:

- a. **Métodos indirectos** consistentes, entre otros, en medir la velocidad del aire, las renovaciones efectuadas, la velocidad de captación en el caso de campanas extractoras y/o en visualizar el movimiento del aire con tubos de humo.
- b. **Métodos directos** en los que se utilizan los denominados "gases trazadores" que permiten medir la eficacia de la ventilación en las condiciones habituales de trabajo.

### Utilización de gases trazadores

El principio básico de su utilización consiste en liberar en el aire una cantidad de un gas, llamado gas trazador, que viene a sustituir al gas o vapor contaminante, para estudiar su comportamiento. Ello permite obtener unas condiciones más o menos representativas de la situación real y llevar a cabo distintos estudios y mediciones sobre la ventilación. Entre ellas cabe citar:

- Medir la infiltración y renovación del aire existente en un edificio en las condiciones normales de trabajo.
- Estudiar los movimientos del aire y la dispersión de los contaminantes.
- Medir la eficacia de los extractores de humo.
- Medir el caudal de aire en los conductos.

### Características de los gases trazadores

Desde el punto de vista ideal, un gas trazador debería ser un gas inerte, incoloro e inodoro, que no esté presente en el ambiente interior ni en el exterior. En la práctica, es recomendable que un gas trazador tenga una serie de características entre las que destacan las siguientes:

- Debe ser químicamente estable y no reaccionar con ningún compuesto presente en el aire.
- Su utilización no debe representar ningún peligro para la salud y la seguridad de las personas (baja toxicidad, no explosivo) así como no ser causa de disconfort (olor no desagradable).
- Su densidad y su capacidad de difusión deben ser similares a las del aire, aunque ello dependerá del tipo de estudio a realizar.

- No debe ser un constituyente normal del aire o, caso de encontrarse presente en el mismo, estarlo en un orden de magnitud muy inferior a la que se considera en las mediciones a efectuar.
- Debe poder medirse fácilmente a bajas concentraciones y durante cortos períodos de tiempo con técnicas de medida que no presenten problemas de interferencias.
- No debe condensar fácilmente.
- Debe ser un producto comercial y de bajo coste.

Ningún gas cumple todos estos requisitos simultáneamente, aunque existen una serie de gases aceptables. En la práctica se han utilizado diferentes gases, dependiendo su elección de las características de las medidas a realizar y de las disponibilidades instrumentales para su medición. Así, se ha utilizado desde humo y compuestos químicos con olor característico (mentol) hasta hidrocarburos (etano).

Su medición puede realizarse por espectroscopia infrarroja (IR) a niveles de partes por millón (ppm) ( $10^{-6}$ ) y por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (CG-HWD) para el dióxido de carbono o con detector de captura de electrones (CG-ECD) para el óxido de dinitrógeno, compuestos halogenados y hexafluoruro de azufre, a unos niveles para estos últimos compuestos de ppb ( $10^{-9}$ ) en incluso ppt ( $10^{-12}$ ). Con ello se puede disminuir el volumen de gas trazador necesario en el caso de sistemas extensos, aunque desde el punto de vista analítico hay que tener en cuenta que los sistemas de CG-ECD son de difícil estabilización, precisan de frecuentes calibraciones y dan una respuesta secuencial y no lineal, lo que puede dificultar su conexión a un ordenador para tratamiento de los resultados.

Una recomendación general en la utilización de cualquier compuesto como gas trazador es limitar su concentración máxima en aire por debajo (al menos un factor de cuatro) de los valores límites en aire aceptados para dicho compuesto.

En la Tabla 1 se recogen los compuestos más frecuentemente utilizados, su densidad respecto al aire, el valor de referencia ambiental, el método analítico en que generalmente se basa su detección y el margen de trabajo habitual.

**Tabla 1: Características de los gases trazadores más frecuentes**

Gas	Fórmula	Densidad respecto al aire	Valor de referencia en aire* (ppm)	Método analítico	Margen de trabajo (ppm)
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1,53	5000	Infrarrojo CG-HWD	1-2000 50-2000
Óxido de Dinitrógeno	N <sub>2</sub> O	1,53	25	Infrarrojo CG-ECD	1-2000 2-5000
Hexafluoruro de Azufre	SF <sub>6</sub>	5,11	1000	Infrarrojo CG-ECD	1-2000 10 <sup>-7</sup> -2000
R-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	4,18	1000	Infrarrojo	0,1-2000
R-13B1	CF <sub>3</sub> Br	5,13	—	Infrarrojo	0,1-2000
R-115	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	5,31	1000	Infrarrojo	0,1-2000

Valores límite en ambientes de trabajo (TLV-TWA) ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1993-1994. Cincinnati. Oh. USA (1993)

Entre todos estos gases, el más utilizado es el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) seguido de los freones que, además de ser poco tóxicos y no encontrarse habitualmente en el aire, presentan límites de detección muy bajos.

Un monitor de infrarrojo tiene sensibilidad suficiente para el N<sub>2</sub>O, permitiendo la lectura continua de la concentración del mismo en el aire. Sin embargo, la humedad ambiental y el CO<sub>2</sub>, presente pueden interferir en la respuesta del monitor a las condiciones de trabajo en que se realizan las mediciones.

En cuanto al CO<sub>2</sub>, el máximo inconveniente que presenta su utilización es la de ser un componente habitual del aire, teniendo en cambio la gran ventaja de su bajo costo.

## Técnicas de medida con gases trazadores

Básicamente se utilizan tres métodos diferentes para evaluar los caudales de aire mediante gases trazadores: el método de la caída de la concentración, el método de la emisión constante y el método de la concentración constante.

En la tabla 2 se resumen las circunstancias que hacen más adecuada la utilización de los distintos métodos y el equipo mínimo necesario, así como algunas de las ventajas e inconvenientes más significativos.

**Tabla 2: Características de los diferentes métodos de medida**

MÉTODO	UTILIZACIÓN	VENTAJAS	INCONVENIENTES	EQUIPO MÍNIMO
CAÍDA DE LA CONCENTRACIÓN	Renovaciones de aire discretas en periodos cortos	Equipo de medida sencillo, bajo costo y poco consumo de gas trazador	No indicados para mediciones de larga duración.	Botella de gas trazador Ventilador Monitor de gas
EMISIÓN CONSTANTE	Renovación continua de aire durante periodos largos de tiempo	Equipo de medida sencillo	Consumo elevado de gas trazador	Botella de gas trazador Medidor de caudal Ventilador Monitor de gas
CONCENTRACIÓN CONSTANTE	Renovación continua de aire en edificios ocupados	Permite medir la renovación media de aire en periodos largos con variaciones en la renovación y dar detalles de las mismas.	Coste de gas trazador elevado Equipo de medida caro	Botella de gas trazador Medidor de caudal Ventilador Monitor de gas Dosificador del gas trazador

Los tres métodos están basados en la ecuación del balance de masas según la cual la variación de la cantidad de trazador presente se obtendrá de la diferencia entre el generado más el introducido y el eliminado:

$$V \frac{dC}{dt} = F + Q \cdot C_0 - Q \cdot C \quad (1)$$

donde:

V = volumen de aire del recinto (m<sup>3</sup>)

C = concentración de gas trazador en el aire del recinto (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

t = tiempo (h)

F = velocidad de generación de gas trazador en el recinto (m<sup>3</sup>/h)

C<sub>0</sub> = concentración de gas trazador en el aire exterior (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

Q = caudal de aire a través del recinto (m<sup>3</sup>/h)

Si el gas trazador no se halla presente en el aire exterior, C<sub>0</sub> = 0, quedando la ecuación

$$V \frac{dC}{dt} = F - Q \cdot C \quad (2)$$

La ecuación (1) permite el cálculo del caudal de aire a través de un recinto:

$$Q = \frac{F - V \frac{dC}{dt}}{(C - C_0)} \quad (3)$$

Y a partir de (3) se puede calcular el número de renovaciones por hora (velocidad de renovación, N) dividiendo el caudal del aire de entrada por el volumen efectivo del recinto.

### Método de la caída de la concentración

Es el método más utilizado para determinar velocidades de ventilación aunque también es adecuado para medir infiltraciones e identificar zonas de estancamiento. Consiste en introducir una cantidad conocida de gas trazador en el recinto que se quiere controlar, mezclarlo completamente con el aire para obtener una concentración uniforme y medir la caída de la misma a lo largo de un periodo de tiempo. Ello se puede llevar cabo mediante la toma y análisis de muestras de corta duración o mediante sistemas continuos de medida. Para lograr unas condiciones iniciales adecuadas el gas trazador puede liberarse a través del sistema de ventilación o en un punto del recinto, aunque en este último caso se precisará de un sistema mecánico (ventilador) para lograr una concentración homogénea. Si el aporte de aire al recinto es constante la concentración de gas trazador caerá exponencialmente con el tiempo. En la figura 1 se representa la relación concentración/tiempo lineal (a) y semilogarítmica (b) a considerar en este método. La velocidad de renovación de aire se calcularía en este caso según:

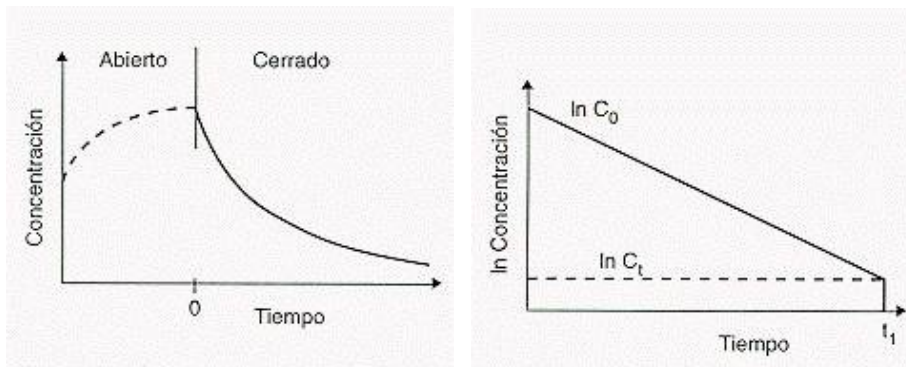
$$N = \frac{\ln C_0 - \ln C_t}{t} \quad (h^{-1})$$

donde:

$C_0$  = concentración en el tiempo 0 ( $m^3/m^3$ )

$C_t$  = concentración en el tiempo t ( $m^3/m^3$ )

t = periodo de medida (h)



**Fig. 1: Método de la caída de la concentración**

### Método de la emisión constante

Este método se utiliza principalmente para medir velocidades de ventilación, caudales de aire en los conductos o efectuar un seguimiento de la contaminación existente. Consiste en liberar el gas trazador en el recinto a una velocidad constante a lo largo de todo el periodo de medida. Cualquier cambio que se presente en la concentración de gas trazador estará relacionado con la velocidad de renovación.

Si la renovación del aire y la concentración de gas trazador que se va a medir son constantes las renovaciones de aire se calculan mediante la fórmula:

$$N = \frac{F}{V * C} \quad (h^{-1})$$

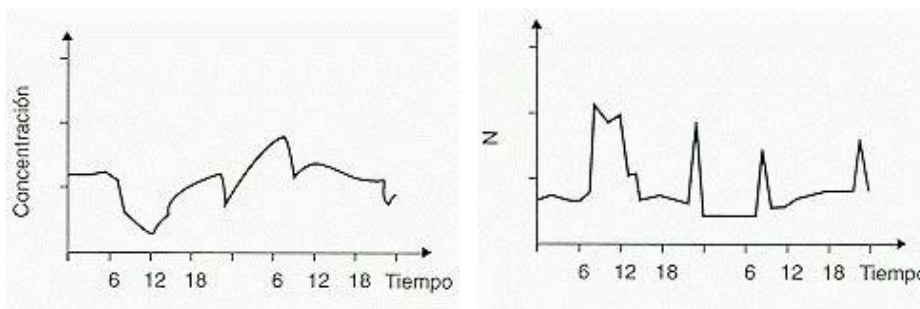
donde:

F = velocidad de introducción de gas trazador en el recinto ( $m^3/h$ )

V = volumen de aire del recinto ( $m^3$ )

C = concentración de gas trazador en el aire del recinto ( $m^3/m^3$ )

Cuando la renovación de aire o la emisión de gas trazador no se mantengan constantes, deberá recurrirse a la ecuación de balance de masas. En la figura 2 se representa un ejemplo en el cual, a partir de la medida de la concentración del gas trazador a lo largo del tiempo (a), se pueden obtener las renovaciones hora a hora a lo largo del mismo periodo de tiempo (b).



**Fig. 2: Método de la emisión constante**

### Método de la concentración constante

Puede aplicarse en los mismos casos que el método de la emisión constante. En este método el gas trazador se dosifica para mantener su concentración constante. La renovación del aire es directamente proporcional a la velocidad de emisión de gas trazador requerida para mantener la concentración constante.

$$N = \frac{F}{V \cdot C} \text{ (h}^{-1}\text{)}$$

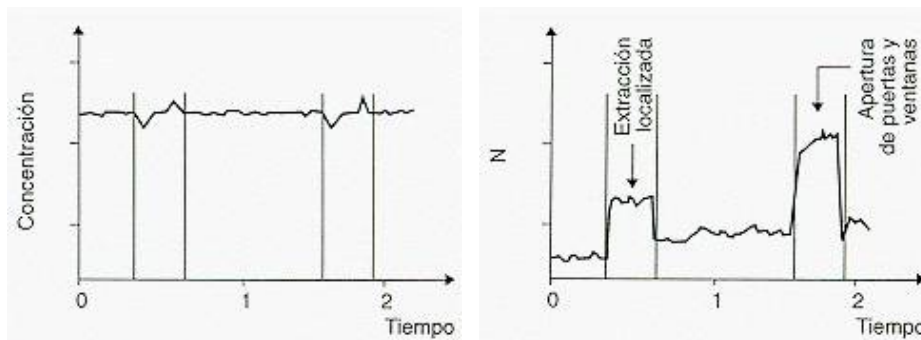
donde:

F = velocidad de introducción de gas trazador en el recinto ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

V = volumen de aire del recinto ( $\text{m}^3$ )

C = concentración de gas trazador en el aire del recinto ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

Si la renovación de aire o la emisión de gas trazador no se mantienen constantes, deberá recurrirse a la ecuación de balance de masas. En la figura 3 se muestra como pequeñas variaciones en la concentración del trazador (a) corresponderían a variaciones en la renovación de aire (b).



**Fig. 3: Método de la concentración constante**

## Aplicaciones en ventilación industrial

### Medida de la eficacia de los sistemas de ventilación por extracción localizada

El método utilizado en este tipo de medidas es el de la emisión constante. El difusor del gas trazador se coloca en la zona de trabajo, dentro del área de acción del extractor, a una altura apropiada por encima de la superficie de trabajo dependiendo de la naturaleza de la actividad que se esté realizando.

La toma de muestra se realiza en la zona respiratoria del trabajador, equivalente a un muestreo personal. El criterio utilizado para medir la eficacia se calcula mediante la relación entre la concentración medida fuera del área de acción del extractor y la concentración medida en el área de extracción, asumiendo una mezcla perfecta del gas trazador con el aire.

### Medida del caudal de aire en conductos

La medición del caudal de aire en conductos con los métodos clásicos (tubos de Pitot, sondas de velocidad) es de difícil realización cuando éstos tienen muchos codos y el flujo es turbulento. La técnica de gases trazadores permite efectuar estas medidas con mayor exactitud.

El método utilizado en este tipo de medidas es el de la emisión constante. En las conducciones rectas, la distancia entre el punto de dosificación del gas trazador y el punto de toma de muestras debe ser aproximadamente 25 veces el diámetro del conducto y en conducciones con uno ó más codos, la distancia debe ser aproximadamente 10 veces el diámetro del conducto. En cada caso habrá que hacer diferentes pruebas tomando muestras en diferentes puntos.

La medida del caudal de aire viene dada por la relación entre el caudal de gas trazador suministrado y la concentración en el punto de muestreo.

### Dispersión de contaminantes

Para el estudio de la dispersión de los contaminantes el gas trazador se dosifica y mantiene a una concentración constante y se miden las concentraciones de gas en diferentes puntos de la zona en estudio.

## Aplicaciones en calidad

En los últimos años está tomando gran importancia el tema de la calidad de aire en edificios tanto de oficinas como residenciales. Una

calidad aceptable del aire interior en un edificio no industrial se logra suministrando un aire de ventilación de una calidad específica y en una cantidad adecuada. En estos casos es importante estudiar no sólo el correcto funcionamiento de los equipos de ventilación sino también el seguimiento de problemas relacionados con la difusión de contaminantes, que pueden manifestarse a veces en forma de paso de olores molestos o no deseados, de unas zonas a otras.

La velocidad con la que un gas liberado en una zona de un edificio es detectado en otra puede informar sobre la existencia de paredes porosas, de caminos de paso no previstos o de presiones interiores no identificadas. Además la utilización de técnicas de gas trazador permite conocer las velocidades de renovación, los porcentajes de aire exterior e incluso los aportes de aire por persona.

En los edificios muy compartimentados la ventilación puede ser excesiva en unas zonas e insuficiente en otras, aunque el aporte total de aire de renovación sea el adecuado. Para detectar el origen de los problemas, en algunos casos se requiere la utilización de técnicas que incluyen la utilización de varios gases trazadores. Estas técnicas consisten en liberar gases trazadores diferentes en cada uno de los espacios interconectados a estudiar y medir las concentraciones en función del tiempo.

## Bibliografía

(1) BARNETT, J. L., RICHARD, M. L. and ROSE, V.E.

**A Tracer Method for Quantifying Contamination of Building Supply Air: Reentrainment of Laboratory Hood Exhausts**  
Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 44 (8), 580-582, (1983)

(2) CAPLAN, K. J. and KNUTSON G. W.

**A performance test for laboratory fume hoods**  
Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 43 (10), 722-737, (1982)

(3) CORNU, J. C., GAILLARDIN, M.

**L'aéraulique des sorbonnes de laboratoire. Revue bibliographique. Cahiers de notes documentaires**  
ND 1920-151-93, (1993)

(4) Di BERARDINIS, L. J., FIRST, M. W. and IVANY, R. E.

**Field Results of an In-Place, Quantitative Performance Test for Laboratory Fume Hoods**  
Appl. Occup. Environ. Hyg. 6 (3), 227-231, (1991)

(5) GRIEWE, P. W.

**Measuring Ventilation using Tracer-gases**  
Brüel & Kjaer, Naerum, Denmark, 1989

(6) KALLIOKOSKI, P., NIEMELÄ, R. and SALMIVAARA, J.

**The tracer gas technique. A useful tool for industrial hygiene**  
Scand. J Work Environ. Health 6, 123-130, (1980)

(7) NAGDA, N. L., RECTOR, H. E. and KOONTZ, M. D.

**Guidelines for Monitoring Indoor Air Quality**  
Hemisphere Publishing Corporation, Washington, (1987)

(8) NAGDA, N.L., HARPER, J.P.

**Desing and Protocol for Monitoring Indoor Air Quality**  
ASTM (STP; 1002), Philadelphia, PA 19103

(9) NIEMELÄ, R., TOPPILA, E. and TOSSAVAIEN, A.

**The Measurement of Ventilation Parameters by Means of Tracer Gas Techniques and a Microcomputer**  
Ann. Occup. Hyg. 28 (2), 203-210, (1984)

(10) YOCON, J.E., Mc CARTHY, S.M.

**Measuring Indoor Air Quality. A Practical Guide**  
John Wiley & Sons, Chichester, England, 1991