

## EL INDICE DE CONSISTENCIA DEL VIENTO Y SU INCLUSION EN LAS MATRICES DE ESTABILIDAD

por E. Hernández; F. Valero y A. Marmisa  
Cátedra de Física del Aire  
Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense. Madrid

### Introducción

Uno de los problemas de la meteorología es la transformación de los datos meteorológicos en parámetros que cuantifiquen y caractericen la situación atmosférica. En concreto, en la modelización de la dispersión de contaminantes y en estudios puramente climatológicos es de fundamental interés conocer la variabilidad de la dirección del viento en un período de tiempo dado.

Varios son los parámetros utilizados hasta el momento en la medida de la persistencia de la procedencia del viento entre los que cabe resaltar el rango variacional, el coeficiente de persistencia (1) y la desviación standard. Estos índices presentan graves inconvenientes como son respectivamente la falta de información, el carácter mixto y la imposibilidad de la sistematización de su cálculo debido a la naturaleza circular de los ángulos de procedencia del viento.

El objeto de este trabajo es analizar el comportamiento del índice de consistencia del viento (I.C.) que fue introducido por Heidorn (1) para intervalos de 24 horas y que ha sido aplicado en otras investigaciones (2) a períodos equivalentes. Este parámetro fue definido para datos continuos como

$$C_I = \frac{100}{H} \left[ \left( \sum_i^H \text{sen } \theta_i \right)^2 + \left( \sum_i^H \text{cos } \theta_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

Donde H es el número de horas consideradas y  $\theta_i$  es el ángulo de procedencia del viento para la hora i.

Cuando los datos que se poseen están discretizados en sectores, el índice de consistencia viene dado por

$$C_I = \frac{100}{H} \left( C_n^2 + C_e^2 \right)^{1/2}$$

Donde

$C_n = \sum_i H_i \text{cos } \theta_i$  es la proyección de las componentes de la dirección del viento sobre el eje Norte-Sur.

$C_e = \sum_i H_i \text{sen } \theta_i$  es la proyección de las componentes sobre el eje Este-Oeste.

$H = \sum_i H_i$  es el número total de horas del período considerado.

$H_i$  es el número de horas de procedencia del viento del sector i.

$\theta_i$  es el ángulo mitad de la categoría i.

Heidorn (1) comparó dos series de índices de consistencia de 352 datos calculados de forma continua y discreta respectivamente, obteniendo que presentaban un coeficiente de correlación  $r = 0.99$ , por lo que se puede

considerar que ambos índices son portadores de la misma información.

El valor del I.C. varía entre 0 y 100, siendo nulo cuando la suma de las componentes Norte-Sur y Este-Oeste es cero (el viento ha soplado igualmente en todas direcciones) y 100 cuando la dirección del viento es constante durante el período de tiempo estudiado. Por lo tanto, al estar cuantificado da una idea clara de la variabilidad en el rumbo; además, es un índice puro, pues sólo tiene en cuenta los datos de dirección, y su cálculo se puede sistematizar de forma sencilla.

Debido a las ventajas presentadas por este índice se va a proceder a un estudio detallado de él para períodos menores que el diario. Ensayándose posteriormente la construcción de nuevos tipos de rosas de vientos y la esquematización de una nueva forma de matriz de estabilidad con base en las propiedades del I.C.

### Estudio del Índice de Consistencia

En este apartado se pretende profundizar en el conocimiento del I.C. del viento para intervalos de 12 y 6 horas. Para ello, se analizará su relación con otros índices que miden la constancia de la dirección del viento y con otras variables meteorológicas.

#### Índice de consistencia para intervalos de 12 horas.

Para la realización de este estudio se utilizaron los registros de datos procedentes de una torre meteorológica situada en la localidad de Trillo (Guadalajara) correspondientes a los meses de Febrero y Marzo de 1.981. Los registros contienen los valores del rumbo y de la velocidad del viento para cada hora, obteniéndose éstos como promedio de los 30

valores que el sensor mide en este intervalo de tiempo. La dirección del viento se mide en grados según el criterio meteorológico (0-360, coincidiendo con el Norte y aumentando en sentido horario) en forma continua con una precisión de  $\pm 0.1^\circ$ . Los valores de la velocidad del viento vienen expresados en m/s con una precisión de  $\pm 0.1$  m/s.

A partir de estos datos se calculó la serie de valores del  $C_1$  para intervalos de 12 h durante estos dos meses y la análoga de la desviación standard de la dirección del viento. Este último parámetro, aunque de cálculo muy laborioso, se considera representativo de la variabilidad del rumbo y, por tanto, su comparación con el I.C. permitirá conocer la aplicabilidad de este índice.

Para analizar este punto se realizó el ajuste lineal entre el índice de consistencia y la desviación standard, obteniéndose para un total de 108 pares de valores un coeficiente de correlación  $r = 0.90$  (significativo al 99 por ciento de confianza) mediante la recta:

$$\sigma = 133.30 - 1.24 C_1 \quad (\text{en grados})$$

$$\sigma = 2.32 - 0.021 C_1 \quad (\text{en radianes})$$

Entonces, dada la alta correlación entre  $\sigma$  y  $C_1$ , puede utilizarse el segundo de estos índices como medida de la persistencia del rumbo sin que ello suponga pérdida de información significativa.

Para estudiar las posibles relaciones entre el índice de consistencia y el valor medio del módulo de la velocidad del viento, se procedió a la representación conjunta de estos dos parámetros (figura 1). Se observa que, si bien no existe ninguna relación funcional, para velocidades menores de 7.5m/s cualquier  $C_1$  es posible mientras que para velocidades mayores de 7.5m/s, el I.C. siempre es mayor que 85.

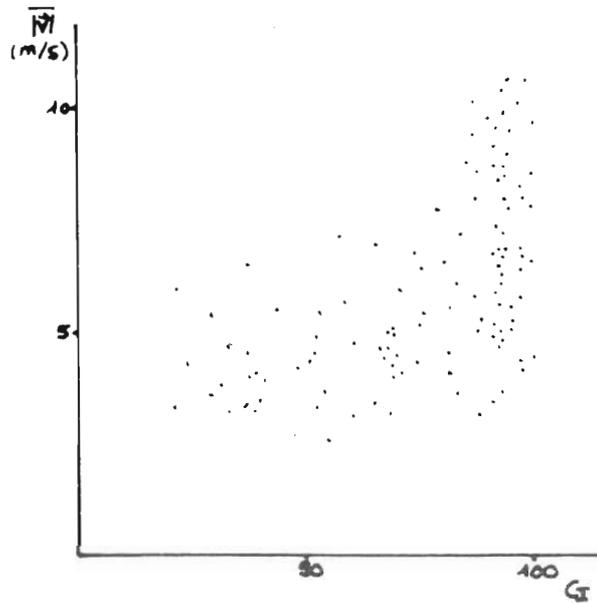


FIGURA I  
Módulo del viento medio para periodos de 12 horas en función del índice de consistencia.

#### Índice de consistencia para periodos de 6 horas

Para la realización de este apartado se utilizaron los datos relativos al viento y a la estabilidad atmosférica procedentes del Centro de Investigación Nuclear de Soria (CINSO) correspondientes a los meses de Marzo, Abril y Mayo del año 1982. El equipo con el que se han obtenido los datos es un anemocinómetro de tipo mecánico situado a 12 metros de altura con sistemas para la detección de la dirección del viento. Se suministran sistemáticamente datos horarios de velocidad y dirección media del viento, así como de la categoría de estabilidad de Pasquill (3). Los datos del rumbo vienen expresados de forma discreta siendo dividida la circunferencia en 16 sectores (22.5 grados de amplitud cada sección). Los valores de la velocidad media del viento vienen en km/h con una precisión de  $\pm 0.1$  km/h. Las categorías de estabilidad son calculadas a partir de las bandas de viento, asignando a cada caso una de las seis categorías establecidas por Pasquill-Turner (A, B, C, D, E, F).

Análogamente a lo expuesto en el apartado anterior, se calcularon las series de valores de  $C_1$  y  $\sigma$ , pero esta vez para intervalos de 6 horas. Se realizó una regresión lineal entre ambas, obteniéndose para los 364 pares de datos un coeficiente de correlación  $r = 0.95$  (significativo al 99 por ciento de confianza) mediante la recta de ajuste:

$$\sigma = 146.26 - 1.384 C_1 \quad (\text{en grados})$$

$$\sigma = 2.55 - 0.024 C_1 \quad (\text{en radianes})$$

Por tanto, a la vista del valor de  $r$ , es válido usar el índice de consistencia como parámetro de medida de la variabilidad de la dirección del viento para intervalos de 6 horas.

La figura II muestra que el comportamiento del I.C. calculado para intervalos de 6 horas con respecto al módulo medio de la velocidad del viento ( $|\vec{V}|$ ) es análogo al  $C_1$  correspondiente a 12 horas: para valores de  $|\vec{V}|$  menores que 25 km/h ( $\sim 7$  m/s) el I.C. barre todo su rango de variación, mientras que cuando  $|\vec{V}|$  sobrepasa este umbral  $C_1$  siempre es mayor que 90.

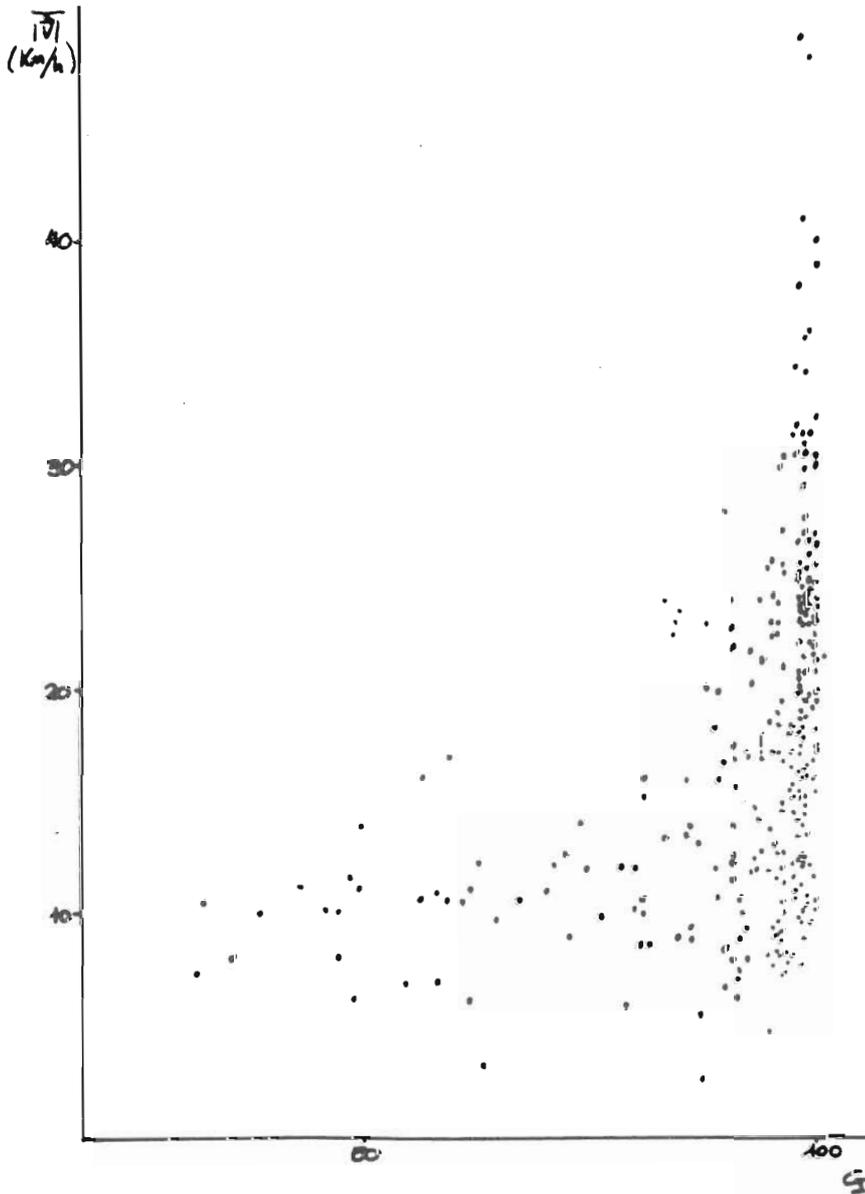


FIGURA II  
Módulo del viento medio para periodos de 6 horas en  
función del índice de consistencia.

#### Aplicaciones del índice de consistencia

Anteriormente, se ha puesto de manifiesto la capacidad del índice de consistencia como parámetro de medida de la variabilidad del viento para períodos menores al diario y, en particular, para intervalos de 6 horas. En esta sección se va a intentar la aplicación de este parámetro, aprovechando su última propiedad, en problemas concretos en los que el conocimiento de la persistencia del rumbo sea de fundamental interés.

#### Aplicación a rosas del viento: rosa de índices de consistencia

Mediante las rosas de viento se pretende representar el régimen de vientos en un lugar determinado. Estos diagramas permiten visualizar rápidamente las distribuciones tanto de frecuencias de aparición como de velocidad del viento para cada una de las direcciones en que se divide la circunferencia y, por tanto, hacen posible reconocer inmediatamente las direcciones predominantes, así como la inten-

sidad de éstas. Normalmente se construyen a partir de los datos horarios de velocidad y dirección del viento.

Las rosas del viento presentan el inconveniente de no informar de si las incidencias del viento en un determinado sector son continuas en el tiempo o si se trata de apariciones esporádicas debidas al giro del viento al pasar de unos sectores a otros. En otras palabras, no suministra ningún conocimiento a cerca de la consistencia del viento en cada sector.

Para introducir el concepto de persistencia es necesario referirse al viento en períodos lo suficientemente largos como para contener varias medidas del rumbo. Normalmente los aparatos suministran registros del viento de carácter horario, lo que obliga a caracterizar la consistencia del viento para intervalos de varias horas.

A continuación se propone una nueva forma de rosa de viento que tiene en cuenta la persistencia del mismo y que, por lo anterior-

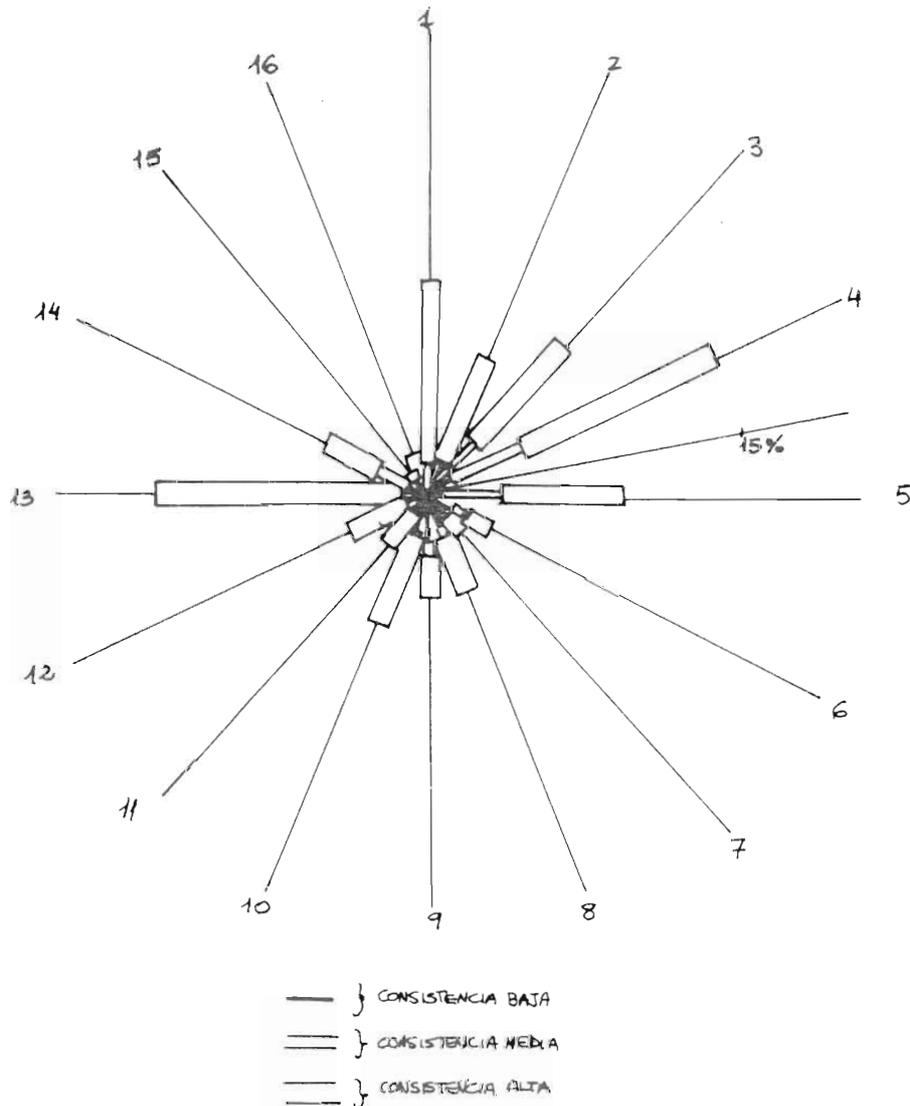


FIGURA III  
Rosa de índices de consistencia

mente expuesto, va a representar al viento en períodos mayores que una hora. En concreto, en el presente estudio, se ha elegido un período de 6 horas, número suficientemente grande para poder calcular el índice de consistencia. Los datos utilizados corresponden a los meses de Marzo, Abril y Mayo de 1.982, suministrados por el CINSO.

Para construir la nueva rosa de vientos se calcularon para cada período de 6 horas el I.C. y los valores medios de la dirección y velocidad del viento. A fin de distribuir los valores del índice de consistencia se eligieron tres

clases distintas: índices de consistencia mayores de 95 (correspondientes a una fluctuación de la dirección del viento menor o igual a  $90^\circ$ ); comprendidos entre 95 y 85 (lo que equivale a una apertura angular del rumbo entre  $90$  y  $180$ ) y menores de 85 (variaciones de más de  $180^\circ$ ). Estas clases pueden ser denominadas como de consistencia alta, media y baja respectivamente. Se estudió para cada dirección el número de incidencias del viento medio, clasificándolas en función de su grado de persistencia. Así, se construyó la rosa de índices de consistencia que aparece en la figura III. Se observa que las direcciones más frecuentes

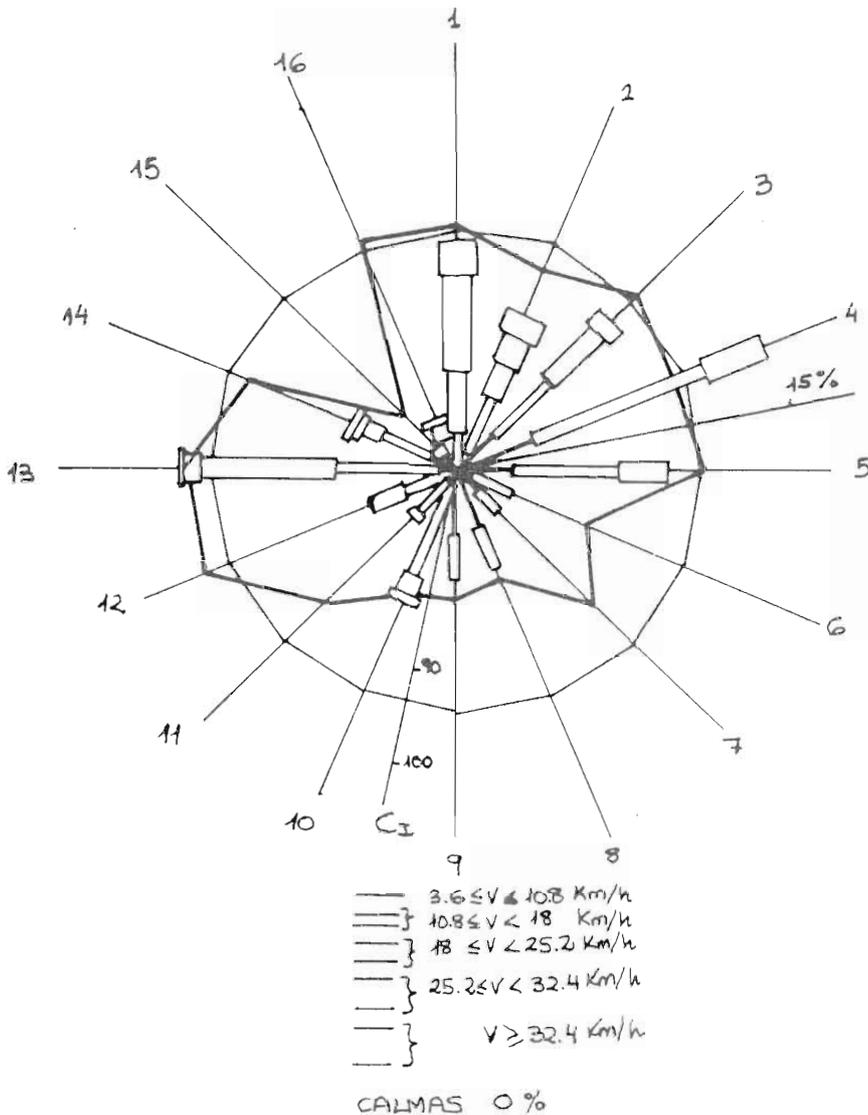


FIGURA IV  
Rosa de "intensidad-consistencia".

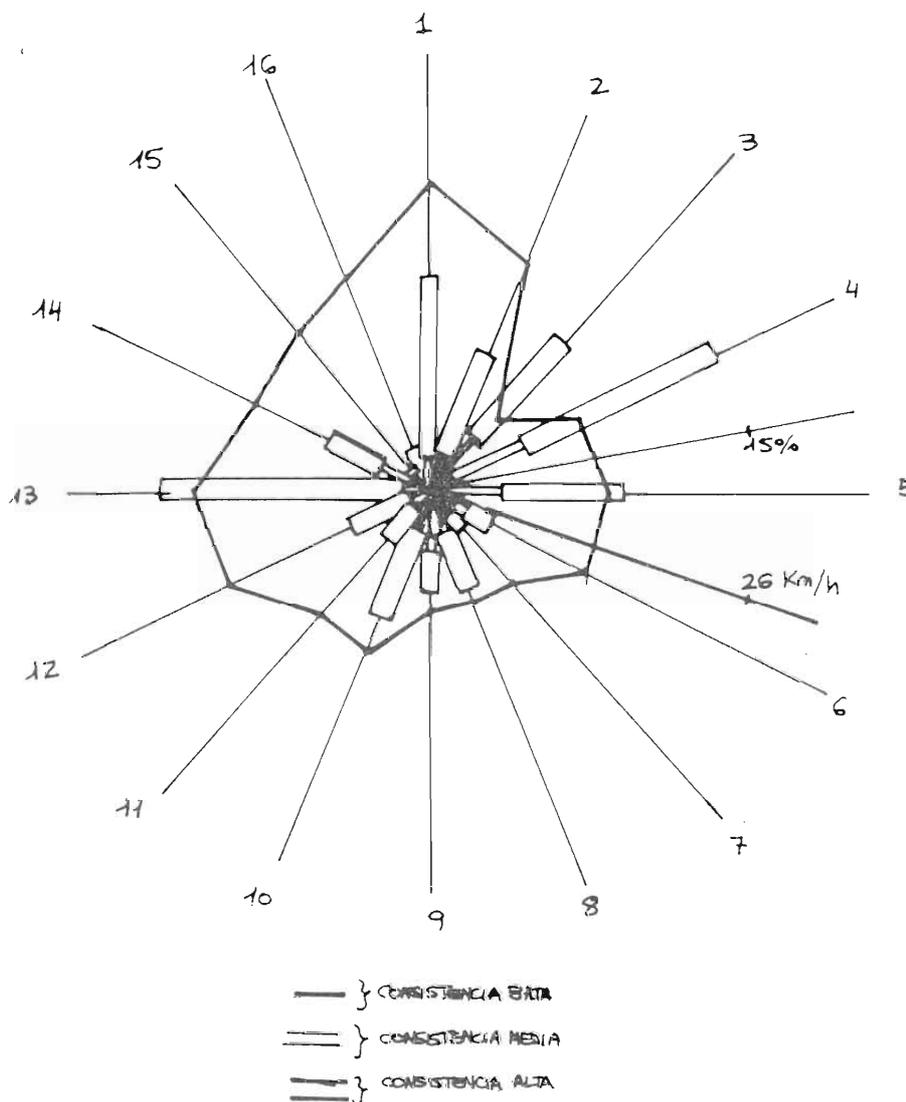


FIGURA V  
Rosa de "consistencia-intensidad".

no son las más consistentes y viceversa.

La representación da gran información sobre la variabilidad del viento en cada sector, pero sin embargo, no se tiene conocimiento de la distribución de intensidades del viento en cada dirección. Para resolver el problema anterior se idearon dos nuevos tipos de rosas de viento que, de alguna forma, aúnan todas las propiedades del viento que interesa conocer.

En la primera, a la que se podría denominar de "intensidad-consistencia", se superpone a la usual distribución de intensidades del

viento, en este caso en medias de 6 horas, según direcciones, un diagrama cerrado de índices de consistencia medios. Esta rosa para el caso concreto en estudio, aparece representada en la figura IV, en la que también se ha superpuesto la circunferencia correspondiente a  $C_T = 95$ , para que así se puedan determinar de un modo inmediato las direcciones fuertemente consistentes.

Otra forma alternativa para la representación "completa" de las propiedades del viento sería la rosa de "consistencia-intensidad". En ella se superpone a las distribuciones de I.C. según direcciones, un diagrama cerrado de ve-

locidades medias del viento (figura V).

Las dos últimas representaciones propuestas resultan mas ricas en contenido que las tradicionales rosas de viento al introducir la variabilidad del rumbo; proporcionan el conocimiento de la frecuencia de aparición en los distintos sectores de procedencia del viento y dan cuenta de la intensidad y de la consistencia en la dirección del flujo. El uso de uno u otro de los diagramas dependerá de su aplicación posterior y de la información que se considere primordial, proporcionando, obviamente, la visión mas detallada y completa el uso conjunto de ambas formas de representación.

#### **Aplicación a las matrices de estabilidad**

Las matrices de estabilidad son muy utilizadas para describir conjuntamente la distribución de las intensidades del viento y de las categorías de estabilidad para cada uno de los sectores en que se divide la circunferencia. Las aplicaciones de estas matrices en la predicción de los niveles de inmisión y en la cuantificación de los impactos ambientales son sobradamente conocidas. Como se sabe, para su construcción se utilizan datos horarios, pudiéndose emplear, por tanto, sus resultados para analizar fenómenos de este orden temporal. Con el fin de que este tipo de representaciones pueda extenderse a estudios de niveles de contaminación para períodos más largos, se ha introducido una forma de matriz de estabilidad equivalente a la normalmente utilizada, pero apropiada para intervalos de 6 horas.

En las matrices horarias se ordenan los

datos en función de su categoría de estabilidad de Pasquill-Turner, pero para períodos mayores deja de tener sentido asignar a cada caso una de estas seis categorías. Entonces, el primer punto a considerar será definir una nueva distribución de categorías de estabilidad. Se ha considerado lo más apropiado pasar de las seis existentes a únicamente tres: inestable, neutra y estable; más coherentes con el carácter de media que tienen los datos para este intervalo de tiempo.

Asimismo, la ordenación de las velocidades del viento se modificó ligeramente, ya que al trabajar con valores medios el rango de variación de la velocidad es menor. Así, los dos últimos intervalos de velocidad, de los seis usuales en las matrices clásicas, se reunieron en uno, definido por los flujos de velocidad superior a 25.5 km/h (7 m/s). No se eliminó la clase 0 km/h - 3.6 km/h, correspondiente a las calmas, ya que, aunque de improbable aparición en medias de 6 horas, debe recibir un tratamiento especial en caso de existir.

La variabilidad en la dirección del viento va a ser el factor determinante de las concentraciones que se puedan alcanzar, por lo que sería de gran interés introducir en las matrices de estabilidad un parámetro que caracterice este efecto: el índice de consistencia. La forma más apropiada de tenerlo en cuenta es clasificar las incidencias del viento según cada sector en los tres grupos de consistencia alta, media y baja, definidos anteriormente, para cada categoría y rango de velocidad determinado.

Con todo lo hasta aquí tratado, la matriz de estabilidad propuesta se esquematizaría del siguiente modo:

Dirección i.

Frecuencia de aparición dirección i =

V (km/h)	INESTABILIDAD			NEUTRALIDAD			ESTABILIDAD		
	C <sub>1</sub>								
	>95	95-85	<85	>95	95-85	<85	>95	95-85	<85
0-3.6									
3.6-10.8									
10.8-18									
18-25.2									
25.2									

Donde en cada casilla se incluiría la frecuencia relativa de aparición de las incidencias del viento en ese sector con la categoría de estabilidad, rango de velocidad y grado de consistencia correspondientes.

Cabría preguntarse si tiene sentido distinguir entre categorías de estabilidad y grados de variabilidad de la dirección del viento en períodos de 6 horas, teniendo en cuenta que para intervalos de una hora están ligados mediante una relación funcional. Es más, algunos autores (4) utilizan la dispersión angular del viento como medida para clasificar la estabilidad atmosférica. A fin de comprobar este punto se estudiaron las distribuciones de los grados de consistencia para cada una de las tres clases de estabilidad, a partir de los datos de dirección del viento y categorías de estabilidad suministrados por el CINSO. Los resultados obtenidos permiten afirmar que para intervalos de 6 horas no es posible caracterizar mediante el índice de consistencia la categoría de estabilidad. Por tanto, tiene pleno sentido diferenciar en la matriz de estabilidad propuesta todos los parámetros utilizados.

El uso de la matriz de estabilidad introducida en el presente capítulo permite una notable simplificación a la hora de ser aplicada a un problema particular. Todas las frecuencias de aparición para grados de consis-

tencia medios o bajos van a implicar giros del penacho, provocados por la fluctuación del viento, mayores de 90°. Esto hace que el volumen en que se reparten los contaminantes sea muy grande, produciéndose entonces contracciones bajas que pueden ser eliminadas de los estudios. Tendrán sólo que ser analizados aquellos casos en que el índice de consistencia es mayor de 95.

Evidentemente, las fórmulas existentes para el cálculo de concentraciones a partir de las matrices de estabilidad horarias dejan de ser válidas para las aquí propuestas.

### Conclusiones

La comparación realizada entre índice de consistencia y desviación standard ha puesto de manifiesto que el I.C. resulta ser un parámetro apropiado para la medida de la variabilidad de la dirección del viento para períodos no sólo diarios sino también de 12 y 6 horas. Asimismo, se ha constatado que, si bien no existe una relación funcional entre la velocidad media del viento y el índice de consistencia para los dos períodos estudiados, los valores de la velocidad por encima de un umbral de 7 m/s (~ 25 km/h) están siempre acompañados de I.C. altos.

Para representar el grado de consistencia que posee el rumbo para cada una de las direcciones de procedencia del viento, se ha propuesto la llamada rosa de índices de consistencia que caracteriza adecuadamente esta propiedad.

Se han diseñado otros dos diagramas (rosa de "intensidad-consistencia" y rosa de "consistencia-intensidad") cada uno de los cuales da información, tanto de la variabilidad en rumbo, como de la intensidad, según las distintas direcciones. El uso conjunto de las dos rosas suministra un conocimiento completo de las distribuciones de velocidades y del grado de persistencia en dirección para cada uno de los sectores en que se divide la circunferencia.

Finalmente, se ha presentado una nueva matriz de estabilidades aplicable a intervalos de 6 horas en la que se ha introducido la variabilidad de la dirección del viento en función del índice de consistencia.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) Heidorn, K. C. (1977): "An index to measure consistency of the wind direction for periods around one day". Atmospheric Environment, 12, 993 - 996.
- (2) Valero, F.; Hernández, E. (1983): "Índice de consistencia de la dirección del viento". Revista de Geofísica (en prensa).
- (3) Pasquill, F. (1962). "Atmospheric Diffusion". London.
- (4) Demarrais, G.A. (1978): "Atmospheric Stability class determinations on 481 - meter tower in Oklahoma". Atmospheric Environment, 12, 1957 - 1964.

#### Agradecimientos:

*Los autores desean agradecer a la Central Nuclear de Trillo y a la Junta de Energía Nuclear las facilidades mostradas para la obtención de los datos empleados en el trabajo.*