

# UN ÍNDICE DE MESOESCALA PARA LA CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL VALLE DEL EBRO

Francisco Espejo Gil<sup>(1)</sup>, Amadeo Uriel González<sup>(2)</sup>, Roberto Serrano Notivoli<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Agencia Estatal de Meteorología. C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28040 Madrid, [fespejog@aemet.es](mailto:fespejog@aemet.es)

<sup>(2)</sup> Agencia Estatal de Meteorología. Paseo del Canal, 17, 50007 Zaragoza, [aurielg@aemet.es](mailto:aurielg@aemet.es)

<sup>(3)</sup> Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Av. Montañana, 1.005, 50059 Zaragoza, [rserrano@ead.csic.es](mailto:rserrano@ead.csic.es)

## 1. Introducción y objetivos

El valle del Ebro (Fig. 1) constituye un corredor natural entre las masas de aire que se sitúan sobre Océano Atlántico (Mar Cantábrico) y el Mar Mediterráneo. Sus peculiaridades orográficas, inscrito entre la cadena pirenaico-cantábrica, por un lado, y el reborde nororiental de la Meseta, el Sistema Ibérico, condicionan enormemente la circulación del aire a lo largo del eje del Ebro. La distinta naturaleza, en términos de temperatura y de humedad, de las masas de aire atlántica y mediterránea determina los tipos de tiempo y, por ende, el clima del valle.

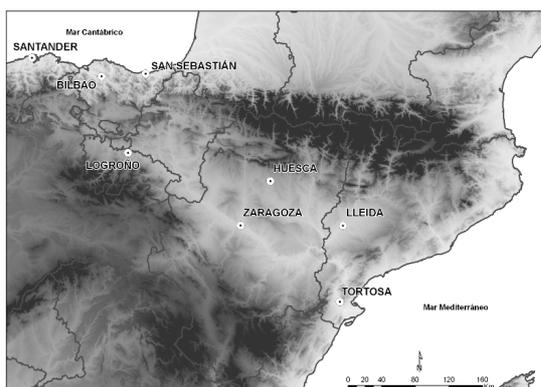


Fig. 1.- El Valle del Ebro con la localización de los puntos considerados en el estudio.

De un modo muy simplificado, se podría afirmar que, en última instancia, la diferencia de presiones entre el Cantábrico y el Mediterráneo va a regir la dirección del flujo de aire y, por tanto, el tipo de tiempo en el valle, y un objetivo de esta línea de investigación es probar esta afirmación mediante la creación de un índice sintético que evalúe la relación de esa diferencia de presiones con el clima del valle.

Así, se define un índice normalizado entre la presión de dos puntos extremos A y B del valle (1), de manera análoga a otros índices como por ejemplo el índice del Mediterráneo Occidental (WeMoI) (López-Bustins, 2007).

$$I^i = \frac{P_A^i - \overline{P_A}}{\sigma_A} - \frac{P_B^i - \overline{P_B}}{\sigma_B} \quad (1)$$

Este índice sintético para el valle del Ebro se ha aplicado a trabajos anteriores (Espejo *et al.*, 2009) y, a escala mensual tomando como A el observatorio de San Sebastián-Igueldo y como B el observatorio del Ebro en Tortosa, tiene una buena correlación con las frecuencias del viento por cuadrantes, con la temperatura y con el número de días de precipitación en Zaragoza.

El objetivo particular de este trabajo es continuar con la investigación de este índice, afinándolo y extendiendo el estudio de su correlación con el clima de otros puntos del valle.

## 2. Determinación del índice con los vientos horarios

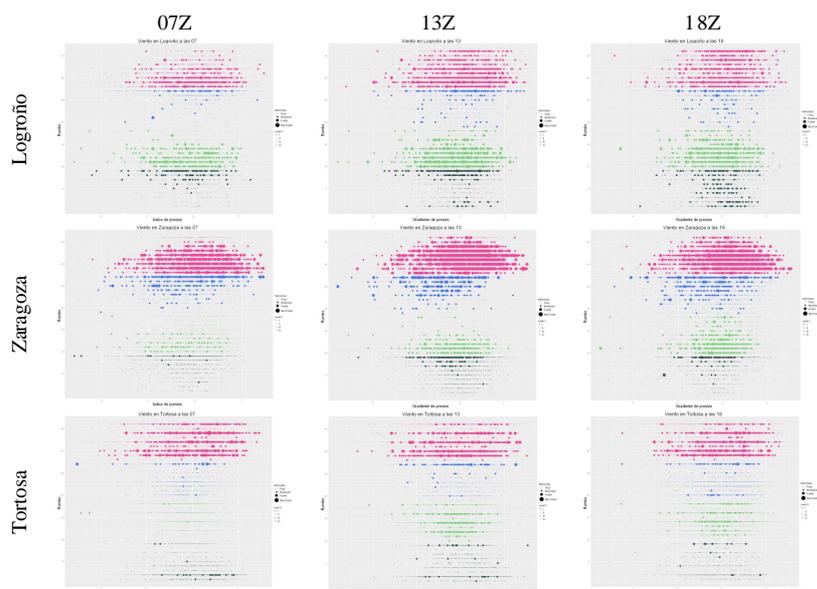
Para realizar el primer objetivo del trabajo, una mejor determinación del índice, se evalúan otras posibles combinaciones de puntos extremos para su cálculo y se comprueba su correlación con los vientos, con datos diarios a 07, 13 y 18 Z, en frecuencia e intensidad. El índice se calcula utilizando los pares de puntos Santander-Tortosa y Bilbao-Tortosa, junto con el par San Sebastián-Tortosa, ya analizado en un trabajo previo, y se estudian las correlaciones con el viento en los observatorios principales situados en el eje del río: Logroño, Zaragoza y Tortosa para el periodo 1981-2010.

Es obvio que los modelos numéricos actuales dan una excelente predicción del viento, por lo que la utilidad de este índice como herramienta de predicción es escasa y este ejercicio se hace con el único objeto de comprobar qué combinación de extremos para el cálculo del índice refleja mejor el flujo de viento que se supone condicionará en buena parte el clima del valle.

En la Fig.2 se muestra la distribución de los vientos horarios a las 07, 13 y 18 Z para Logroño, Zaragoza y Tortosa, como representantes del tramo alto, medio y bajo del valle, en función del índice y del rumbo. La intensidad se refleja en el tamaño de los puntos, teniendo en cuenta la división estándar entre vientos flojos, moderados, fuertes y muy fuertes. Por

último, se asigna un código diferente de color a cada cuadrante.

La Fig.2 muestra claramente alguna de las características más destacadas de la distribución de viento en el valle: que éste se acelera durante las horas centrales del día y se orienta más según la dirección dominante (en sentido amplio NW-SE) del eje del Ebro, y que en la zona central e inferior del valle el viento fuerte dominante es del cuarto cuadrante (el cierzo), mientras que en el tramo alto



del valle son igualmente relevantes como vientos fuertes los surestes (segundo cuadrante).

Fig. 2.- Distribución de vientos horarios a las 07, 13 y 18Z según los valores del índice para Logroño, Zaragoza y Tortosa. Los puntos en verde oscuro corresponden al primer cuadrante, en verde claro al segundo, en azul al tercero y en magenta, al cuarto.

También, visualmente, se intuye la correlación que hay entre los valores altos del índice y la mayor frecuencia de vientos del cuarto cuadrante y los valores bajos y la mayor frecuencia de los del segundo cuadrante, aunque hay mucha dispersión y, desde luego, este no es un hecho automático, por lo que debe haber otros factores a escalas mayores y menores que las del propio valle que influyen en la configuración de los vientos. Uno de estos factores es el régimen de brisas que se aprecia claramente en Tortosa, pero que tiene influencia en el resto del sector inferior del Ebro y, ocasionalmente, en el central.

Estudiando los resultados ofrecidos por esta correlación de datos diarios de vientos horarios a 07, 13 y 18Z, con las distintas combinaciones posibles para el índice (Santander-Tortosa, Bilbao-Tortosa y San Sebastián-Tortosa), resulta que son las dos primeras las que ofrecen mejores resultados, especialmente la correlación entre las direcciones

clasificadas por horas e intensidades con el índice calculado con Santander y Tortosa, por lo que el índice calculado así será el que se utilice para la caracterización climática en el apartado 3 de este trabajo. El estudio de la correlación de la fuerza del viento en estas horas y de la dirección del mismo (reducidas a cuadrantes) con el índice mesoscalar calculado con Santander y Tortosa arroja resultados interesantes y aparentemente contradictorios que merece la pena comentar.

La Fig.3 muestra las correlaciones estadísticamente significativas (al 99%) entre índice e intensidad del viento, para los datos diarios a las 07, 13 y 18Z y para los tres observatorios considerados. Dada la gran cantidad de datos considerados las correlaciones no son excesivamente fuertes, pero en general se aprecian correlaciones moderadas para los vientos flojos, positivas en todos los observatorios, y mayores a las 07Z. Es decir, a otras horas, especialmente a mediodía, son claramente otros factores (brisas, vientos locales...) los que determinan la formación de los vientos flojos.

En el tramo alto del Valle, los vientos moderados presentan correlaciones negativas con el índice de presión, lo que refleja que los vientos moderados más significativos son los del SE. No sucede así en los otros sectores del valle del Ebro. Por último, la menor cantidad de miembros y la mayor dispersión de causas (especialmente las debidas a los fenómenos convectivos) hace que las correlaciones entre el índice y los vientos de intensidad fuerte sean bajas o no significativas.

| LOGROÑO   | 07Z   | 13Z   | 18Z   |
|-----------|-------|-------|-------|
| Flojos    | 0,31  | 0,19  | 0,26  |
| Moderados | -0,29 | -0,24 | -0,19 |
| Fuertes   | NS    | NS    | NS    |
| ZARAGOZA  | 07Z   | 13Z   | 18Z   |
| Flojos    | 0,25  | NS    | 0,17  |
| Moderados | 0,31  | 0,33  | 0,28  |
| Fuertes   | NS    | 0,17  | 0,15  |
| TORTOSA   | 07Z   | 13Z   | 18Z   |
| Flojos    | 0,37  | 0,20  | 0,21  |
| Moderados | 0,19  | 0,25  | 0,28  |
| Fuertes   | NS    | NS    | 0,31  |

Fig. 3.- Correlaciones entre el índice mesoscalar y la intensidad de los vientos horarios a 07, 13 y 18Z.

La correlación entre índice y direcciones de viento (Fig. 4) presenta unos resultados aparentemente contradictorios, aunque se explica por la enorme cantidad y dispersión de los datos que se utilizan. Dada la configuración del valle, las frecuencias dominantes del viento en todos los observatorios considerados son del cuarto y segundo cuadrantes, siendo los del primero y tercer cuadrantes muy poco representativos. Sin embargo, en bastantes casos aparecen mayores correlaciones entre el índice y las frecuencias de los vientos en el primer (especialmente) y tercer cuadrante que para el cuarto, con correlaciones inexistentes entre el índice y la frecuencia de vientos del segundo cuadrante utilizando datos horarios.

|          | 07Z  |       | 13Z  |       | 18Z  |       |
|----------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Logroño  | 0,39 | -0,15 | 0,19 | -0,43 | 0,29 | -0,57 |
|          | 0,27 | NS    | 0,07 | 0,08  | 0,14 | NS    |
| Zaragoza | NS   | -0,16 | 0,13 | -0,31 | 0,30 | -0,13 |
|          | 0,17 | 0,07  | 0,26 | NS    | 0,26 | NS    |
| Tortosa  | 0,22 | -0,23 | 0,19 | -0,23 | 0,16 | -0,31 |
|          | 0,20 | NS    | 0,40 | 0,04  | 0,22 | 0,04  |

Fig. 4.- Correlaciones de las frecuencias por cuadrantes de los vientos horarios y el índice mesoscalar. Para cada hora y observatorio, la celda arriba a la derecha representa la correlación para el primer cuadrante, la de abajo a la derecha para el segundo, la de abajo a la izquierda para el tercero y la de arriba a la izquierda la del cuarto.

El caso más llamativo es el de las correlaciones relativamente fuertes y de sentido negativo que hay entre el índice y la frecuencia de vientos del primer cuadrante a las 13 y las 18Z. En principio cabría pensar que estas correlaciones deberían ser positivas, puesto que un viento del nordeste se genera cuando hay una situación sinóptica con mayores presiones en el Cantábrico que en el Mediterráneo y, por tanto, un índice positivo. Sin embargo, la presencia de la cordillera pirenaica inhibe los vientos de esa dirección en una situación así, y de ahí la significativa correlación negativa. La correlación positiva entre índice y frecuencias del tercer cuadrante, cuando en principio podría pensarse que fuese negativa, se puede explicar por los fenómenos convectivos, de mucha relevancia en el valle (Álvarez *et al.*, 2011)

### 3. Caracterización climática del valle del Ebro con el índice mesoscalar

Como se ha comentado anteriormente, la mayor utilidad de este índice es su aplicación a la explicación las características climáticas del valle del Ebro. Se analizan las correlaciones del índice mesoscalar Santander-Tortosa con las temperaturas medias, media de las máximas y media de las mínimas, precipitación, número de días de precipitación, intensidad del viento, humedad relativa y otros factores como el número de días de

niebla o el número de días de tormenta. Se estudia la correlación para el periodo 1961-2010, por meses, estaciones y años para observatorios principales del valle del Ebro: Logroño y Zaragoza junto al propio río y Huesca y Lérida, dentro del valle pero más alejados del eje principal.

|                    | Logroño | Zaragoza | Huesca | Lérida |
|--------------------|---------|----------|--------|--------|
| Precipitación      | NS      | -0,099   | 0,130  | NS     |
| Días de precip.    | -0,144  | -0,312   | -0,328 | -0,366 |
| Temp. máximas      | 0,191   | 0,226    | 0,258  | 0,249  |
| Temp. mínimas      | 0,223   | 0,199    | 0,150  | 0,213  |
| Temp. medias       | 0,206   | 0,216    | 0,214  | 0,235  |
| Humedad            | -0,456  | -0,450   | -0,409 | -0,506 |
| Días vto. >36 Km/h | NS      | 0,604    | 0,318  | 0,398  |
| Días vto. >55 Km/h | -0,236  | 0,565    | 0,218  | 0,198  |
| Días vto. >91 Km/h | NS      | 0,291    | 0,150  | 0,171  |
| Días de niebla     | -0,395  | -0,357   | -0,263 | -0,392 |
| Días de tormenta   | 0,128   | 0,147    | 0,178  | 0,093  |

Fig. 5.- Correlaciones del índice medio anual con las medias anuales de las variables climáticas citadas para los observatorios del valle. Se expresan las significativas al 99% (en cursiva, al 95%).

Los datos para la correlación anual se representan en la Fig. 5. Las correlaciones más fuertes se dan con el viento, lo cual es lógico debido a la concepción y construcción del índice, y con la humedad. Indica que a mayor índice, mas viento, especialmente en Zaragoza. El caso de Logroño de nuevo es especial, por el predominio de los surestes como viento moderado, de ahí el signo negativo de la correlación. La correlación negativa de la humedad sugiere la presencia de flujos mediterráneos con índice negativo y de flujos catabáticos con índice positivo. El número de días de niebla, lógicamente, presenta un comportamiento similar al de la humedad relativa, que también tiene un reflejo en el número de días de precipitación (no tanto en la precipitación total, lo que apunta a más días con poca precipitación cuando dominan los valores negativos del índice).

Las temperaturas anuales: media, media de las máximas y media de las mínimas presentan correlaciones ligeramente positivas con el índice. Este hecho se comentará un poco más adelante junto con las correlaciones de las medias estacionales y mensuales.

Las correlaciones estacionales se muestran en escala de colores en la Fig. 6. Para sintetizar la información al máximo, se representan sólo las correlaciones estadísticamente significativas: las positivas en tonos anaranjados y las negativas en tonos azules.

Las temperaturas presentan una correlación negativa bastante llamativa, especialmente en primavera y en Zaragoza y Huesca. Es decir, cuando el índice es positivo, el flujo predominante es del NW y las temperaturas bajan y cuando el índice es negativo, el flujo es mediterráneo y las temperaturas suben. Las correlaciones mensuales (no mostradas aquí)

| Observatorio              | Logroño |   |   |   | Zaragoza |   |   |   | Huesca |   |   |   | Lérida |   |   |   |
|---------------------------|---------|---|---|---|----------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|
|                           | I       | P | V | O | I        | P | V | O | I      | P | V | O | I      | P | V | O |
| Precipitación             |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de precipitación     |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Temp. máximas             |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Temp. mínimas             |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Temp. medias              |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Humedad                   |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de viento moderado   |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de viento fuerte     |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de viento muy fuerte |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de niebla            |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |
| Días de tormenta          |         |   |   |   |          |   |   |   |        |   |   |   |        |   |   |   |

Fig. 6.- Correlación estacional de las medias mensuales del índice con las de las variables citadas. Se indican las correlaciones significativas. En tonos azules, las negativas y en tonos anaranjados, las positivas: el grado de la correlación es mayor cuanto más oscuro sea el tono.

presentan un comportamiento similar, con correlaciones aún más intensas. El comportamiento de esta correlación a escala anual es diferente (Fig. 5): signo opuesto y mucha menor correlación. Este hecho induce a pensar que el efecto de los flujos de viento sobre las temperaturas se nota a escalas temporales más cortas, que suelen corresponder a la de la persistencia típica de las situaciones sinópticas. A nivel anual, hay otros factores de mayor escala temporal y geográfica que influyen más en el comportamiento de las medias que el índice mesoscalar para el valle del Ebro.

A escala estacional (Fig. 6) y mensual (no mostrada), el viento, expresado por el número de días en que se superan los umbrales de viento moderado (36 Km/h), fuerte (55 Km/h) y muy fuerte (91 Km/h), presenta fuertes correlaciones con el índice, especialmente en los puntos adyacentes al eje del Ebro (Logroño y Zaragoza). En Huesca y Lérida la orografía local modifica esta relación, aunque los valores mensuales en invierno presentan también correlaciones similares. Una vez más, se refleja que en Logroño la correlación es de signo negativo, porque el mayor número de días de vientos moderados y fuertes se produce con índice negativo, o sea, con vientos del segundo cuadrante.

En cuanto a la precipitación, se trata por la cantidad y por el número de días con precipitación apreciable. Este segundo elemento muestra una mejor correlación con el índice que ya tenía (Fig. 5) un reflejo a nivel anual, y es especialmente relevante para las áreas más próximas al Mediterráneo (Lérida, Huesca y Zaragoza), con una correlación

negativa apreciable, especialmente en otoño. Indica que el flujo mediterráneo (índice negativo) supone más días de precipitación en los tramos central e inferior del valle. En el caso de Logroño (tramo superior) hay cierta correlación en verano, indicando que el flujo mediterráneo favorece la convección en esta zona del valle. En cuanto a la cantidad de precipitación las correlaciones son menores, pero las fuertes correlaciones entre índice negativo y número de días de precipitación tienen un reflejo en la cantidad total recogida en Huesca y Zaragoza. En Lérida, los flujos del noroeste (índice positivo) inhiben significativamente la precipitación en primavera.

En cuanto a la humedad, que es uno de los elementos que a escala anual presenta mejor correlación, el estudio por estaciones y meses revela que la influencia del índice mesoscalar es más alta en invierno y otoño. En esa época del año más fría, un índice negativo aumenta apreciablemente la humedad, especialmente en aquellas zonas del valle más propensas a retenerla (Logroño y Lérida). En el caso de Huesca, el índice se correlaciona positivamente con la humedad en verano (en particular, en el mes de junio), lo que es un resultado bastante sorprendente. Entre las posibles causas puede estar el que un índice positivo supone un flujo sobre el observatorio de masas de aire procedentes de Navarra y los Pirineos, apreciablemente más húmedas que el valle en esta época del año.

La humedad está directamente relacionada con el número de días de niebla, que presenta correlación negativa en Lérida en invierno, coincidiendo con la mayor correlación (negativa) entre índice y humedad.

Por último, los días de tormenta tienen una significativa correlación negativa con el índice en primavera (especialmente) y otoño para las estaciones más próximas al eje central del valle (no para Huesca), revelando de nuevo el papel de los flujos mediterráneos en los fenómenos convectivos. Las estaciones equinocciales son más sensibles a este factor puesto que en este periodo faltan otros elementos como las altas temperaturas en superficie que favorecen la convección estival.

En definitiva, el índice explica con gran solvencia bastantes características del clima del valle del Ebro, permitiendo diferenciar entre escalas temporales (a más largo plazo influye en la humedad o el número de días de precipitación, y a menos en la

temperatura) y espaciales (distinciones entre la proximidad al Mediterráneo o al eje del Ebro).

#### 4. Evolución temporal del índice

El valor medio mensual de los valores del índice para el periodo 1961-2011 (Fig. 7) presenta una oscilación entre valores negativos en otoño e invierno y valores positivos en primavera y verano. El mes de mayo, que suele ser el más lluvioso en el valle, presenta un retroceso en el ascenso que refleja la entrada de depresiones.

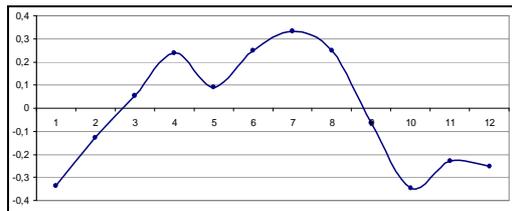


Fig. 7.- Valor medio mensual del índice mesoscalar del valle del Ebro para el periodo 1961-2011.

A lo largo de los años de este periodo, el valor anual medio del índice (Fig. 8) ha presentado una evolución entre valores positivos desde primeros de los sesenta hasta mediados de los ochenta, cuando pasaron a ser negativos, que en la actualidad se está compensando. Se refleja un ciclo de unos 25 años del que, sin duda, habrá que estudiar sus causas y conexiones con otros factores a mayor escala.

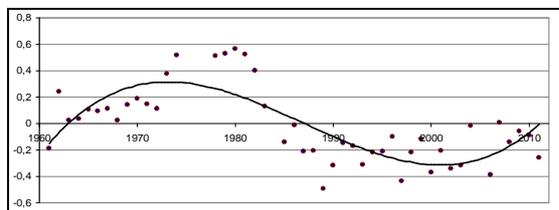


Fig. 8. Evolución del valor anual medio del índice mesoscalar del valle del Ebro para el periodo 1961-2011.

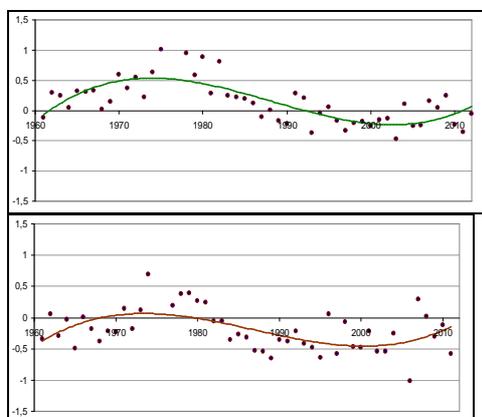


Fig. 9.- Evolución anual del valor medio del índice en primavera (a, arriba) y otoño (b, abajo).

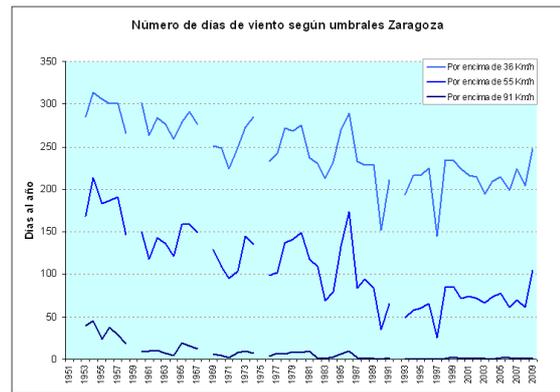


Fig. 10.- Número anual de días que el viento supera los umbrales de viento moderado, fuerte y muy fuerte en Zaragoza (1961-2010).

Esta oscilación de baja frecuencia es crítica para las estaciones equinocciales (Figs. 9a y 9b), que como se aprecia en la Fig. 7 presentan valores medios próximos a 0, pudiendo representar la diferencia entre periodos secos y húmedos en el valle.

Es, por tanto necesario continuar con el estudio de este índice, indagando en las causas de esta evolución del ciclo, que se refleja, por ejemplo, en el número de días con vientos fuertes en Zaragoza (Fig. 10), estudiando las relaciones con otras teleconexiones.

La consideración del factor del diferencial de presiones, sintetizado en el índice mesoscalar, a la hora de elaborar proyecciones climáticas para la zona puede ayudar a mejorar la precisión de las mismas.

#### Referencias

Álvarez, E., F. Espejo, F. Cortés, C. Lafragüeta y R. Serrano (2011) "Caracterización sinóptica de los procesos convectivos en el interior del nordeste peninsular". Nota Técnica nº 3. AEMET.

Espejo, F., A. Uriel y J. García (2009) "Tendencias climáticas de la ciudad de Zaragoza", en Fernández, F., E. Galán y R. Cañada (Eds.) *Clima, ciudad y ecosistemas*. AEC, Serie A, nº-7, pp. 63-72.

López-Bustins, J.A. (2007). *The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Catalan Countries*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.