

CLIMA Y CALIDAD AMBIENTAL EN LAS CIUDADES: PROPUESTA METODOLÓGICA Y SU APLICACIÓN AL ÁREA DE MADRID

Felipe FERNÁNDEZ GARCÍA

Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid

felipe.fernandez@uam.es

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Sobre el concepto de calidad ambiental y etapas de evolución

No cabe duda de que el concepto de calidad ambiental es sumamente complejo, que son muy numerosas las variables que se podrían utilizar para su definición y que su significado puede ser diferente según el contexto en el que se analice. No sería descabellado decir, desde la óptica climática, que la evolución de la idea de calidad ambiental es paralela a la de las relaciones hombre/clima y que estas relaciones han marcado de forma importante las diferentes etapas del desarrollo de las sociedades humanas. A lo largo de su historia, la humanidad ha pasado de una dependencia tiránica respecto a las condiciones naturales en general y climáticas en particular, a una nueva forma de dependencia que, en gran medida, está provocada por los sofisticados medios tecnológicos en los que se basa el bienestar actual, muy sensibles ante sucesos naturales de carácter aparentemente excepcional.

Para una sociedad primitiva, poco tecnificada, la calidad ambiental se mediría en términos de simple subsistencia: buen clima sería sinónimo de buenas condiciones para recolectar o cultivar lo que aseguraría los alimentos necesarios para la pervivencia del grupo.

En una fase posterior, el determinismo geográfico da paso al posibilismo: el desarrollo del transporte, la mecanización y el aumento de la productividad agrícola e industrial aparecen como indicios claros del triunfo del hombre sobre la naturaleza. Los parámetros que miden la calidad ambiental se confunden con los del mercado, el ambiente se convierte casi de forma exclusiva en un bien de uso y consumo y los recursos naturales son utilizados de forma masiva e indiscriminada. Como hemos señalado en otra ocasión (ARROYO ILERA y FERNÁNDEZ GARCÍA, 1992) el lento proceso de afirmación de la cultura humana es, a la vez, el descubrimiento, uso, control e, incluso, abuso del medio natural, sin cuyos recursos jamás se hubiese podido alcanzar el nivel de confort y bienestar actuales. Pero, a partir de un cierto nivel de desarrollo, comienzan a surgir indicios de la fragilidad de este sistema de relaciones hombre-medio y algunos de los grandes logros del progreso se ven seriamente afectados por eventos que con bastante frecuencia denominamos extremos, pero que seguramente siempre han formado parte de las características intrínsecas de la naturaleza.

En este contexto el clima adquiere un nuevo protagonismo y su influencia sobre la sociedad se manifiesta de formas muy variadas: unas veces son las “buenas o malas condiciones climáticas” las

que afectan a sectores económicos relacionados con el ocio de una población cada vez más numerosa, acostumbrada a las salidas de fin de semana o a periodos vacacionales más prolongados; otras adquieren el carácter de auténticas catástrofes provocadas por sequías prolongadas o precipitaciones intensas, cuyos efectos, en numerosas ocasiones, se ven multiplicados por una inadecuada utilización de los recursos climáticos o una incorrecta ocupación y utilización del espacio.

La tercera y última etapa que vamos a diferenciar está condicionada por la situación que acabamos de describir. El rasgo que mejor la caracteriza es la necesidad de adaptarse a estas nuevas condiciones con la finalidad de conservar los niveles de bienestar y desarrollo alcanzados. La calidad ambiental, expresada ahora como sostenibilidad ambiental, se define como el mantenimiento de la diversidad biológica, la salud pública y la calidad del aire, el agua y el suelo a niveles suficientes para preservar la vida y el bienestar humanos para siempre, tal y como se recoge en la «Carta de las ciudades europeas hacia sostenibilidad o Carta de Aalborg» de 1994.

1.2. Calidad del aire y calidad climática como conceptos claves de la calidad ambiental en las ciudades

En las ciudades es donde de forma más clara se manifiesta el proceso que acabamos de mencionar y es en ellas donde el uso masivo de los recursos naturales ha provocado un deterioro más acusado de los mismos y donde, de forma más clara, se manifiestan los efectos negativos sobre la calidad de vida y el bienestar de la población.

Especialmente significativo es el deterioro de la calidad del aire debido a la contaminación atmosférica. Su origen habría que situarlo en los comienzos de la revolución industrial y, a pesar de que ya a mediados del XIX se alzaron voces frente a este hecho, hoy continúa siendo uno de los problemas más graves de las ciudades.

En efecto, en 1869 el Departamento de Salud de Massachusetts publicaba una resolución según la cual *“todos los ciudadanos tienen el derecho a disfrutar de un aire, un agua y un suelo no contaminados. Ese derecho -continuaba- debería ser considerado como perteneciente a toda la comunidad y no debería permitirse que fuese violado por descuido, avaricia o ignorancia.* Pasado más de un siglo, los hechos muestran que por un descuido avaricioso o una ignorancia interesada, una porción muy importante de la población mundial no goza de ese derecho. Eso, al menos, es lo que parece deducirse del informe del Banco Mundial sobre Desarrollo y Medio Ambiente, publicado en 1992 y, según el cual, más de 2.000 millones de personas están expuestas a la contaminación por partículas y dióxido de azufre (SO₂) y más de mil millones soportan niveles considerados inaceptables por la OMS (Cuadro 1).

Grado	Partículas	SO ₂
Inaceptable	1345	1047
Marginal	163	595
Aceptable	530	737

Cuadro 1. Población expuesta a la contaminación (millones de personas). Fuente: Informe del Banco Mundial sobre desarrollo y medio Ambiente. 1992.

La mayor parte de estas personas viven en ciudades pertenecientes a países de economías débiles, pero los habitantes urbanos de países desarrollados tampoco escapan a este riesgo. Así lo pone de manifiesto el informe sobre el medio ambiente en la Unión Europea, publicado en 1995, según el cual, en el 74% de las ciudades de la Unión con más de 500.000 habitantes se superaron los umbrales admitidos por la legislación para el SO₂ y en el 84% los correspondientes al ozono troposférico (EEA, 1995).

El total de emisiones procedentes de los automóviles, los focos de calor domésticos y las industrias constituyen la principal causa del deterioro ambiental por lo que la aplicación de medidas tendentes a la reducción de tales emisiones es fundamental para solucionar el problema. Es difícil, sin embargo, que tales medidas no incidan negativamente sobre otros aspectos de la vida cotidiana en los que se basa la calidad de vida de los ciudadanos y que, en gran medida, son los responsables de la mala calidad del aire como el empleo de la calefacción o refrigeración en los edificios o la misma actividad industrial de la que depende la economía de muchas aglomeraciones urbanas. La única manera de reducir los impactos negativos de estas medidas pasa necesariamente por la consideración de las características climáticas del entorno en el que nos movemos a fin de utilizar correctamente los diferentes elementos del clima en una adecuada planificación de la ciudad y sus actividades.

Un nuevo concepto se impone, el de calidad climática (BITTAN, 1992), cuyo contenido implica una serie de medidas con objeto de obtener las mejores condiciones ambientales en la ciudad y los edificios, los dos espacios en los que la población pasa la mayor parte de su tiempo, mediante la integración de los elementos climáticos del entorno en los diferentes niveles de planificación y construcción.

La calidad climática incluye por extensión la calidad del aire, pero no se limita a este único aspecto y tiene en cuenta otros que completan la calidad y el bienestar de los ciudadanos. La orientación de las calles y edificios, el empleo de los materiales y tipo de construcción adecuados, la correcta localización de las industrias y la distribución de espacios verdes, según las pautas del entorno climático en el que nos movemos, reducirá considerablemente el uso de energías convencionales y, consiguientemente, las emisiones, lo que facilitará la dispersión de los contaminantes y la creación de un microclima urbano confortable.

1.3. Propuesta metodológica

La consecución de los objetivos que acabamos de exponer y su aplicación a un lugar concreto presupone la realización de, al menos, tres fases:

La primera y fundamental es la definición de las situaciones meteorológicas o tipos de tiempo que caracterizan el clima de la zona. Son estas situaciones, definidas por la combinación de diversas variables físicas como la temperatura, humedad, viento, presión etc., las que caracterizan los diversos ambientes atmosféricos a los que se han de adaptar los habitantes de una ciudad y los que habrá que tener en cuenta a la hora de planificar la ciudad y sus actividades.

La relación entre estas situaciones y los niveles de inmisión registrados en las estaciones de contaminación constituyen la segunda etapa del estudio. Con ello podremos establecer las causas y mecanismos que contribuyen a la mejor o peor calidad del aire y tomar las medidas pertinentes para solucionar o limitar los efectos negativos de la contaminación.

La tercera y última, consiste en la evaluación de las diversas situaciones meteorológicas en términos de confortabilidad. El hombre, como los demás seres vivos, ha de adaptarse a los límites impuestos por las condiciones climáticas y a las distintas sensaciones que su organismo ha de soportar. Sin embargo, a diferencia de los animales y las plantas, tiene la capacidad no sólo de adaptarse a climas muy variados, sino también la de modificar las condiciones ambientales de su entorno mediante el vestido y la vivienda. Es cierto que el clima difícilmente puede ser adaptado a nuestras necesidades, pero no es menos cierto que podemos adaptarnos a unas determinadas condiciones climáticas a fin de obtener el máximo provecho de ellas.

Desde antiguo, el hombre ha sido consciente de esta influencia y todos los pueblos y todas las civilizaciones han mostrado especial interés en definir las condiciones más favorables para la salud y el bienestar de las personas, buscando emplazamientos favorables y diseñando sus casas de acuerdo con las características del medio. La arquitectura tradicional ofrece numerosos ejemplos de ello, pero en la actualidad esto no sucede y, como señalan algunos autores, los edificios modernos se han diseñado para aislarlos del exterior, para separar las condiciones interiores de las exteriores lo más posible, confiando gran parte del trabajo a las instalaciones mecánicas (KONYA, 1981). Este divorcio del hombre con su entorno es el causante de que una parte nada despreciable del consumo energético en las ciudades, especialmente en los países desarrollados, se emplea para conseguir un ambiente confortable y, como hemos señalado anteriormente, ese consumo energético es uno de los principales responsables de la contaminación atmosférica.

El objetivo de este apartado consiste en aprovechar los avances tecnológicos y nuestros conocimientos del medio en conseguir los mejores condiciones de confortabilidad mediante una equilibrada combinación de recursos tecnológicos y climáticos como único modo de mantener un «desarrollo sostenible».

2. APLICACIÓN AL ÁREA DE MADRID

Desde hace varios años venimos realizando diversos estudios sobre el clima de Madrid con diversos análisis sobre el microclima urbano, la contaminación y la confortabilidad térmica. Recientemente hemos iniciado otra línea, siguiendo las pautas que acabamos de proponer, en colaboración con diversas entidades como el Centro Meteorológico Zonal de Madrid y Castilla la Mancha y la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Madrid. Gran parte de los resultados que presentamos corresponden a esta etapa y son avances de un estudio más ambicioso en el que se analizarán en detalle temas que aquí sólo esbozamos.

2.1. Interés del área de estudio

El área seleccionada para nuestro estudio ofrece numerosos puntos de interés para los objetivos marcados. En primer lugar su tamaño: en un radio inferior a los 30 kilómetros se localiza una urbe, Madrid, con una población cercana a los 3.000.000 de habitantes y una serie de núcleos con poblaciones que oscilan entre los 70.000 y más de 150.000 habitantes. En conjunto nos encontramos con una aglomeración próxima a los 4.000.000 de personas.

La industria se localiza preferentemente en sectores periféricos en torno a la ciudad y su peso es

relativamente poco importante frente a otras actividades típicamente urbanas como el comercio y los servicios. Por ello la calidad del aire depende en gran medida de las emisiones procedentes del tráfico y las calefacciones.

Las condiciones climáticas son las típicas de una zona mediterránea continental con escasas precipitaciones, fuertes amplitudes térmicas y dominio de situaciones anticiclónicas la mayor parte del año. Ello dificulta la dispersión de contaminantes y determina ambientes climáticos muy contrastados que inciden negativamente sobre el confort. Este clima se ve modificado por la ciudad, que ha creado un microclima urbano en el que es posible detectar múltiples matices relacionados con las diversas tipologías de usos de suelo, densidad de las edificaciones y el asfalto y el trazado de la red viaria (LÓPEZ GÓMEZ *et al.*, 1991 y 1999; FERNÁNDEZ GARCÍA *et al.*, 1999).

Por último, contamos con una red de observatorios meteorológicos muy importante, formada por las estaciones del INM, situadas en zonas periféricas, salvo la del parque del Retiro en el interior de la ciudad, y las correspondientes a la red de vigilancia de la contaminación atmosférica, tanto del Ayuntamiento como de la Comunidad. Todo ello permite contar con una información suficiente para la realización del trabajo que presentamos.

2.2. Caracterización de los tipos de tiempo¹

El objetivo de este apartado es definir una serie de situaciones meteorológicas, que representan los diferentes estados que adopta la atmósfera sobre la Comunidad de Madrid. Cada uno de ellos se caracteriza por un conjunto de variables meteorológicas que definen los diferentes tipos de tiempo o ambientes climáticos que se suceden a lo largo del año sobre el área de estudio y que constituyen los rasgos más sobresalientes de su clima.

Los datos meteorológicos en los que se basa la clasificación atmosférica pertenecen al observatorio de Madrid-Barajas, y fueron obtenidos del Centro Meteorológico Zonal de Castilla-La Mancha y Madrid, dependiente del Instituto Nacional de Meteorología. El período utilizado abarca desde mayo de 1995 hasta octubre de 1998; las variables empleadas aparecen en el cuadro 2:

Superficie	Temperatura del termómetro seco
Superficie	Temperatura del termómetro húmedo
Superficie	Dirección y velocidad del viento
Superficie	Presión atmosférica (medidas a las 00, 07, 13 y 18 TMG)
Superficie	Nubosidad.
Superficie	Visibilidad (medidas sólo a las 07, 13 y 18 TMG)
Superficie	Insolación diaria
Topografía 500 hPa	Altura (mts)
Topografía 500 hPa	Temperatura del termómetro seco (°C)
Topografía 500 hPa	Temperatura del termómetro húmedo
Topografía 500 hPa	Dirección del viento
Topografía 500 hPa	Velocidad del viento

Cuadro 2: Variables meteorológicas empleadas.

¹ En este apartado hemos contado con la valiosa colaboración del Dr. Rasilla que ha realizado la mayor parte de los cálculos para la caracterización de los tipos de tiempo.

A causa del reducido período de observación, que impide la obtención de unos promedios climatológicos estables, esas variables fueron estandarizadas por medio de la aplicación de un filtro consistente en el cálculo de la media móvil de su valor en los 7 días anteriores y posteriores al día en cuestión, y la obtención de su diferencia con respecto a esos 15 días (McGREGOR y BAMZELIS, 1995)

El procedimiento usado para la identificación de categorías de elementos atmosféricos combina el Análisis en Componentes Principales seguido de un Análisis de Agrupamiento (*Cluster Analysis*).

El primero es una técnica de reducción de datos que ayuda a comprender la estructura interna de un conjunto de variables interrelacionados entre sí. Permite extraer un número de componentes equivalente al de variables originales, lo que tendría poco sentido, pero al seleccionar un número menor es posible retener gran parte de la información original, lo que facilita los análisis.

El segundo paso en este tipo de análisis comprende la delimitación de tipos de ambientes atmosféricos homogéneos. Esto puede lograrse por medio de la aplicación de un método de clasificación, usando sucesivamente técnicas de agrupamiento jerárquico y aglomerativo. El primero fue empleado para obtener un número inicial de *clusters* y las condiciones medias de cada uno de ellos. Posteriormente, estos *clusters* iniciales fueron modificados usando el algoritmo *K-means*, de naturaleza convergente, para producir la solución final. Este tipo de metodología ha probado su bondad en diversos estudios climatológicos (DAVIS y KALKSTEIN, 1990).

Diversos estadísticos *pseudo-t²*, *pseudo-f* y R^2 (SAS, 1990) mostraron una ruptura significativa al pasar de 6 a 5 grupos, lo que sugiere que 6 grandes tipos de masas de aire podrían ser los más característicos de la zona. Este hecho corrobora los resultados de clasificaciones anteriores de carácter manual (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1986). Con el fin de identificarlos en términos de sus valores meteorológicos, se calculó el promedio (estandarizado) de cada una de las variables climáticas que comprenden todos los casos de un mismo grupo, representando cada grupo un tipo de masa de aire diferente. Los tipos definidos corresponden a las situaciones sinópticas representadas en la figura 1 y presentan las siguientes características (FERNÁNDEZ GARCÍA y RASILLA, 1999):

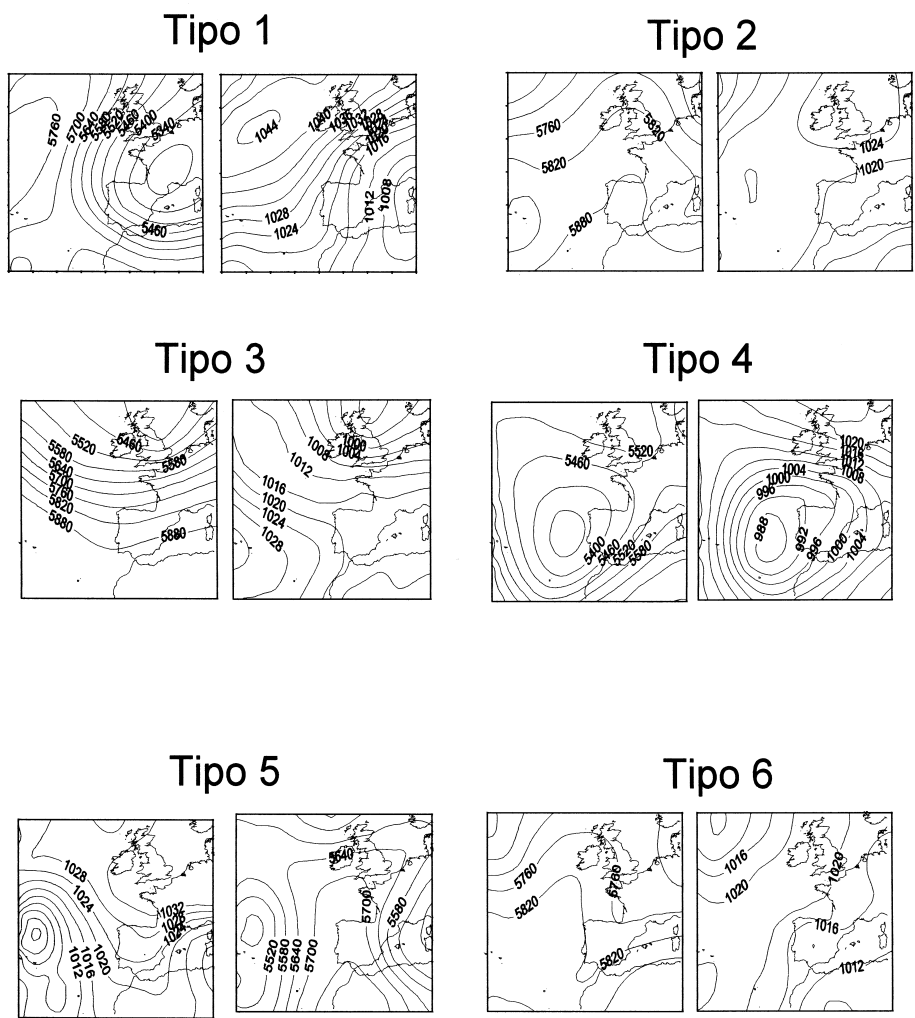


Figura 1. Situaciones sinópticas representativas de los diferentes tipos de tiempo.

- El tipo 1 agrupa las advecciones de aire polar o ártico procedentes de latitudes septentrionales. Las temperaturas son bajas, al igual que la humedad relativa, los cielos se encuentran cubiertos por nubes dispersas (cúmulos y estratocúmulos), la insolación es relativamente alta y los vientos son fuertes y predominantemente del 4º y 1º cuadrantes. A pesar de una presión relativamente baja, la precipitación es muy reducida sobre Madrid, ya que se encuentra protegida por el Sistema Central. La situación sinóptica asociada más frecuentemente a este tipo de masa de aire es la descarga posterior a un frente frío, configurándose un flujo del NW, N o NE, entre una dorsal barométrica que asciende hacia latitudes septentrionales frente a la costa atlántica de la Península Ibérica, y una borrasca sobre Europa Central o el Golfo de Génova.

Tipo 1		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	-1,7	Año	10,2	1°C	24,1
Tmin.	-2	inv.	13,8	2°C	5,1
Insolación	69,7%	pri	12,3	3°C	18,3
		ver	5,0	4°C	42,1
		ot	11,4	calmas	10,4

- El tipo 2 es propio de un tipo de tiempo cálido, con altas temperaturas y considerable oscilación térmica, cielos despejados y vientos suaves con predominio del 1º y 4º cuadrantes. Las precipitaciones son inapreciables y la humedad relativa baja, aunque por su origen subtropical, la masa de aire presenta valores altos de humedad absoluta. En altura, la situación sinóptica más frecuente es el avance de una dorsal anticiclónica sobre la Península Ibérica, que en superficie corresponde a un ascenso latitudinal del Anticiclón de las Azores. Por esta razón, es el más frecuente y con una clara oscilación estacional, con máximos destacados en la estación estival y mínimos invernales.

Tipo 2		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	2,4	Año	29,6	1°C	24,2
Tmin.	0,9	inv.	11,5	2°C	14,4
Insolación	80,20%	pri	32,7	3°C	18,1
		ver	40,8	4°C	25,3
		ot	28,4	calmas	18,0

- El tipo 3 corresponde a la advección de una masa de aire atlántica arrastrada por el margen meridional de una circulación del W en altura. Las consecuencias son un tipo de tiempo fresco durante las horas diurnas y templado durante las nocturnas, vientos fuertes a muy fuertes del 3^{er} cuadrantes, precipitaciones ocasionales (a causa de la presencia ocasional de un frente frío que roza la Península Ibérica), cielos moderadamente cubiertos y ligero descenso de los niveles

Tipo 3		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	-0,3	Año	14,4	1°C	7,9
Tmin.	0,9	inv.	10,7	2°C	11,7
Insolación	59,80%	pri	13,0	3°C	54,0
		ver	16,3	4°C	16,7
		ot	16,7	calmas	9,7

troposféricos.

El 4^o grupo se identifica con una intensa advección de aire polar marítimo bajo régimen ciclónico. Ésta genera un tiempo fresco, con máximas ligeramente por debajo de lo normal y mínimas por encima de los promedios, alta humedad, cielos cubiertos, escasa insolación y un intenso flujo de componente SW o W. La Península Ibérica aparece inmersa en un campo ciclónico, con un área de bajas presiones al W o NW, dirigiendo la progresión de frentes activos. Como consecuencia de su dependencia de las situaciones perturbadas atlánticas, el ciclo estacional es el opuesto al 2^o grupo, siendo mínimo en verano y máximo en invierno, y, junto al tipo 1, uno de los menos frecuentes.

Tipo 4		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	-0,8	Año	12,1	1°C	19,0
Tmin.	1	inv.	23,4	2°C	21,7
Insolación	34,80%	pri	11,3	3°C	26,7
		ver	6,3	4°C	16,6
		ot	10,0	calmas	16,0

- El 5º consiste en una situación anticiclónica que también presenta cielos despejados, alta insolación y ausencia de precipitaciones, pero, a diferencia del tipo 2, el régimen térmico está caracterizado por valores inferiores a lo normal y una considerable oscilación diaria, al igual que la humedad. Los vientos son suaves y de procedencia septentrional, predominando los del 4º y 1º cuadrante. Una situación anticiclónica mixta, con la célula situada al NW, N o NE de la Península Ibérica, y la vertiente oriental de una dorsal en altura, frecuentemente se asocian a este tipo de ambiente. Anualmente es el 2º tipo más frecuente con máximos estacionales en

Tipo 5		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	-0,7	Año	18,0	1°C	22,8
Tmin.	-1,8	inv.	21,1	2°C	12,5
Insolación	83,90%	pri	16,9	3°C	17,8
		ver	15,2	4°C	26,2
		ot	19,7	calmas	20,7

invierno y otoño.

- El tipo 6, por último, corresponde a situaciones con cierta inestabilidad, ausencia de vientos intensos en superficie y predominio de los cuadrantes 1º y 4º y cielos nubosos o cubiertos pero precipitaciones más bien escasas. Este tipo de tiempo suele aparecer en verano asociado a tormentas y siendo la situación sinóptica más característica la presencia de una depresión sobre la Península Ibérica; en el resto de las estaciones aparece frecuentemente dentro del sector anterior de una típica depresión atlántica.

Tipo 6		Frecuencia		Viento	
		Estación	%	Dirección	%
Tmax.	-1,8	Año	15,8	1°C	22,5
Tmin.	0,2	inv.	19,5	2°C	18,7
Insolación	35%	pri	13,6	3°C	15,0
		ver	16,5	4°C	20,1
		ot	13,7	calmas	23,9

En síntesis encontramos dos situaciones anticiclónicas claras, que corresponden a los tipos 2 y 5. El primero asociado a una masa de aire cálido de origen subtropical, el segundo frío formado por masas de aire atlánticas o polares. En ambos predomina la elevada insolación y fuerte estabilidad lo que favorece la formación de un claro régimen de brisas, con vientos de componente norte durante la noche y primeras horas de la mañana y del W o SW durante el día (Figura 2). El tipo 2 es el más frecuente de todos los analizados (29.6%), y esta frecuencia se mantiene en todas las estaciones del año, especialmente en verano donde se concentran más del 40% de los días bajo situaciones de este tipo, en claro contraste con el mínimo invernal situado en el 11%. El tipo 5 es menos frecuente, sólo el 18% de los días, concentrados la mayor parte en invierno con el 21% del total. En esta época, como era de esperar, predominan las situaciones asociadas con advecciones frías y, junto a la que acabamos de mencionar, destaca la nº 4, ésta con un carácter más ciclónico y con una frecuencia del 23%. Los demás tipos se distribuyen a lo largo del año con escasas diferencias interestacionales, salvo el 1 que es prácticamente inexistente en verano.

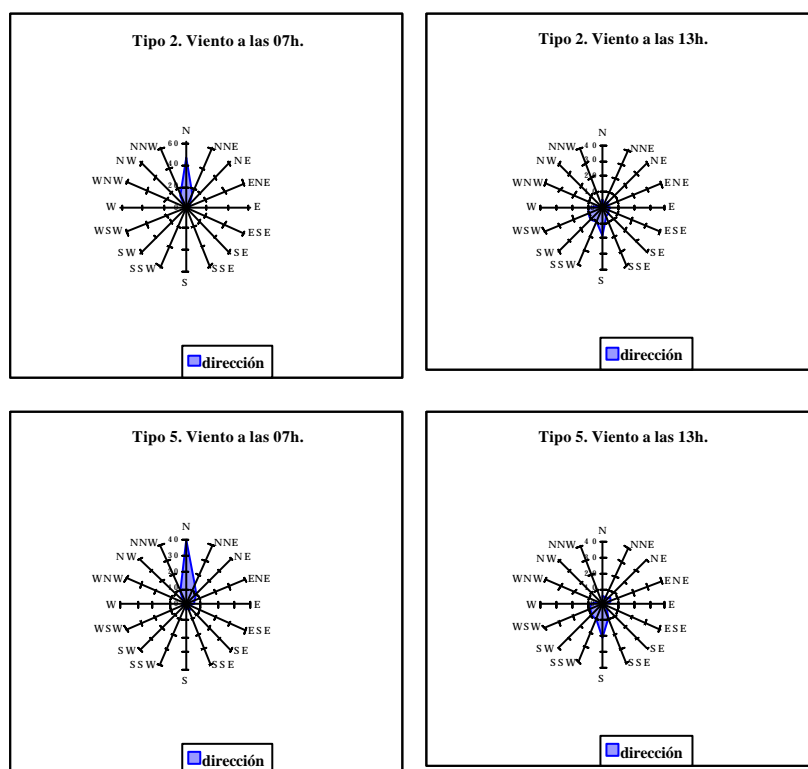


Figura 2. Vientos medios en superficie asociados a las situaciones 2 y 5, representativos del régimen de brisas que caracteriza el clima de Madrid.

2.3. Características de la contaminación atmosférica.

En otros estudios hemos analizado diferentes aspectos de la contaminación en Madrid especialmente los relacionados con las diferencias observadas en los niveles de contaminación dentro de la ciudad y que son debidas, fundamentalmente, a aspectos urbanos como la densidad de edificaciones, el tráfico y las diferentes tipologías urbanas y usos de suelo (FERNÁNDEZ GARCÍA, 1990 y 1999; FERNÁNDEZ GARCÍA, GALÁN y HERNÁNDEZ, 1993). Ahora nos interesa destacar otros aspectos como son:

1º.- El descenso de las concentraciones medias de SO_2 en clara relación con la entrada en vigor de una serie de normativas municipales tendentes a la modernización de las calderas de calefacción y a la sustitución del carbón por otros combustibles como el gasóleo y el gas natural. Este descenso se inicia en 1980 y se mantiene hasta nuestros días (Figura 3) de tal manera que los periodos de elevadas concentraciones de SO_2 relativamente frecuentes con anterioridad a la fecha mencionada, prácticamente han desaparecido en la actualidad.

2º.- Otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos se mantienen en proporciones importantes. Asociados a ellos, un nuevo contaminante, el ozono troposférico, adquiere cada vez mayor importancia.

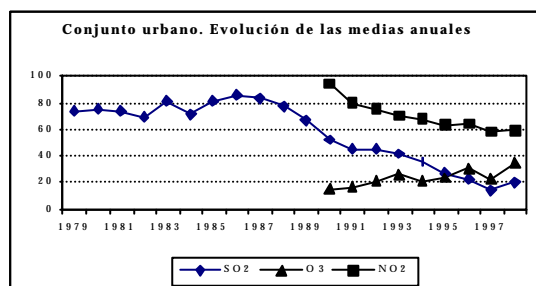
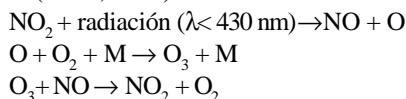


Figura 3. Evolución de las medias anuales de SO_2 , NO_2 y O_3 en la ciudad de Madrid.

El ozono es un contaminante secundario formado mediante un proceso que implican la absorción de radiación solar por el dióxido de nitrógeno y la interacción de éste con el oxígeno molecular, según la siguiente reacción (OMS, 1980):



En las capas bajas adquiere especial importancia la presencia de precursores como los óxidos de nitrógeno emitidos fundamentalmente por el tráfico rodado y la insolación que suministra la energía necesaria para el proceso descrito. Sin embargo, también son importantes otros mecanismos como el trasvase hacia la atmósfera inferior de ozono estratosférico que se produce

al paso de frentes fríos, en los fenómenos eléctricos atmosféricos y, en general, en las advecciones de aire frío a través de las vaguadas en la circulación superior, tal y como aparece en el esquema de la figura 4.

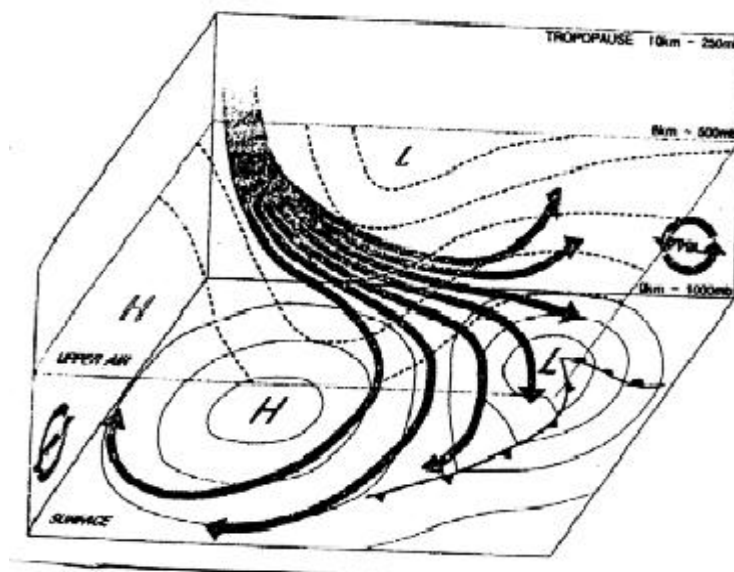


Figura 4. Intrusiones de ozono estratosférico en la atmósfera inferior asociadas a la formación de vaguadas en altura (Andrew, C. 1993).

3°. Tales transformaciones en la emisión de contaminantes implican cambios sustanciales tanto en el ritmo diario y estacional de la contaminación en Madrid y su área metropolitana, como en la distribución espacial de los máximos. Los primeros estudios, en los que el SO_2 era el contaminante más representativo de la calidad del aire en las ciudades, indicaban una clara diferenciación entre el periodo invernal y el estival: el primero era el que presentaba los máximos niveles de contaminación asociado al encendido de las calderas de calefacción domésticas y a la persistencia de situaciones anticiclónicas en nuestra zona; durante el verano, por el contrario, la ausencia de calefacción y la formación de una borrasca superficial de origen térmico determinaba una reducción notable de los niveles de inmisión. Asimismo el núcleo urbano aparecía como la zona más contaminada debido a la concentración de focos emisores en esta zona (LÓPEZ GÓMEZ y FERNÁNDEZ GARCÍA, 1981).

La incorporación del ozono troposférico a los contaminantes medidos en las redes de vigilancia y control y la extensión de éstas fuera del núcleo propiamente urbano ha permitido matizar las características que acabamos de mencionar. En efecto, el ozono troposférico presenta un ciclo diario

y estacional con máximos en las horas centrales del día y durante el verano y mínimos en invierno y durante la noche. Así mismo se observa que en las áreas periféricas se registran sistemáticamente valores de ozono superiores a los de la ciudad, localizándose los máximos en los núcleos situados al norte de Madrid (Figura 5).

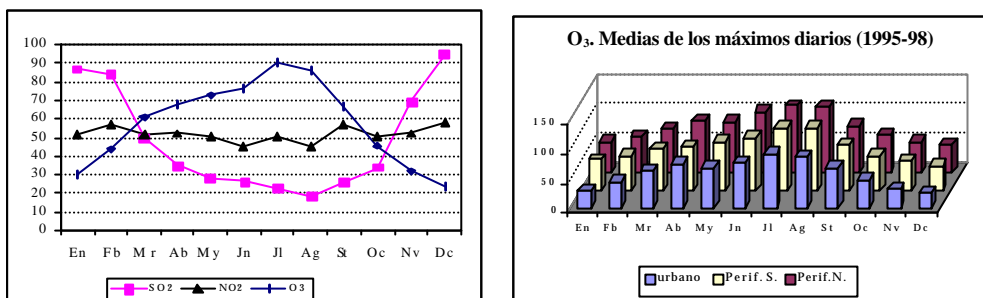


Figura 5. Ritmo mensual de los diferentes contaminantes y diferencias espacial entre la ciudad y las periferias norte y sur en el O₃.

La importancia de la radiación solar en el proceso de formación de este contaminante es suficiente para explicar el ritmo que acabamos de mencionar, mientras que el papel desempeñado por los precursores es la causa de las diferencias espaciales observadas: en la ciudad la emisión continua de NO₂ implica un ciclo continuado de formación y destrucción del ozono, por lo que raramente se alcanzan niveles elevados en la concentración de este contaminante; en las zonas periféricas, la formación de NO₂ es bastante menor y el ozono se forma a partir de precursores procedentes de la ciudad y transportado hacia la periferia por los vientos dominantes. La figura 6 representa con bastante nitidez el proceso que acabamos de mencionar: el ciclo diario del ozono tanto en Madrid como en Alcalá de Henares, municipio situado al norte, es muy similar con máximos de ozono sincrónicos con los mínimos de NO₂, en clara referencia al carácter de precursor de este último; sin embargo en la ciudad las concentraciones de NO₂ son siempre superiores, no así en la periferia donde ambas curvas son claramente opuestas.

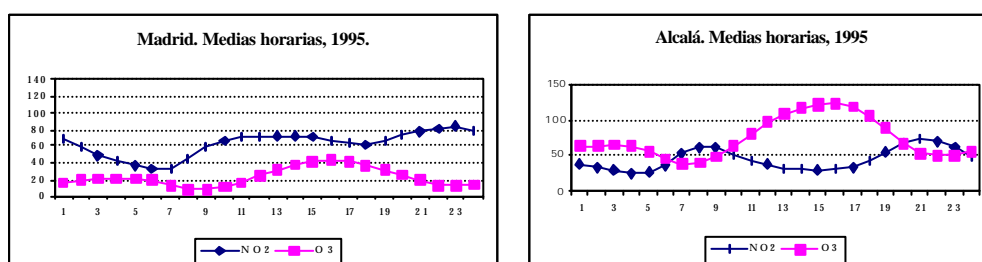


Figura 6. Ritmo diario de las concentraciones de NO₂ y O₃ en Madrid y en la periferia.

El otro aspecto que nos interesa destacar se refiere a los máximos secundarios que se observan durante la noche y que aparece claramente tanto en la ciudad como en la periferia (Figura 6). Un análisis más detallado de los ciclos diarios nos permite diferenciar, al menos, dos tipos: uno parece ser más frecuente durante el periodo cálido y es similar al ciclo medio, con un máximo principal en las horas centrales del día y otro secundario durante la noche; el segundo, típico del periodo invernal, difiere completamente del anterior ya que el máximo principal corresponde a las horas nocturnas. Como tendremos ocasión de ver en el siguiente apartado las frecuentes intrusiones frías durante el invierno asociadas a los tipos 5, 4 y 1, así como el régimen de brisas desarrollado con los tipos 2 y 5, explicarían este ritmo singular característico del área madrileña.

2.4. Contaminación y tipos de tiempo.

Tres aspectos vamos a analizar:

1º. La relación de cada tipo de tiempo respecto a las medias de los contaminantes más representativos del área madrileña;

2º. La importancia relativa de cada tipo en la concentración de estos contaminantes en las diferentes estaciones del año y en los ciclos diarios del ozono, y

3º. Su importancia en relación a los episodios de máximas concentraciones.

Los resultados correspondientes al primer apartado aparecen reflejados en el cuadro 3. De su análisis se deduce que son dos las situaciones que de manera más acusada influyen en la contaminación. Una de ellas, la nº 5 presenta los valores más elevados de NO₂ y SO₂, mientras que a la situación nº 2 se asocian los valores más elevados de ozono.

Cuadro 3. Tipos de tiempo y medias diarias de diferentes contaminantes (1995-1998)

Tipo	NO ₂	SO ₂	O ₃
1	87.6	18.7	63.4
2	106.8	21.7	87.5
3	84.8	17.4	70.5
4	92.7	20.6	61.4
5	114.0	26.8	70.3
6	96.9	20.7	63.7

Las diferencias espaciales a que hicimos mención en el apartado anterior se mantienen con todos los tipos. Tal y como aparece en el gráfico de la figura 7, las medias de ozono son mayores en los núcleos periféricos y, dentro de ellos, en los situados al norte de Madrid; en los otros dos contaminantes la situación es la contraria.

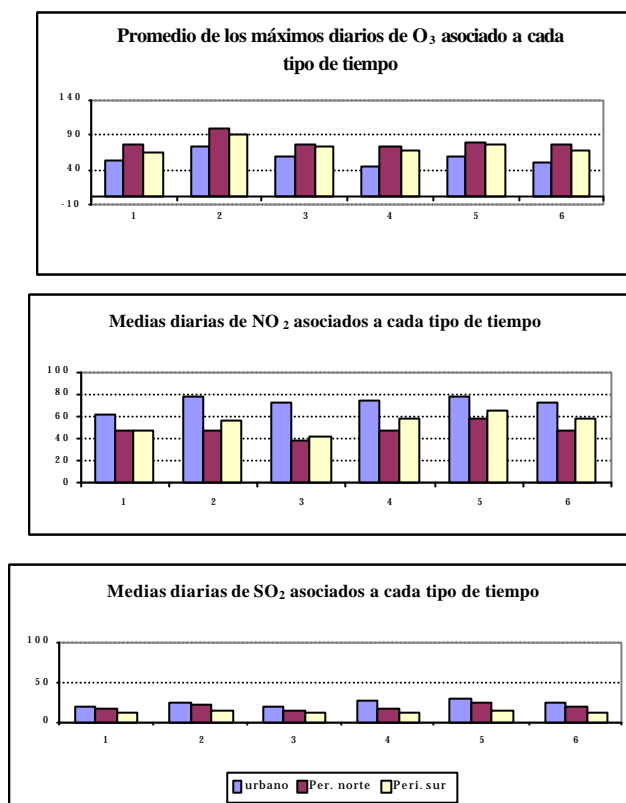


Figura 7. Promedios de NO₂, O₃ y SO₂ correspondientes a cada tipo de tiempo (1995-1998).

El origen de estos contaminantes y los mecanismos que contribuyen a su permanencia en la atmósfera explican esta relación. En efecto, las concentraciones de los contaminantes primarios como el SO₂ y el NO₂ dependen en gran medida del total de emisiones y del grado de estabilidad o inestabilidad, asociados al carácter ciclónico o anticiclónico de cada tipo de tiempo. Las mayores emisiones de SO₂ y NO₂ se concentran en invierno, época en la que la situación anticiclónica más frecuente es la n° 5. El O₃, por su parte, es un contaminante típico del verano, en cuya formación intervienen, no sólo el grado de estabilidad o inestabilidad, sino la temperatura y la insolación fundamentales en los procesos fotoquímicos que intervienen en la génesis de este contaminante secundario; ello explicaría la importancia del tipo 2 al que corresponden las medias más elevadas de ozono.

Este esquema se complica cuando analizamos la importancia relativa de cada uno de los tipos de tiempo. Para ello, utilizamos lo que algunos autores (YARNAL, 1993) denominan «dosis residual acumulada», que no es más que una media ponderada en la que se tienen en cuenta la frecuencia de los tipos de tiempo y la media de los contaminantes asociada a cada uno de ellos en relación a la

media general. Se obtiene multiplicando el promedio del contaminante correspondiente a cada uno de los tipos por su frecuencia anual, con lo que obtenemos un valor acumulado, cuya desviación respecto al promedio general nos informa de la influencia, positiva o negativa, de cada tipo con respecto al valor total del contaminante considerado.

En relación con el ozono (Figura 8), anualmente destaca el tipo 2 como la situación más favorable, seguido a gran distancia del 5. El resto contribuye de forma muy débil. Estos valores anuales difuminan dos situaciones claramente opuestas que aparecen en el invierno y el verano: en verano las concentraciones de ozono en nuestra zona están asociadas al tipo 2, mientras que en invierno son los tipos 4, 5 y 1 los que contribuyen de forma más acusada y, además, se observa que en la ciudad los valores son más elevados que en la periferia.

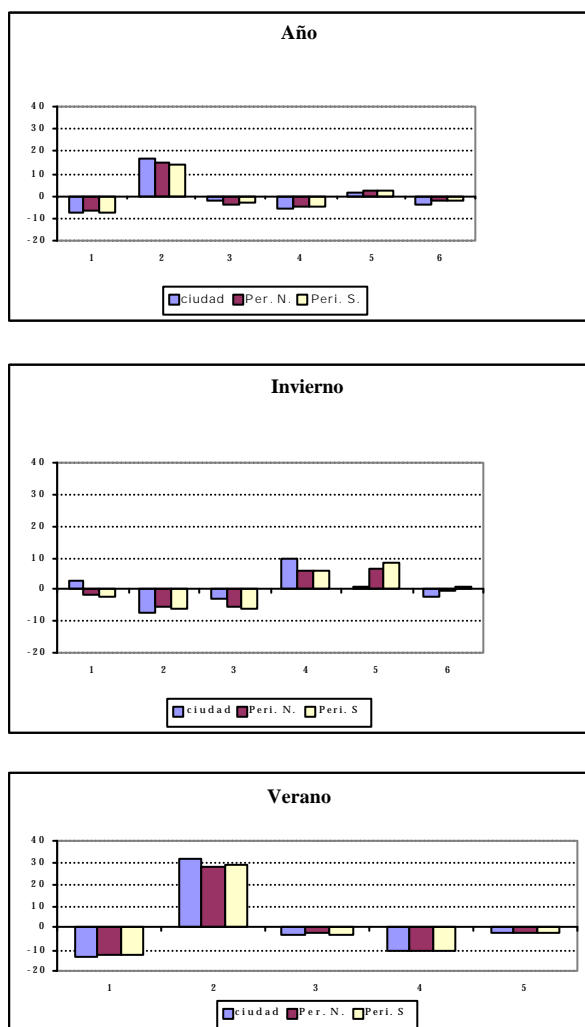


Figura 8. Dosis residuales acumuladas de O₃ y tipos de tiempo.

En relación con el NO_2 (Figura 9), los resultados son similares, aunque en invierno destaca la situación n° 5 como la principal responsable de las elevadas concentraciones de este contaminante. Valores positivos también presentan los tipos 4 y 6, aunque con desviaciones muy débiles, reflejo del carácter inestable de ambas situaciones.

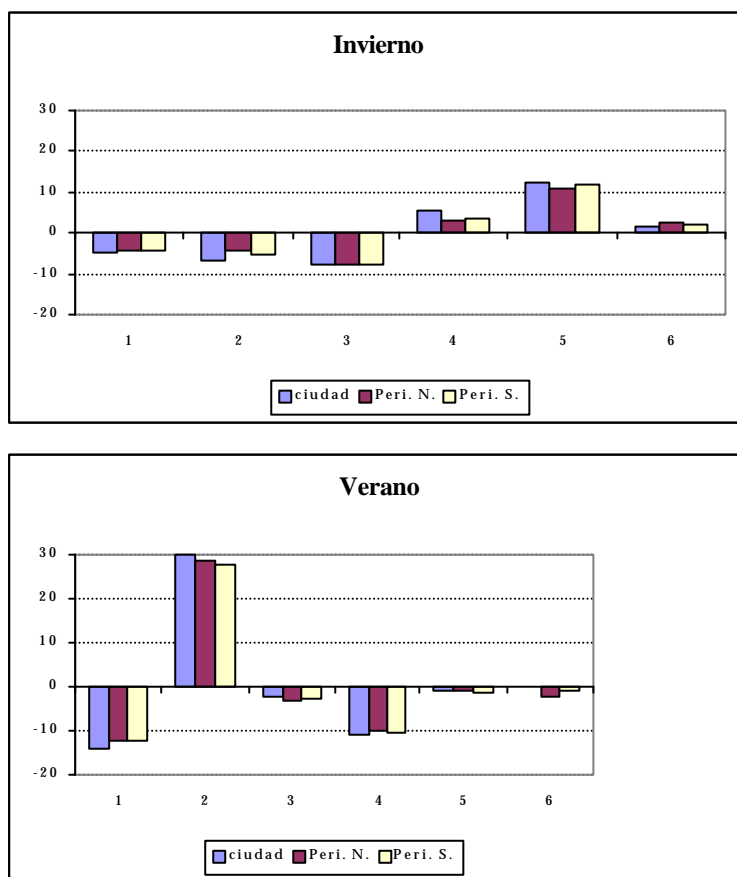


Figura 9. Dosis residuales acumuladas de O_3 y tipos de tiempo.

Desde la óptica de la calidad del aire, interesa destacar que las peores condiciones se dan con los tipos de tiempo 2 y 5, y la mayor parte de los días en los que se superan los $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso del ozono y los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 , coinciden con ambas situaciones (Figura 10).

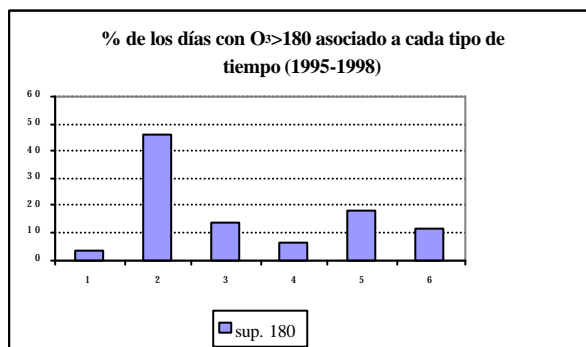
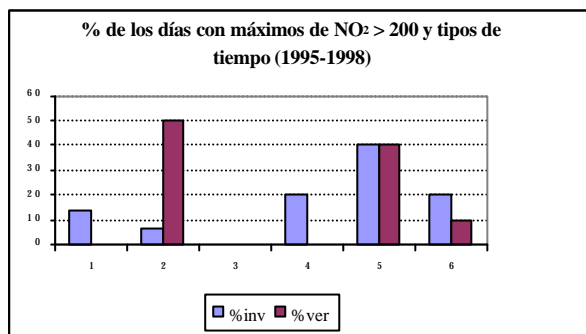


Figura 10. Episodios de elevada contaminación por O₃ y NO₂ y tipos de tiempo.

Es interesante destacar, asimismo, el papel que desempeñan los tipos de tiempo en el ritmo diario del ozono. Como señalábamos en el apartado anterior, en invierno los máximos diarios se concentran preferentemente en las horas nocturnas (Figura 11) lo que coincide con el origen invernal de este contaminante asociado a intrusiones frías. En verano, por el contrario, el ritmo diario se caracteriza por un máximo principal en las horas más cálidas del día y otro secundario durante la noche..

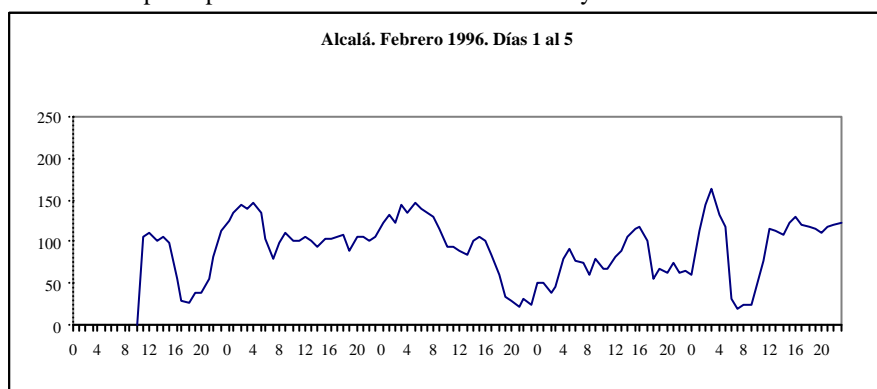


Figura 11. Ejemplos representativos de los dos tipos de ritmos diarios de las concentraciones de O₃ en el área de Madrid.

El primero tiene una fácil explicación por la importancia de los procesos fotoquímicos en la formación del ozono estival, sin embargo en el máximo secundario parecen intervenir otros mecanismos relacionados, por un lado, con el régimen de brisas y la existencia de la isla de calor en Madrid. Si aplicamos a nuestra zona el esquema que MANTILLA *et al.* (1996) utilizan para el conjunto de la Península, durante el día los precursores generados por los múltiples focos emisores de la ciudad serían desplazados hacia el exterior tanto en superficie por los vientos regionales dominantes del W y SW, como en altura como consecuencia de la baja relativa formada a partir de la isla de calor urbana. Durante la noche el aire rico en ozono iniciaría un proceso de retorno en superficie hacia la ciudad que sería el causante de los máximos secundarios nocturnos. Al régimen de brisas general, con una componente nocturna claramente N-S, se superpondría otro de menor extensión y provocado por la isla de calor urbano. Esto explicaría que el máximo nocturno no sólo se reconozca en la periferia norte, sino también en los municipios situados al sur de Madrid. Aunque faltan estudios más detallados del régimen de vientos, algunos de los ya publicados (AGUADO *et al.* 1998) parecen confirmar la hipótesis que acabamos de exponer.

2. 5. Tipos de tiempo y confortabilidad.

Los tipos de tiempo representan los diferentes ambientes meteorológicos a los que han de adaptarse los habitantes de un lugar y los que deberían marcar las pautas de construcción y planificación urbana. El objetivo final consiste en alcanzar los máximos niveles de confortabilidad con el mínimo consumo energético, para lo cual es esencial conocer las posibilidades y limitaciones que para el confort ofrecen cada uno de los tipos de tiempo que se suceden sobre Madrid.

El concepto de confort admite varias definiciones, pero en todas se halla presente el concepto de equilibrio energético entre el cuerpo humano y su entorno. Los mecanismos de autorregulación son complejos y la sensación térmica experimentada por el hombre depende de la acción combinada de tres variables fundamentales como son la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento².

La humedad regula la evaporación, por lo que desempeña un importante papel en las altas temperaturas, en las que la sudoración es uno de los mecanismos más importantes de enfriamiento. Sin embargo existen unos límites extremos que pueden ser negativos: por debajo del 20% de humedad, aumenta el peligro de infección por la sequedad de las mucosas; con temperaturas bajas, el aire muy seco aumenta el disconfort y en situaciones cálidas, cuando la humedad sobrepasa el 60% y, sobre todo, el 80%, la sensación de calor aumenta, ya que se produce el sudor, pero no evaporación, dando lugar al clásico bochorno o calor húmedo, bastante más inconfortable que el calor seco. El movimiento del aire, a su vez, aumenta la disipación de energía por evaporación o convección, siempre que la temperatura de la piel sea inferior a la del aire. No obstante, cuando las temperaturas son superiores a 40°C, el viento aumenta la sensación de calor.

Desde que a finales del XIX se iniciaron los primeros estudios relacionados con el bienestar climático, son numerosos los índices dirigidos a cuantificar las sensaciones térmicas y establecer escalas que permitan determinar las respuestas de la persona ante unas condiciones climáticas específicas. Todos los investigadores utilizan una metodología similar, consistente en el análisis combinado de las diversas

² Un análisis detallado de los mecanismos y procesos se puede ver en Fernández García, (1994 y 1996).

variables climáticas, que condicionan la sensación térmica, aunque varía su número y la importancia dada a cada una de ellas.

En este estudio aplicaremos el *Índice de Hill*, que permite distinguir 7 categorías de sensaciones en función de lo que el autor denomina temperatura efectiva, *t_b*, calculada a partir de las temperaturas del termómetro seco, del húmedo y la velocidad del viento (Cuadro 4).

Cuadro 4. Escala de sensaciones térmicas en función del índice de bienestar climático de Hill.

<i>Sensación</i>	<i>Temperatura efectiva</i>	
Muy frío	MF	Inferior o igual a -5
Frío	F	Entre -5 y 1
Fresco	f	Entre 1 y 6
Suave	S	Entre 6 y 12
Cálido	C	Entre 12 y 18
Muy cálido	Mc	Entre 18 y 24
Bochornoso	b	Superior a 24

En el periodo que hemos analizado, de mayo de 1995 a octubre del 1998, han aparecido todos los tipos definidos por Hill, pero sólo un día ha correspondido al carácter bochornoso y dos han sido muy fríos. Desde la óptica bioclimática, el rasgo más representativo del clima de Madrid es la elevada frecuencia de días con situaciones de estrés climático, provocadas tanto por el exceso de frío como por el de calor. Durante la noche, el periodo invernal se extiende desde diciembre hasta marzo, con un porcentaje de situaciones frías y frescas que supera el 50% en todos los casos y alcanza su máximo en febrero (Figura 12). En abril, mayo, octubre y noviembre el porcentaje de noches suaves supera con creces al de los otros dos grupos y desde junio a septiembre aumentan las sensaciones cálidas, siendo estas últimas las que caracterizan las noches estivales. Durante el día, las situaciones confortables son las más frecuentes desde noviembre hasta abril, con máximos en los meses invernales. Desde mayo hasta octubre son los días cálidos o muy cálidos los más frecuentes.

Los tres meses de invierno y seis de invierno que, según el refrán popular caracteriza el clima de Madrid, podría reflejar bien el ambiente bioclimático de nuestro entorno, si consideramos las sensaciones nocturnas de enero, febrero y marzo y los seis meses que, desde mayo a octubre, presentan la mayor parte de sus días clasificados dentro de las sensaciones cálidas o muy cálidas.

Durante el invierno, sin embargo, se produce una agradable alternancia de noches frías con días suaves. Lo contrario ocurre en verano, época durante la cual lo más frecuente es un acusado estrés térmico provocado por noches cálidas y días muy calurosos, que reducen al mínimo las sensaciones confortables durante un largo periodo del año.

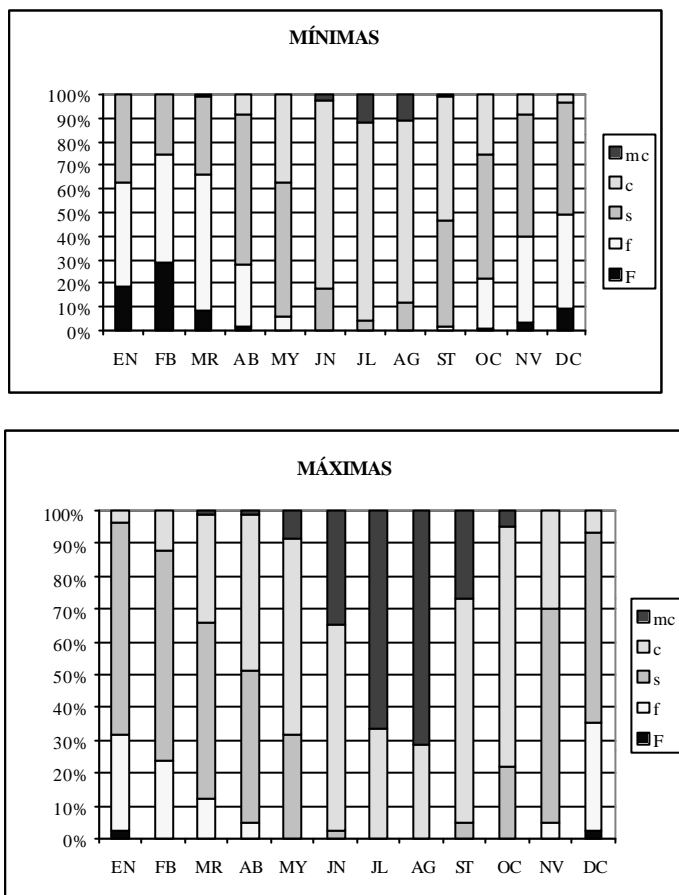


Figura 12. Porcentajes de los días de cada mes clasificados según las sensaciones de confort de Hill.

La influencia de los tipos de tiempo en este ritmo bioclimático es clara, tal y como aparece en la figura 13. En ella hemos representado el porcentaje de días confortables de cada mes asociados a los diferentes tipos y, como se puede observar, durante la noche son los tipos 2 y 6 los que más días confortables generan a lo largo del año. Durante el día, como era de esperar, son los tipos más frescos los que mejor ambiente generan, el 5 y el 6, en la mayoría de los meses y el 1 en los estivales.

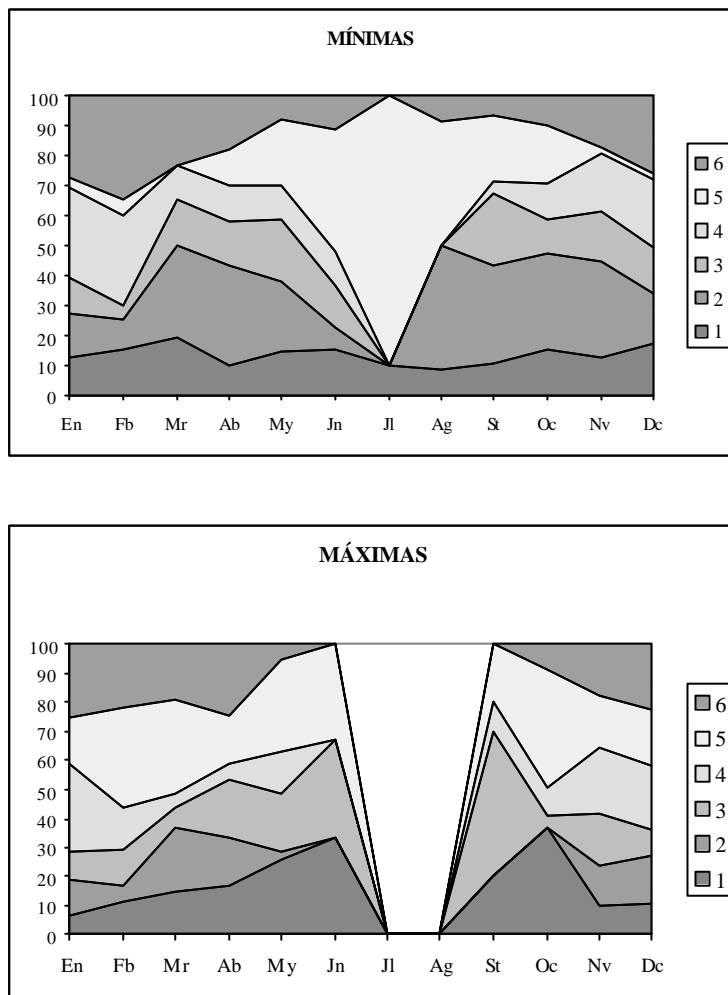


Figura 13. Porcentajes de los días confortables de cada mes asociados a los diferentes tipos de tiempo.

3. CONSIDERACIONES FINALES

Lo que acabamos de exponer no es más que un esbozo de las posibilidades que este tipo de estudios presenta. La ampliación del periodo de análisis, especialmente para la caracterización de los tipos de tiempo y la utilización de un número mayor de variables, o la incorporación de otras nuevas, mejorará considerablemente los resultados. Especial interés para nuestra zona tiene la consideración de todos aquellos aspectos relacionados con el espacio construido, que modifican sustancialmente las condiciones climáticas regionales tal y como las hemos definido. Como ya señalamos en otra ocasión (ARROYO y FERNÁNDEZ GARCÍA, 1991), la influencia de los parques, el viario y las construcciones pueden modificar sustancialmente los rasgos bioclimáticos que acabamos de caracterizar. Los mismos índices de confortabilidad han de ser matizados en relación a otras variables, no necesariamente climáticas, que aparecen asociadas a los diferentes tipos de tiempo, como sería el caso de la contaminación atmosférica; la acción combinada de todas ellas puede afectar a la salud de grupos de población cada vez más numerosos. El camino queda abierto y esperamos poder cumplir todos estos objetivos.

BIBLIOGRAFÍA

AGUADO, F CANO, D. y TÉLLEZ, B. (1998): “Avance sobre la influencia de los fenómenos mesoescalares en la contaminación de ozono sobre el área de Madrid” in FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y COLS. *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*, Madrid, Parteluz, pp. 521-532.

ARROYO ILERA, F. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1991): *El confort térmico en Madrid*. Ediciones de la Universidad Autónoma. 109 pp.

ARROYO, F. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1992): “Consideraciones sobre la valoración educativa de la confortabilidad ambiental de la ciudad”. *Boletín de la A.G.E.* V. 14, pp. 67-84.

BITTAN, A. (1992): “The high climatic quality city in the future”. *Atmospheric Environment*, V. 26 B, n. 3, Pergamon Press, pp. 313-329).

CE (1996): *Ciudades europeas sostenibles*. Bruselas, 1996.

COMRIE, A. (1993): “The climatology of surface ozone in rural areas”. *Int. Journ. Of Climatology*, pp. 295-315.

DAVIS, R. y KALKSTEIN, L. (1990): “Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations”. *Phys. Geo.*, 11, pp. 320-342.

DOMÍNGUEZ BASCÓN, P. (1999): *Clima, medioambiente y urbanismo en Córdoba*. Córdoba, EE. Cordobeses, 344 pp.

EEA (1995): *Environment in the European Union*. EEA, Copenhagen, 1995. 152 pp.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1994): "Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos". *Rev. de la Universidad de Alcalá de Henares, Serie Geográfica*. N. 4, pp. 109-125.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1995): *Manual de Climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación*. Madrid, Ed. Síntesis. Espacios y Sociedades. 285 pp.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1998): "Clima y ambiente urbano", in FERNÁNDEZ, F. *et al.* Coords: *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Madrid, Ed. Parteluz, pp. 13-20.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F.(1999): "Las modificaciones climáticas producidas por la ciudad: contaminación y clima urbano", in TELLO, B. (coord): *El malestar ambiental en la ciudad* . . Madrid, UAM-Ediciones. Cuadernos del ICE. pp. 65-86.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1999): "La contaminación atmosférica en Madrid y su área metropolitana", *Territorium. Revista de Geografía Física Aplicada no Ordenamento do Território e Gestao de Riscos Naturais*, n.6. Ed. Minerva, Coimbra, pp. 11-17.

FERNÁNDEZ GARCIA, F. y GALÁN, E. (1995): "Clima y contaminación atmosférica en Madrid". *Estudios Geográficos*, 219, pp. 283.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y RASILLA, D. (1998): "Relationships between synoptic scale atmospheric circulation and ozone concentration in Madrid (Spain)". *Preregional conference Meeting of the comission on Climatology. International Geographical Union*, Evora.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y RASILLA, D.(1999): "Concentraciones ozono y tipos de tiempo en el área metropolitana de Madrid". *Actas del VIII Coloquio Ibérico de Geografía*, Lisboa, Vol. I, pp. 31

FERNÁNDEZ GARCÍA, F., GARCÍA HERNÁNDEZ, E., ALLENDE, F., FERNÁNDEZ-RENAU GONZÁLEZ-ARNAU, A., GÓMEZ SÁNCHEZ, J.A., RASILLA, D., BARROSO, A.(1999): "Airborne remote sensing as a tool to study the links between land use and urban heat island" . *3rd Historical cities Sustainable Development: The GIS as Desing and Management Support*. Siracusa, Italy, 20-21 april (Publicado en Cd-Rom).

FERNÁNDEZ GARCÍA, F, GALAN, E. y HERNÁNDEZ, E (1993): "Avance de un modelo de distribución espacial de la contaminación en Madrid". *XIII Congreso Nacional de Geografía*. Sevilla.

KONYA, A. (1981): *Diseño en climas cálidos*. Madrid, Blume, 153 pp.

LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1981): "La contaminación atmosférica: distribución espacial y variaciones estacionales en Madrid", *Estudios de Geografía Urbana*. C.S.I.C. Madrid, pp. 71-100.

LÓPEZ GÓMEZ, A. y J., FERNÁNDEZ GARCÍA, F. y ARROYO ILERA, F. (1991): *El clima urbano de Madrid: La isla de calor*. C.S.I.C.C.

LÓPEZ GÓMEZ, A., FERNÁNDEZ GARCÍA, F., MORENO JIMÉNEZ, A. y ARROYO ILERA, F. (1993): *El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid*. MOPT, Serie Monografías.

LÓPEZ GÓMEZ, A., FERNÁNDEZ GARCÍA, F., FERNÁNDEZ RENAÚ, A., GARCÍA HERNÁNDEZ, E. y ARROYO ILERA, F. (1998): *Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aeroportada*. CSIC y Editorial Parteluz. 83 pp. ISBN: 84-8230-017-2

McGREGOR, G. y BAMZELIS, D. (1995): "Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships in Birmingham, United Kingdom", *Theor. Appl. Climatol.*, 51, pp. 223-236.

MANTILLA, E., MILLÁN, M., SALVADOR, R. y OLLER, G. (1996): "Influencia de la Meteorología en la formación, transporte y dispersión del ozono troposférico" en *II Seminario de Calidad del aire en España*, MMA, Vol. II, pp. 225-249.

YARNAL, B. (1993): *Synoptic climatology in environmental analysis*, Belhaven Press, 290 pp.