

1. INTRODUCCIÓN.

La contaminación atmosférica se produce de forma inherente a la actividad humana, siendo una consecuencia no deseable del progreso tecnológico con la que se ha de convivir en cierto grado. La conexión entre las emisiones a la atmósfera y los receptores últimos, ya se trate de ecosistemas naturales o del propio ser humanos, se produce a través de procesos atmosféricos complejos y complicados, que involucran escalas de movimiento muy diferentes, desde efectos muy locales hasta los problemas de transporte transcontinental, durante cuyo transcurso se producen continuas transformaciones físicas y químicas de las distintas especies presentes en su seno. Estos procesos se encuentran fuertemente condicionados por las características geomorfológicas y climáticas de la cuenca Mediterránea que, en general, conducen a una intensificación de los sistemas circulatorios mesoescalares, imponiéndose durante buena parte del año, y especialmente en verano, a los procesos atmosféricos a gran escala, más característicos de regiones situadas en latitudes más septentrionales.

En el caso particular del ozono, en el seno de la baja atmósfera (ozono troposférico) constituye un componente natural de la misma; adquiere, no obstante, la categoría de contaminante al superar ciertas concentraciones en las que, debido a su carácter altamente oxidante, tiene efectos nocivos sobre la vegetación y la salud humana (y aunque contemplado en menor medida, sobre los materiales en general). En Europa la Directiva 2002/3/CE, relativa al ozono en aire ambiente, regula la fijación de objetivos de calidad del aire a largo plazo.

La formación fotoquímica de ozono en una región determinada es el resultado de un complejo proceso químico en el que, a partir de sus precursores (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) intervienen una multiplicidad de especies diferentes, que interaccionan entre sí según distintas reacciones, dando lugar a un balance final altamente no lineal. Como consecuencia de estos complejos mecanismos químicos, en una región dada, y dependiendo de las condiciones iniciales de partida, la introducción de una nueva fuente de emisiones puede tener consecuencias muy variables, cabiendo la posibilidad de que conduzca tanto a un incremento como a un decremento en las concentraciones de ozono. La estimación del impacto fotoquímico debido a nuevas emisiones, que se reduciría a un cálculo muy cuidadoso de los procesos físico-químicos involucrados (dispersión, transformaciones químicas, etc.), acotándose la incertidumbre en función de la bondad de los datos disponibles, de las herramientas y de la metodología utilizada, adquiere así una complicación adicional dado que normalmente la estimación de las emisiones lleva asociado un considerable error que alcanza, y puede llegar a superar, el 300%.

Por otro lado, en la formación de ozono en una región determinada participan una gran cantidad de procesos que se desarrollan a escalas muy diferentes. Así por ejemplo, es necesario tener en cuenta las emisiones locales, pero también la composición del aire que llega a la zona con especies químicas potencialmente advectadas desde regiones muy alejadas. Además, los procesos meteorológicos juegan un papel muy importante, en cuanto que determinan la mayor o menor mezcla de las emisiones, su distribución por el entorno, la tasa de insolación, etc. Todo ello hace que las fuentes de incertidumbre sean muy variadas y difíciles de gestionar, y a pesar de que el ozono es una especie que presenta mucha inercia química, cuya concentración en la atmósfera se encuentra muy amortiguada, con pequeñas

tasas de variación en general, son precisamente pequeñas diferencias las que existen frecuentemente entre las concentraciones medidas y los umbrales establecidos en la legislación. Esta complejidad del sistema hace que tenga un comportamiento altamente no lineal, por lo que no resulta ni sencillo ni intuitivo valorar la evolución que experimentarían los niveles de concentración de ozono en respuesta a modificaciones en el mismo (como en el presente caso, ante un incremento de las emisiones). Por otra parte, esta respuesta no será tampoco espacialmente uniforme, de manera que algunas regiones próximas entre sí pueden experimentar cambios de magnitud muy considerables, respondiendo incluso con evoluciones de sentidos opuestos.

Los procesos meteorológicos que conducen a la distribución del campo de concentraciones en un momento dado, a partir de las correspondientes emisiones, resultan extremadamente complejos, conduciendo a una dinámica altamente no lineal (en especial si a los procesos dispersivos se unen transformaciones químicas de las especies emitidas), por lo que a la dificultad de reproducir los procesos físico-químicos involucrados ha de añadirse la incertidumbre en la información manejada (tanto en los valores de partida de inicialización de los códigos como los utilizados para la validación de los resultados).

En el caso de la contaminación secundaria el problema no se circunscribe a aquellos emplazamientos con un elevado nivel de emisión de contaminantes precursores, como es el caso de las ciudades o los complejos industriales. Las corrientes atmosféricas facilitan el transporte a distancia (incluso transoceánica) de los precursores, por lo que en el estudio de las concentraciones de ozono medidas en una región es necesario considerar no solo las emisiones locales, sino además, el transporte regional y de larga distancia. Esta contribución vendrá determinada por la situación meteorológica, y de forma más concreta, por el campo de vientos, tanto en superficie como en altura.

La utilización de códigos numéricos para la estimación de la calidad del aire ha de asegurar la contemplación de todos aquellos factores significativos que participan en la dinámica de un sistema tan complejo, con un comportamiento no lineal. Ello obliga a considerar la incidencia de las incertidumbres en la información de partida sobre los resultados. Esta gestión de la incertidumbre dependerá en cada caso del tipo de aplicación: diagnóstico, pronóstico, cumplimiento normativo, vigilancia, evaluación de nuevas actividades, planificación, etc.

Generalizando, entre las dificultades que plantea la utilización de modelos meteorológicos-fotoquímicos en la estimación del impacto ambiental se encuentra la de proponer soluciones adecuadas para los siguientes aspectos:

- *–respuesta temporal:* es frecuente que las aplicaciones de los modelos requieran una respuesta de amplio rango temporal (especialmente cuando se evalúa el impacto de una nueva actividad industrial), resultando actualmente una tarea inabordable la operación de los modelos más avanzados de simulación fotoquímica sobre periodos muy largos; es por ello que se precisa un análisis de las características meteorológicas del emplazamiento con objeto de aumentar la representatividad de las ejecuciones;
- *–interacción entre diferentes escalas;* en la dinámica de contaminantes (especialmente si se refieren a especies secundarias) en una región determinada participa una gran cantidad de procesos que se desarrollan a escalas muy diferentes, que deben ser

consideradas, tanto desde el punto de vista meteorológico como desde el de las emisiones, de los procesos involucrados, etc.;

- *–descripción suficientemente realista de los procesos físico-químicos;* por ello se requiere el uso de herramientas suficientemente complejas que incorporen los principales mecanismos involucrados;
- *–incertidumbre en la información;* habitualmente la información de partida es escasa y raramente satisface las necesidades de resolución demandada por los modelos, lo que obliga a efectuar un trabajo previo de preprocesado, con hipótesis lo más realistas posibles;
- *–gestión de la incertidumbre;* la aludida gran complejidad del sistema físico-químico requiere utilizar las herramientas con una estrategia que permita adaptar los resultados de las mismas a las necesidades establecidas inicialmente, con objeto de acotar el rango de incertidumbre;
- *–gestión de la información;* los modelos numéricos proporcionan una profusa información, consistente en una colección de retículas espaciales cuatridimensionales (x-y-z-t) de diferentes parámetros físico-químicos; ello obliga en general a tratar la información generada para adecuarla a la respuesta perseguida por la aplicación en cuestión, y que tenga en cuenta los diferentes condicionantes (incertidumbre, cumplimiento normativo, etc).

Como concreción metodológica de los puntos anteriores, se plantea a continuación las directrices seguidas en la estimación del impacto ambiental sobre el campo de concentraciones de ozono debida a una nueva actividad industrial:

- trabajar solamente sobre las diferencias de concentración de ozono, prefiriéndose a los valores absolutos de inmisión, confeccionados a partir de la resta de los valores resultado de las simulaciones con y sin actividad industrial; con ello se contribuye a minimizar también la incertidumbre derivada del proceso de cálculo y del insuficiente conocimiento de las condiciones de partida que, hasta cierto punto, se anularía en la sustracción de los niveles;
- selección de unos episodios meteorológicos representativos por su repetibilidad, a la vez que muy favorables a la producción de ozono troposférico, de manera que los resultados resulten conservativos respecto al comportamiento general del sistema;
- utilización de técnicas avanzadas de modelización para representar de la manera más fidedigna posible los procesos físico-químicos atmosféricos responsables de la formación de ozono;
- partir de la mejor información disponible sobre la zona, de manera que se reduzcan las incertidumbres asociadas a los datos de entrada;
- poner en práctica una rutina de simulaciones que permita evaluar la incertidumbre de los resultados a partir de una matriz de probabilidades, obtenida a partir de una colección de nueve escenarios de emisión;
- compilación del gran volumen de información generado en función de un conjunto abordable de valores, concretados en una serie de estimadores puntuales y espaciales;

- evaluación de los resultados a través las medidas experimentales históricas y en función de los parámetros legales como base para la valoración del impacto esperado;
- gestión de la información resultante en función de la normativa vigente (se tomaron así en consideración únicamente los valores de los *máximos horarios* y *octohorarios*), confeccionando dos tipos de resultados, siempre en forma de matriz de escenarios:
 - (1) *estimaciones puntuales*, sobre los campos de diferencias, donde se resumen algunos parámetros estadísticos relevantes (máximos absolutos, medias, percentiles, etc.);
 - (2) *distribuciones espaciales*, de algunos de los campos de diferencias considerados más representativos (en concreto las diferencias de los máximos horarios y octohorarios).

Así pues, la contaminación secundaria introduce un grado superior de complejidad en el diagnóstico del impacto en una zona, en tanto que no aparece directamente ligada a las emisiones de la propia actividad y al depender fuertemente de las condiciones de contorno, por lo que no siempre es sencillo establecer relaciones de causa-efecto con aquellas. En el presente caso se consideró que deberían centrarse los esfuerzos en una caracterización lo más realista posible de la estimación del impacto secundario (fotoquímico), realizada necesariamente mediante técnicas de modelización numérica. Por el contrario, la aproximación a la contaminación primaria se realizaría ventajosamente mediante un plan de vigilancia experimental, que permitiese poner de manifiesto los niveles de inmisión característicos de la zona, antes (mediante el inicio de un programa de medidas sistemático) y con posterioridad a la puesta en marcha de la nueva actividad industrial. En esta línea se prestó una especial atención a la contaminación por material particulado, y en concreto a la presencia de elementos metálicos, dada su importancia desde un punto de vista de sanitario y su potencial vínculo con una actividad industrial de refinado de petróleo.

En este contexto, dentro del convenio suscrito entre la Universidad de Extremadura y la Fundación CEAM para el desarrollo de un *Proyecto de Investigación para el Diagnóstico y Vigilancia del Impacto por Vía Atmosférica de un Complejo Refinero en Extremadura*, motivado por la previsión del inicio en la zona de nuevas actividades industriales relacionadas con el procesado de crudo, se proponía como objetivo general de los trabajos la *puesta en marcha, durante un periodo inicial de un año, de una estrategia para el diagnóstico y vigilancia continuada de la calidad del aire y su impacto potencial por vía atmosférica en el entorno de interés, con especial atención a la evaluación del efecto sobre las comunidades vegetales de viñedos y olivos*.

Referencias Legales.

La legislación vigente en relación a la contaminación por ozono troposférico se recoge en el real decreto 1796/2003 (transposición de la correspondiente directiva europea 2002/3/CEE) en que se establecen para este compuesto unos valores objetivo y unos objetivos a largo plazo. El control se establece a través de una serie de indicadores y valores umbrales, que se recogen en la tabla adjunta.

Tabla 1-1: umbrales de concentración de ozono. Directiva 2002/3/CE

	Parámetro	Umbral
Protección a la salud	Promedio 8 horas	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Protección a la vegetación	AOT40	18000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Información	Promedio horario	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Alerta	Promedio horario	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Por una parte la normativa contempla la necesidad de informar y avisar con antelación a la ciudadanía en caso de previsión de ocurrencia de episodios agudos de contaminación por ozono, no necesariamente de larga duración (a través de los correspondientes umbrales de información y alerta a la población, establecidos sobre la base de promedios horarios). Esta obligación requiere la difusión de dicho pronóstico sobre la posibilidad de alcanzar valores picos elevados, la previsión de su evolución, la emisión de consejos a la población más sensible y, en el caso de superación del nivel de alerta, la puesta en marcha de planes de actuación.

Por otro lado, la legislación limita la posibilidad de ocurrencia de valores crónicos de contaminación, para lo cual se establecen valores objetivos de concentración de ozono, a través de los umbrales de protección a la salud humana y a la vegetación (tabla 1.2). En este aspecto la norma es mandatoria en el sentido de exigir el cumplimiento de los límites establecidos, para lo cual las administraciones responsables deberán de adoptar medidas orientadas a su reducción en el caso de producirse superaciones.

Tabla 1.2: valores objetivo de ozono a alcanzar el año 2010. Directiva 2002/3/CE.

	Parámetro	Valor objetivo para el 2010
Valor objetivo para la protección de la salud humana	Máximo de las medidas octohorarias del día	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no deberá superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un periodo de 3 años.
Valor objetivo para la protección de la vegetación	AOT40, calculada a partir de valores horarios de mayo a julio.	18000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ de promedio en un periodo de 5 años.

En los trabajos sobre la evaluación del impacto por ozono se hace referencia a los anteriores parámetros, recogidos en el citado real decreto, cuya consulta resultaría recomendable para la ampliación de los numerosos aspectos que con relación a la contaminación por ozono troposférico en el se recogen.