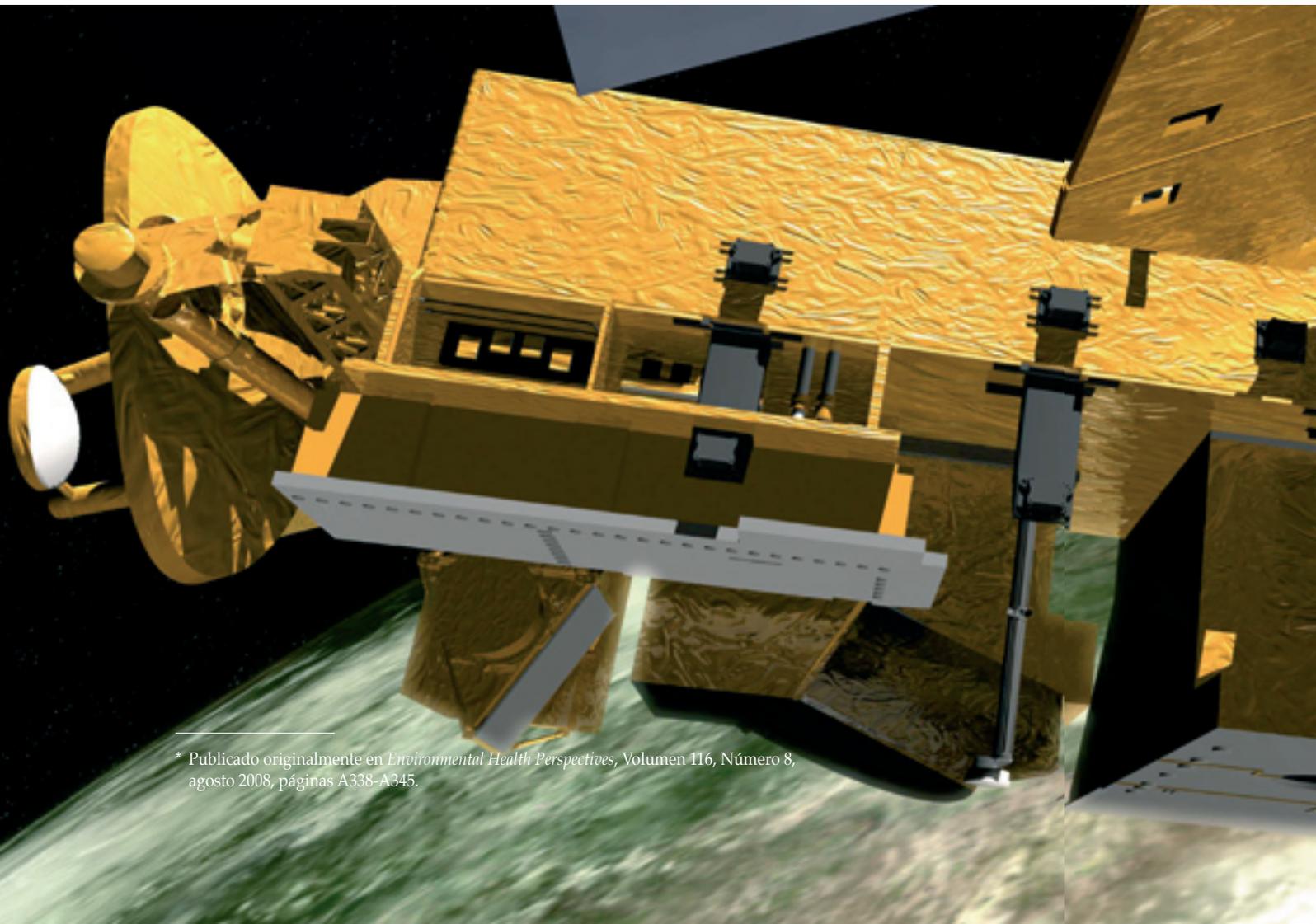


# El alcance global de la contaminación\*

Fotografías tomadas por un satélite  
captan el movimiento a gran distancia



\* Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, Volumen 116, Número 8, agosto 2008, páginas A338-A345.

Las chimeneas altísimas eran un “remedio” popular para las emisiones industriales a mediados del siglo XX. Simplemente hay que bombear los contaminantes a una altura suficiente en el aire, se pensaba, y el problema se esfumará. Pero la evidencia recogida desde entonces sugiere insistentemente que las chimeneas altas no bastan para mitigar los efectos de la contaminación: esos contaminantes terminan por bajar en alguna parte, a una distancia de docenas o millares de millas. En el número de *EHP* de noviembre de 2006, por ejemplo, Morton Lippman, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, y sus colegas reportaron una fuerte correlación entre el níquel emitido desde una chimenea muy alta en una fundidora en Sudbury,

Canadá, y cambios agudos en el ritmo cardíaco de los ratones a una distancia de 500 millas. Al mismo tiempo, ahora sabemos también que las chimeneas altas no son necesarias para transportar los contaminantes por el aire a grandes distancias, como se ha verificado mediante veintenas de estudios individuales que demuestran que un contaminante u otro –por ejemplo, el ozono, las partículas suspendidas (PS) o el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)– puede ser llevado por el aire de un país a otro y de un continente a otro.

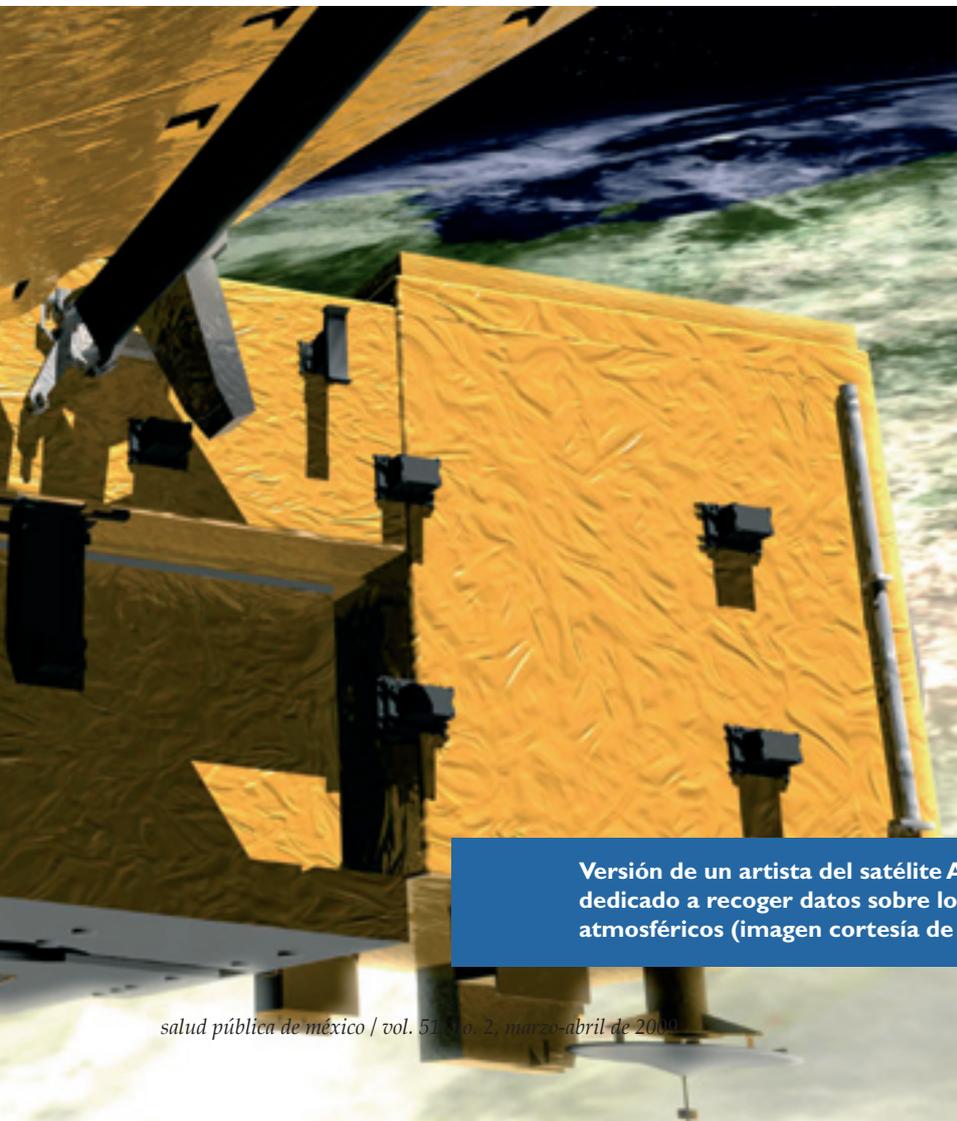
La vigilancia mediante un satélite, iniciada en la década de los 1980 y que se ha acelerado más o menos desde el año 2000, contando con instrumentos cada vez más sofisticados, nos ha permitido visualizar mejor las complejas fluctuaciones de varios

contaminantes importantes conforme éstos van y vienen alrededor del planeta. Esta nueva capacidad es en parte un descubrimiento fortuito. “La mayoría de los satélites no fueron diseñados para enfocarse en la calidad de la atmósfera”, dice Ferry Keating, un científico ambiental de la Agencia de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés, EPA) de Estados Unidos y copresidente del Grupo de Trabajo sobre la Circulación Hemisférica de la Contaminación Atmosférica, que fue creado en el año 2004 por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para el Convenio Europeo sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia. “Pero nos encontramos con que tenemos este torrente de datos y estamos averiguando cómo utilizarlo”, dice.

Un uso ha consistido en una serie de proyectos piloto que vinculan directamente las concentraciones de contaminantes atmosféricos en forma de columna observadas mediante el satélite –es decir, la concentración desde la superficie de la Tierra hasta la parte más alta de la atmósfera, con las concentraciones a ras del suelo. “Apenas en los últimos diez años hemos podido hacer progresos en la ciencia epidemiológica valiéndonos de los satélites”, dice John Haynes, director del programa de salud pública y aplicaciones a la aviación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). “Este es en verdad un gran avance hacia la ciencia epidemiológica del siglo XXI.”

### El lanzamiento de un nuevo campo

El progreso constante de las capacidades de los satélites durante el siglo XX permitió obtener atisbos del planeta



Versión de un artista del satélite Aura, que está dedicado a recoger datos sobre los contaminantes atmosféricos (imagen cortesía de la NASA)

desde elevaciones cada vez más altas. Con el lanzamiento del primer satélite –el Sputnik– por la Unión Soviética en 1957, obtuvimos nuestra primera vista de la Tierra desde arriba de la tropósfera, la capa de la atmósfera que vibra y oscila en torno al planeta desde el suelo hasta elevaciones de entre 4 y 12 millas aproximadamente.

Al año siguiente, Estados Unidos creó la NASA. El estudio de los contaminantes atmosféricos estaba lejos de ser la principal prioridad de la NASA durante sus primeros años; su programa se enfocaba en mantener a Estados Unidos por delante de la Unión Soviética en la carrera espacial. Pero las capacidades tecnológicas desarrolladas como parte de los programas de exploración espacial de Estados Unidos han proporcionado herramientas de importancia crítica para comenzar a observar los complejos movimientos giratorios de diversos contaminantes en la atmósfera.

Entre los múltiples países que actualmente participan en programas satelitales dirigidos a los contaminantes atmosféricos se encuentran Brasil, Canadá, China, la India, el Japón y los 20 países europeos que son los principales miembros de la Agencia Espacial Europea (por sus siglas en inglés, ESA). “Cada vez más países están cobrando conciencia de este problema en todo el mundo”, dice Claus Zehner, un ingeniero en aplicaciones para la observación de la Tierra de la ESA. “Es un tema creciente en el mundo de los satélites.”

Rastrear los contaminantes atmosféricos por separado puede ser un reto bastante grande. Los instrumentos de los satélites utilizan el patrón espectral específico de una sola sustancia química o una sola clase de sustancias químicas para distinguirla de todas las demás sustancias que flotan en torno a ella. Pero los científicos también deben tomar en cuenta variables tales como las nubes, la humedad, el viento y las formaciones geográficas; la reflexión

de las superficies de tierra y mar (que constituyen el telón de fondo de lo que el instrumento percibe), y las reacciones químicas (que pueden alterar el compuesto rastreado antes de que llegue al suelo, dificultando la predicción de cuáles son exactamente las sustancias químicas que constituyen un problema ambiental para la salud). Además, las masas de aire se mezclan en forma tanto horizontal como vertical en una amplia gama de escalas temporales y espaciales, incluso cuando la tropósfera superior se mezcla con la “capa planetaria fronteriza”, en cuyo caso la fricción con la superficie de la Tierra altera las corrientes de aire. Y existe una última complicación: la mezcla que ocurre dentro de la capa planetaria fronteriza y que determina el nivel de los contaminantes cerca del suelo.

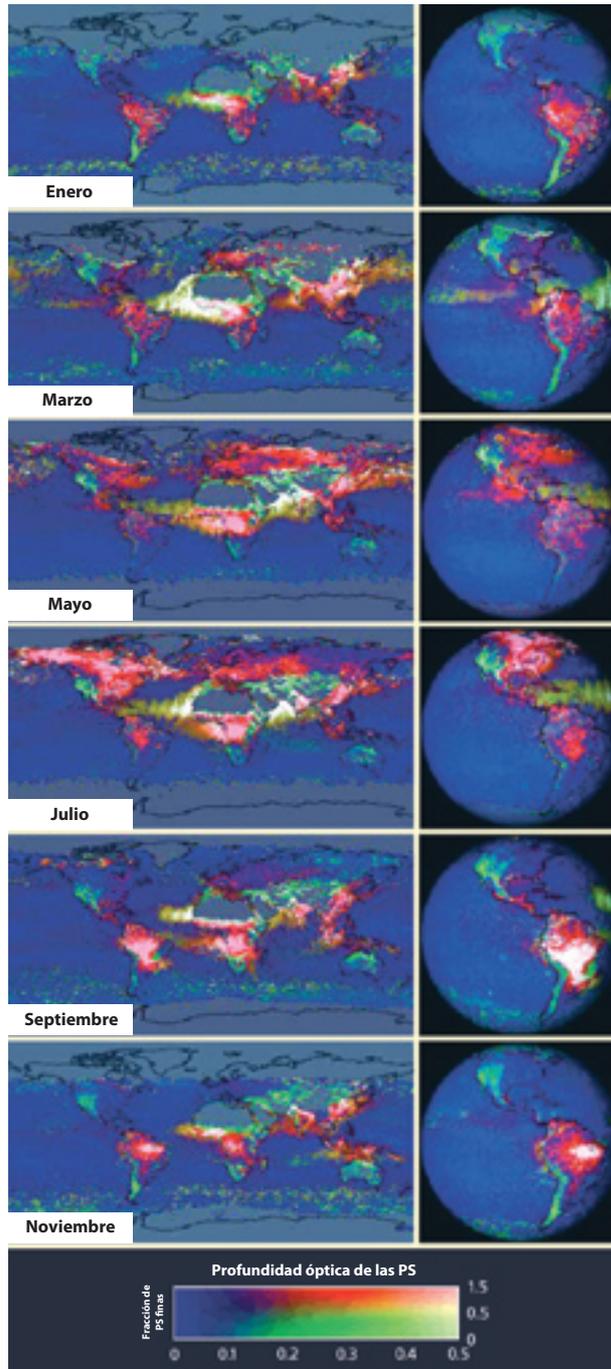
Hasta ahora, los científicos comienzan a comprender bien cómo influyen estas variables en el rastreo de las partículas suspendidas, el bióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO) y el formaldehído. También están haciendo algunos progresos con el ozono, pero el  $\text{SO}_2$  y la mayoría de los compuestos orgánicos volátiles (COV) siguen planteando un reto considerable. Otros contaminantes importantes de los que se sabe que tienen una amplia distribución –entre los que se cuentan los hidrocarburos aromáticos policíclicos, el amoníaco, los plaguicidas y metales como el plomo y el mercurio– son difíciles de distinguir de las PS a las que están adheridos, o bien, tienen patrones espectrales difíciles de detectar entre todas las condiciones atmosféricas que generan complicaciones, dice John Burrows, codirector del Instituto de Detección Remota y Física Ambiental de la Universidad de Bremen. Para rastrear estos contaminantes se requerirán mejores instrumentos, dice Burrows. De hecho, nos falta un largo camino que recorrer antes de que podamos documentar plenamente y predecir con exactitud las corrientes

de contaminación y sus efectos sobre la superficie terrestre. Pero los datos obtenidos por medio de los satélites, aviones, globos, monitores a ras del suelo, modelos de circulación de sustancias químicas y otras herramientas ya están mejorando nuestra comprensión de la circulación global de los contaminantes a medida que las naciones individuales y las colaboraciones internacionales luchan por enfrentar mejor las emisiones y los efectos que éstas tienen en los países y continentes a los cuales son llevadas por el viento.

### **Visión detallada de las partículas suspendidas**

Las partículas suspendidas se crean mediante la combustión de carburantes en los vehículos, plantas eléctricas, cocinas domésticas y procesos industriales, así como mediante procesos naturales tales como los incendios arrasadores, las erupciones volcánicas, el polvo transportado por el viento y el estallido de las burbujas cargadas de sal marina en la superficie del océano. Las PS pueden causar muerte prematura y toda una gama de problemas respiratorios y cardiovasculares. Debido a que tienen distintos orígenes y permanecen en la atmósfera durante periodos diversos, las PS son sumamente variables en espacio y en tiempo. Al contrario de lo que ocurre con los contaminantes gaseosos, la caracterización de las PS debe incluir asimismo la composición o el tipo y el tamaño y la forma de las partículas; todas estas dimensiones son importantes para evaluar los efectos nocivos de los particulados sobre la salud humana.

Las PS no eran consideradas un problema importante de circulación a gran distancia hasta mediados de la década de los 1990. Es sólo hasta ahora que los 51 países que participan en el Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia comienzan a hacer frente



Las PS viajan a centenares y millares de millas, como se ve en estas imágenes tomadas por un satélite para el año 2004, las cuales ilustran la densidad de las PS desde la superficie de la tierra hasta la parte más alta de la tropósfera (que oscila entre 4 y 12 millas). En general los rojos indican las fuentes generadas por los humanos; los verdes indican fuentes principalmente naturales, y los cafés indican una mezcla de ambas. Los tonos más oscuros indican mayores concentraciones. Las concentraciones atmosféricas tienden a tener una correlación entre pronunciada y moderada con las concentraciones a ras del suelo, dependiendo de las condiciones locales.

Cuantificando cuidadosamente la luz solar visible y cuasi infrarroja que refleja de regreso hacia el espacio una estela de PS, los científicos pueden calcular con precisión el tamaño promedio de las partículas individuales que conforman la estela.

Las partículas de origen natural (por ejemplo, el polvo llevado por el viento) tienden a ser de mayor tamaño que las producidas por los seres humanos, la mayoría de las cuales se originan en el proceso de combustión (en incendios o fábricas) y por ende se dividen en partículas más pequeñas

Fuente: NASA

a las PS y a debatir si deben añadir a este convenio políticas sobre este contaminante y cómo hacerlo, dice Andre Zuber, quien preside, junto con Keating y un responsable de políticas, la Comisión Europea.

Las imágenes del satélite indican hasta dónde pueden viajar las PS. Casi todos los continentes y regiones pueden ser puntos de concentración de PS en un momento u otro. Algunas áreas son una fuente importante de éstas durante

casi todo el año, incluyendo el centro y el sur de África, el este de Asia, Indonesia, Europa, el este de Estados Unidos y el norte y el centro de Sudamérica.

También se están utilizando satélites para cuantificar el movimiento de las PS entre los continentes. Hongbin Yu –investigador científico adjunto del Centro Goddard de Ciencias de la Tierra y Tecnología, un centro de investigación conjunta de la NASA y la Universidad de Maryland en el Condado de Baltimore– y sus colegas encontraron que las fuentes de contaminación del este de Asia añadían en promedio un 15% a la carga de PS distintas del polvo que ya se estaban generando en Estados Unidos y Canadá desde 2002 y 2005. Estos hallazgos, publicados en el número del *Journal of Geophysical Research* del 22 de abril de 2008, proporcionan el

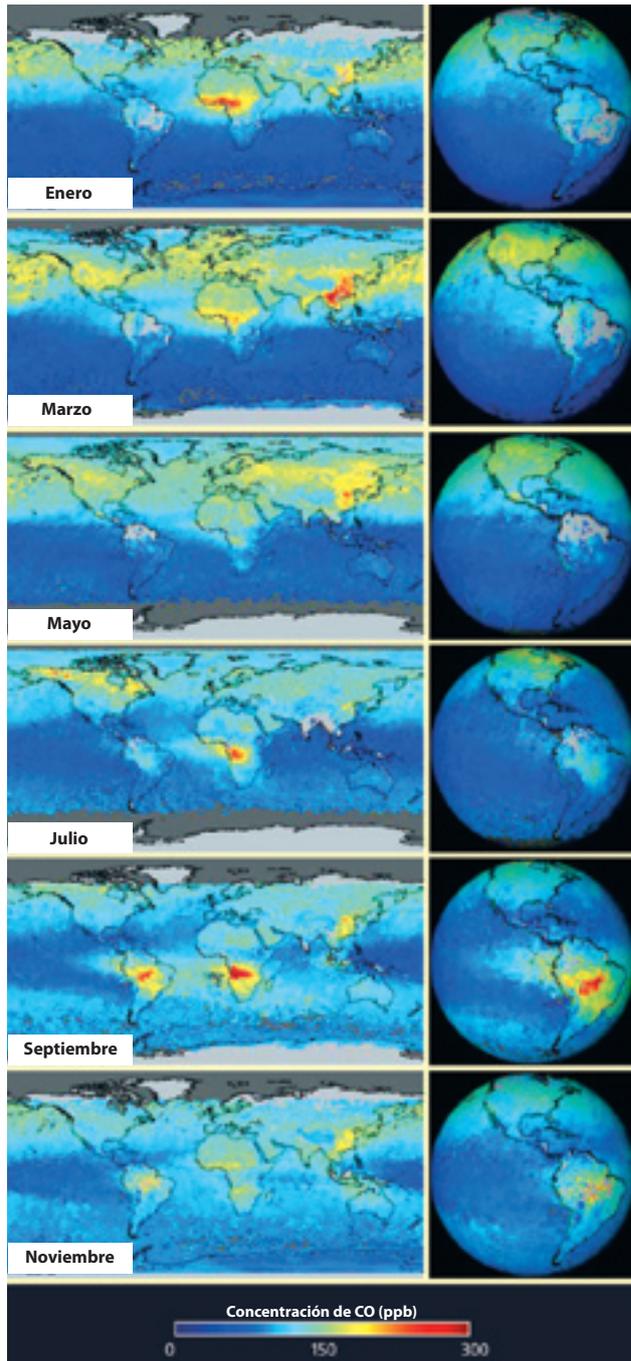
primer cálculo basado en observaciones por medio de un satélite de la circulación de PS desde el este de Asia hasta el norte del continente americano.

El estudio no calculó los efectos a ras del suelo, lo cual requiere una mayor capacidad del satélite para

evaluar diariamente las estructuras verticales de las estelas de contaminación con gran exactitud. “[Ese] proceso sigue siendo un tanto confuso”, dice Solar Smith, investigador adjunto del Centro de Investigación Espacial de la Universidad de Texas en Austin, quien no participó en el

estudio de Yu. “En una escala a largo plazo se puede calcular el promedio a través del tiempo y obtener así una comprensión bastante confiable del modo en que está cambiando la calidad del aire [a ras del suelo]. El reto consiste en el análisis de los ámbitos individuales en días individuales. Siempre estamos trabajando para mejorar los algoritmos.”

Valiéndose de los algoritmos existentes, un equipo internacional estudió 26 emplazamientos en Sydney, Delhi, Hong Kong, Nueva York y Suiza, y encontró una correlación general de un 96% entre las mediciones de la carga atmosférica de la columna de PS realizadas por el satélite y las mediciones terrestres de la concentración de PS, si bien hubo una variación considerable causada por factores tales como la cubierta de nubes, humedad relativa



El CO se extiende a cientos y miles de millas, como se puede ver en estas imágenes de las concentraciones de este compuesto a una altura aproximada de 12 000 pies. Estos datos fueron recogidos por el sensor MOPITT (Mediciones de la Contaminación en la Tropósfera) del satélite Terra de la NASA. El color rojo indica concentraciones más altas, y el color morado indica concentraciones más bajas. Estas concentraciones tienden a no implicar una amenaza directa a la salud, pero sirven para rastrear varios otros contaminantes que sí pueden ser nocivos. El CO, que se produce cuando los combustibles a base de carbono se queman de manera incompleta o ineficiente, es uno de los seis principales contaminantes atmosféricos regulados en Estados Unidos y en muchas otras naciones en el mundo.

Las cantidades y las fuentes de CO en la atmósfera cambian según el lugar y la temporada. En África, por ejemplo, los cambios del CO en las diversas estaciones están ligados a la práctica extendida de quemar los campos para fines agrícolas, la cual se lleva a cabo al norte del ecuador en algunas temporadas y al sur de éste en otras.

Fuente: NASA

y circulación en la capa fronteriza. Estos resultados se publicaron en el número de *Atmospheric Environment* [Ambiente atmosférico] de septiembre de 2006. En el número de junio de 2008 de la misma revista, Klaus Schäfer y sus colegas reportaron una correlación del 90% entre las mediciones vía satélite y terrestres para los particulados finos de un diámetro de  $2.5 \mu\text{m}$  o menor ( $\text{PS}_{2.5}$ ) en el invierno, pero en el verano la correlación fue únicamente de 48% para las PS con un diámetro menor de  $1 \mu\text{m}$ .

Estos resultados variables, así como los obtenidos mediante otros estudios, confirman que de hecho los procesos de medición y de cálculo siguen siendo un tanto confusos. Los datos que surgen de las mediciones realizadas por el Lidar (el análogo óptico del radar) que se hicieron a bordo del satélite CALIPSO (Cloud-aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation\*) ayudarán a obtener un cuadro más claro, dice Yu. En el futuro se requerirán mediciones vía satélite con una cobertura más amplia que la del CALIPSO. Pero los resultados se están volviendo lo suficientemente confiables—al menos en ciertas regiones y estaciones—como para que algunos proyectos locales estén utilizando o pensando en utilizar datos de PS derivados de satélites.

HELIX-Atlanta (Salud y medio ambiente vinculados para el intercambio de información en Atlanta, Georgia) es un proyecto de demostración integrado por cinco condados cuya principal investigadora durante su primera mitad fue Amanda Niskar, quien entonces trabajaba en los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (por sus siglas en inglés, CDC). Entre las institucio-

nes que colaboran en el proyecto se incluyen la NASA, los CDC, la EPA, la División de Protección Ambiental de Georgia, Kaiser Permanente de Georgia, el Instituto Tecnológico de Georgia y la Universidad Emory. El objetivo es mejorar el conocimiento del vínculo entre las  $\text{PS}_{2.5}$  y las enfermedades respiratorias entre los residentes del área de los cinco condados y mejorar la predicción de eventos peligrosos de  $\text{PS}_{2.5}$ , así como las respuestas gubernamentales, médicas e individuales a éstos. Esta información podría llegar a extrapolarse a otros ámbitos.

Los satélites permiten la extrapolación de los datos sobre las  $\text{PS}_{2.5}$  entre los monitores terrestres de la EPA. “Esa es la gran revolución, en verdad”, dice Haynes. “Se obtiene una representación mucho mejor de las concentraciones de  $\text{PS}_{2.5}$  sobre un área determinada”. Otro beneficio clave del estudio es que los datos detallados de salud a nivel individual proporcionados por Kaiser Permanente (un proveedor de atención médica) permiten a los investigadores evaluar con mayor precisión la función que las  $\text{PS}_{2.5}$  pueden estar desempeñando en ciertas afecciones complejas. Los investigadores de HELIX esperan publicar pronto sus hallazgos sobre los vínculos entre los datos obtenidos vía satélite y los obtenidos mediante un monitor a ras del suelo.

El proyecto relacionado HELIX-Israel sigue estando en sus fases de organización y recaudación de fondos. Niskar, actualmente miembro de la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Tel Aviv y directora de HELIX-Israel, dice que la porción del proyecto que podría utilizar datos captados por un satélite sobre los contaminantes atmosféricos es probable que inicie el año 2009. Señala que el proyecto israelí podría resultar aun más revelador que su contraparte de Atlanta debido a que los datos sobre salud pública disponibles en

Israel son de mayor calidad que los disponibles en Estados Unidos, y que la red de monitores terrestres es más densa, lo cual permite un mejor cotejo de los datos del satélite con los datos obtenidos a ras del suelo. Si el proyecto tiene éxito, dice Niskar, ella está ansiosa de ayudar a otros países a montar sistemas similares. También le gustaría incluir otros resultados para la salud, más allá de los objetivos iniciales respiratorios y cardiovasculares, así como otros contaminantes (como el ozono), una vez que la NASA y otras instancias desarrollen métodos precisos para determinar las concentraciones a ras del suelo.

Otro proyecto investigará los vínculos entre las  $\text{PS}_{2.5}$  y las consecuencias para la salud tales como derrames cerebrales, cambios en la presión arterial o en los niveles de colesterol, trombosis profunda de la vena y alteraciones de la función cognitiva. El proyecto REGARDS (Motivos de las diferencias geográficas y raciales en el derrame cerebral), un estudio multicéntrico patrocinado por el Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Derrame Cerebral, tiene ya 30 228 voluntarios inscritos en los 48 estados del sur de EU y podrá iniciar la porción de su trabajo relacionada con los satélites desde 2009 si logra obtener financiamiento de la NASA, dice Leslie McClure, profesora adjunta de bioestadística de la Universidad de Alabama en Birmingham. “Todo esto es muy de vanguardia”, comenta. “Tener la capacidad de calcular la exposición de alguien que se encuentra en las planicies de Kansas donde los monitores son escasos es un poder extraordinario.”

### Cercamiento de los gases

El rastreo de diversos contaminantes gaseosos mediante satélites también está mejorando. Una clase de estos contaminantes es la de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), generados prin-

\* Observación con Lidar para el mapeo de aerosol en las nubes y con satélite explorador de rayos infrarrojos

principalmente por los vehículos, las plantas de energía eléctrica y los procesos de combustión industrial, así como por fuentes naturales tales como los incendios forestales, los procesos anaerobios del suelo y las descargas eléctricas. Los  $\text{NO}_x$  pese a su corta vida en la atmósfera inferior, desempeñan una función clave en la formación del ozono a ras del suelo, la lluvia ácida y los gases de invernadero. El  $\text{NO}_2$ , junto con otros derivados tóxicos de las reacciones de los  $\text{NO}_x$ , puede causar problemas de salud tales como muerte prematura, cáncer y afecciones respiratorias y cardiovasculares. El  $\text{NO}_2$  es utilizado típicamente por los investigadores y por las agencias reguladoras como un sustituto de los derivados obtenidos mediante la reacción a los  $\text{NO}_x$ .

El  $\text{NO}_2$  es uno de los contaminantes más fáciles de rastrear por medio del satélite debido a su patrón espectral. "Se lo puede ver completamente hasta la superficie", dice Mark Schoeberl, científico de proyectos del satélite Aura de la NASA, el cual contiene varios instrumentos para monitorear la contaminación. Esto ha

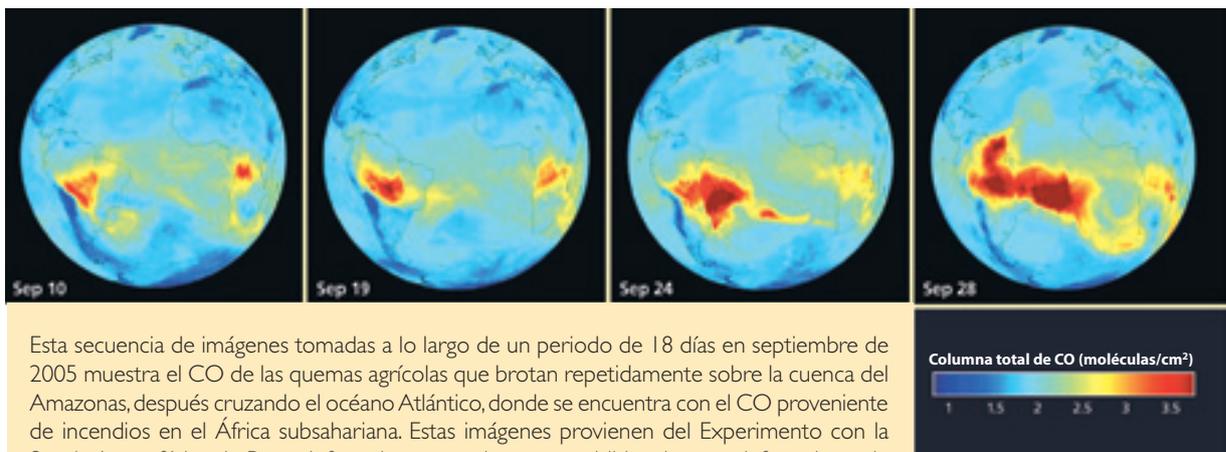
vuelto relativamente sencillo captar por medio del satélite datos exhaustivos sobre el movimiento global de este compuesto. Hay varios puntos conflictivos en los que se origina el  $\text{NO}_2$ , y este contaminante puede viajar a grandes distancias. Algunas regiones del este de China son importantes generadores de este compuesto durante todo el año, y algunas áreas de Europa, el este de Estados Unidos y el centro y el sur de África generan emisiones moderadamente altas durante buena parte del año.

En un estudio publicado en el número del *Journal of Geophysical Research* del 22 de febrero de 2008 Ronald van der A, científico jefe del proyecto del Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos y sus colegas revisaron los datos sobre el  $\text{NO}_2$  obtenidos mediante satélites desde 1996 hasta 2006 y encontraron que en algunas áreas de China se había registrado un incremento anual promedio de hasta 29 por ciento. En algunos lugares de la India, Irán, Rusia, Sudáfrica y la región central de Estados Unidos también se registraron incrementos. Sin embargo, los es-

fuerzos por reducir la contaminación pueden haber contribuido a obtener pequeñas reducciones anuales en buena parte de Europa, en algunas partes del este de los Estados Unidos y en las Filipinas.

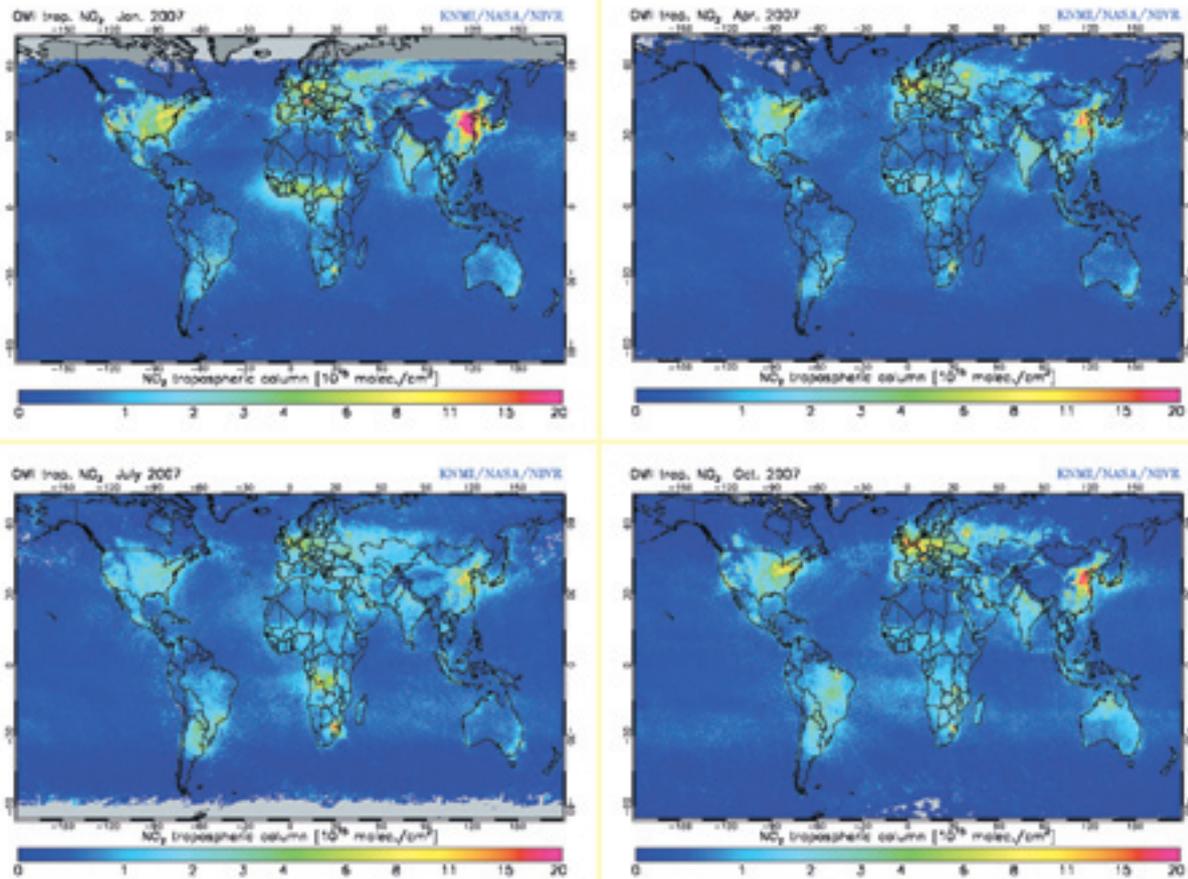
En una presentación durante el Tercer Simposio Anual del Programa Dragón en Lijiang, China, van der A y algunos colegas suyos, incluyendo a Jeroen Kuenen, reportaron que las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de China entre 1997 y 2005 contribuyeron a un incremento pequeño pero importante de los niveles de ozono a ras del suelo en todo el hemisferio norte, con un promedio de aproximadamente 0.3-0.5 ppb por volumen cuando la masa de aire llegó al oeste de Norteamérica, y de un 0.2 ppb por volumen cuando se desplazó a Groenlandia, Europa y el norte de África.

Varios estudios han detectado una marcada correlación entre las mediciones realizadas por los satélites y las concentraciones de  $\text{NO}_2$  a ras del suelo, dice Randall Martin, profesor adjunto de física y ciencias atmosféricas de la Universidad Dalhousie en



Esta secuencia de imágenes tomadas a lo largo de un periodo de 18 días en septiembre de 2005 muestra el CO de las quemas agrícolas que brotan repetidamente sobre la cuenca del Amazonas, después cruzando el océano Atlántico, donde se encuentra con el CO proveniente de incendios en el África subsahariana. Estas imágenes provienen del Experimento con la Sonda Atmosférica de Rayos Infrarrojos, cuyos detectores visibles de rayos infrarrojos y de microondas proporcionan un mapa tridimensional de la temperatura, la humedad, la cubierta de nubes, los gases de invernadero y otros fenómenos atmosféricos.

Fuente: NASA/JPL



El  $\text{NO}_2$  viaja a cientos de millas de distancia en concentraciones altas y puede viajar a miles de millas de distancia en concentraciones moderadas o bajas, como lo demuestra esta serie de imágenes del año 2007. El color rojo indica la densidad más alta y el morado la más baja de toda la columna desde la superficie hasta la parte más alta de la tropósfera. Puede haber una correlación bastante pronunciada entre las concentraciones atmosféricas y las concentraciones a ras del suelo, dependiendo de las condiciones locales.

Fuente: ESA

Halifax, Nueva Escocia. Sin embargo, agrega, es necesario contar con más estudios para cotejar los datos obtenidos mediante los satélites con los de los monitores terrestres, desarrollar mejores algoritmos y abordar mejor las variables como la ubicación geográfica, los efectos de las estaciones del año y las condiciones atmosféricas. No obstante, Martin y su colega Lok Nath Lamsal dicen que se están acercando a poder determinar con precisión las concentraciones a ras del suelo por medio de los satélites,

puesto que han desarrollado algoritmos que dan como resultado una correlación del 86% entre las mediciones de  $\text{NO}_2$  realizadas mediante un satélite y las realizadas a ras del suelo en circunstancias favorables. Su reporte de estos datos fue aceptado para su publicación en el *Journal of Geophysical Research*.

Debido a sus impactos directo e indirecto sobre la salud y el ambiente y a las propiedades espectrales que lo hacen relativamente fácil de rastrear, el CO ha sido monitoreado global-

mente durante varios años. Todos los continentes, en su totalidad o en partes, contienen importantes generadores de emisiones en una época u otra del año, y el CO transportado aumenta la carga en ciertas épocas en todos los continentes.

El CO se genera principalmente por la combustión incompleta de los carburantes. Entre las fuentes principales, especialmente en las áreas desarrolladas, se incluyen los vehículos y diversos procesos industriales. Los incendios de la vegetación naturales

y los generados por los humanos también son una fuente importante. Las concentraciones de CO que la circulación a gran distancia añade a los ambientes locales generalmente no son consideradas por sí mismas una carga adicional para la salud, dice Schoeberl; sin embargo señala que el CO es “un magnífico rastreador de las actividades humanas y de quema de biomasa.”

El CO también desempeña una función en la formación de ozono a ras del suelo. Varios estudios han encontrado que la transportación de CO desde un lugar está asociada al incremento de los niveles de ozono a ras del suelo a miles de millas de distancia. Entre los ejemplos se incluyen la circulación desde América del Norte a Europa, de Alaska y el oeste del Canadá a Houston, Texas, y de Asia al oeste de Norteamérica. El CO atmosférico también afecta a varias otras reacciones químicas en la atmósfera.

El ozono a ras del suelo se genera principalmente como producto de reacciones entre  $\text{NO}_x$ , COV y otras sustancias químicas en presencia de la luz solar. El ozono puede provocar problemas de salud tales como la muerte prematura y toda una gama de trastornos respiratorios y cardiovasculares.

Los estudios realizados durante los últimos 15 años aproximadamente que se basan en datos obtenidos de aviones, monitores terrestres y otros instrumentos han proporcionado una evidencia sustancial de que la circulación de ozono a grandes distancias puede afectar a otros países y continentes. Por ejemplo, un reporte de Arlene M. Fiore y sus colegas publicado en el número del *Journal of Geophysical Research* del 15 de agosto de 2002 señalaba que el transporte desde fuera de América del Norte puede elevar los niveles de ozono a ras del suelo en 15–35 ppb en las tardes durante el verano en Estados Unidos. En algunos lugares en ciertos

días, estas importaciones de ozono pueden provocar una elevación de los niveles en algunos condados por encima del nivel estándar de la EPA de 75 ppb.

La propagación del ozono a grandes distancias ha desempeñado un papel en el gran incremento de concentraciones de ozono en muchas áreas del planeta más o menos desde el año 1950, según Roxanne Vingarzan, científica principal del Ministerio Ambiental del Canadá. En un artículo publicado en *Atmospheric Environment* en julio de 2004, reportaba que las concentraciones de ozono alrededor del mundo más o menos se han duplicado desde entonces. A medida que los científicos se vuelven más expertos en la utilización de las imágenes de satélites para rastrear el movimiento del ozono a grandes distancias dentro de la tropósfera y hacia abajo hasta el nivel del suelo, se dispondrá de más detalles.

Pero las propiedades espectrales del ozono dificultan el aprovechamiento de los instrumentos de los satélites para rastrear las concentraciones a ras del suelo. “Desde hace ya algún tiempo hemos tenido satélites que miden la columna total de ozono”, dice Keating. El problema, explica, es que 90% del ozono está en la estratósfera, de modo que “medir el ozono en la tropósfera requiere buscar a través de la estratósfera la proverbial aguja en un pajar.”

Schoeberl dice que es probable que las soluciones a este problema estriben en lograr mejores algoritmos para analizar los datos obtenidos mediante satélites, así como en nuevos instrumentos a bordo de los satélites. Pero considera que puede pasar una década más o menos antes de que se ponga en órbita un nuevo instrumento para medir el ozono.

Por ahora, las imágenes de satélite que rastrean el ozono a una altura de unas 3 a 8 millas sugieren que el ozono está originándose en gran medida en los países desarrollados

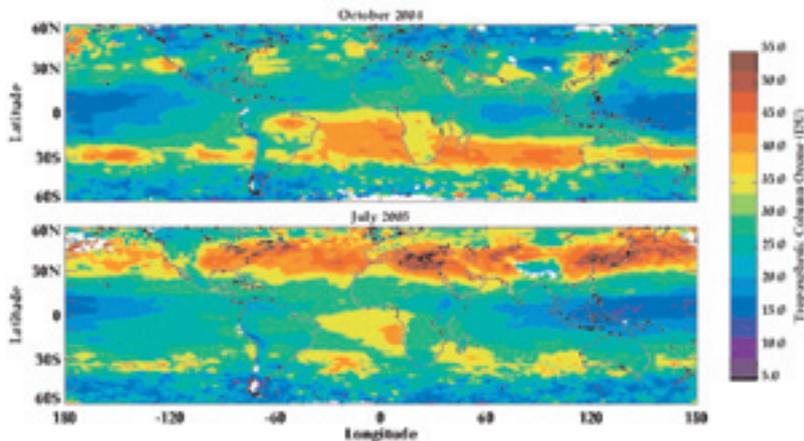
del hemisferio norte y en la quema de biomasa (algunas veces vinculada a actividades humanas tales como la agricultura) en el hemisferio sur. Las concentraciones más altas tienden a presentarse durante los meses del verano, si bien en algunas áreas –por ejemplo, en el este de China, en California y en el suroeste de África– pueden tener concentraciones elevadas en otros meses.

### Un atisbo de los escurridizos COV y $\text{SO}_2$

Los vehículos, las plantas de energía eléctrica, los procesos industriales y ciertos productos de consumo son importantes fuentes humanas de COV, y la vegetación es una importante fuente natural. La mayoría de los COV considerados importantes desde el punto de vista de la salud –por ejemplo, el benceno, el tricloroetileno y el cloroformo– tienden a tener propiedades espectrales difíciles de distinguir por medio de un satélite.

El formaldehído es el único COV importante que se detecta fácilmente mediante un satélite, dice Gunnar Schade, profesor adjunto de ciencias atmosféricas de la Universidad A&M de Texas en College Station. En general su presencia indica fuentes de hidrocarburo tales como bosques, quema de biomasa, vehículos y procesos industriales que emiten precursores del formaldehído tales como eteno, isopreno y metano.

Los bosques de caducifolios tienden a ser la fuente más grande de formaldehído detectada por los satélites, si bien también revelan puntos de concentración urbanos. El formaldehído es de vida corta en la atmósfera, pero las imágenes globales muestran una transportación modesta a gran distancia en las concentraciones bajas. Las concentraciones rastreadas por el satélite “no constituyen un motivo de preocupación para la salud”, dice Schoeberl. Sin embargo, el formaldehído y otros COV sí contribuyen a la



Estas imágenes reflejan la concentración relativa de ozono en la tropósfera media, a unas 3 a 8 millas por encima de la superficie de la Tierra. El color rojo indica las concentraciones bajas. Sigue siendo un reto extender estos datos a capas más cercanas que las encontradas aproximadamente a 1 milla por encima de la superficie; pero estas imágenes ilustran las principales fuentes y los patrones generales de movimiento del ozono, que cubre áreas de hasta miles de millas.

Pueden verse pronósticos globales experimentales de las concentraciones de ozono a nivel de la superficie en [http://gems.ecmwf.int/d/products/grg/realtime/daily\\_fields/](http://gems.ecmwf.int/d/products/grg/realtime/daily_fields/).

Fuente: NASA

formación de ozono a ras del suelo. Si bien los COV implican diversos riesgos conocidos para la salud humana, es difícil decir si las concentraciones en la atmósfera que pueden rastrearse mediante un satélite plantean esos mismos riesgos.

El  $\text{SO}_2$  se genera principalmente mediante los procesos de combustión en las plantas de energía eléctrica y en diversos procesos industriales tales como los de las fábricas de papel y de pasta de papel. Entre algunas fuentes naturales importantes se incluyen los volcanes y la quema de biomasa. Entre los efectos sobre la salud se incluyen la mortalidad prematura, problemas respiratorios múltiples, dolor de cabeza, náuseas y trastornos del sistema tiroideo.

Al igual que ocurre con los COV, es difícil rastrear el  $\text{SO}_2$  por medio de satélites debido a sus propiedades espectrales. En general sólo son visibles los sucesos importantes tales

como las erupciones volcánicas y las fuentes concentradas como las grandes áreas urbanas. Es aun más difícil traducir la contaminación atmosférica en el nivel de la superficie. “El  $\text{SO}_2$  a ras del suelo ha sido un reto”, dice Haynes, si bien los avances recientes han permitido recuperar de esos eventos importantes algo de  $\text{SO}_2$  cerca del nivel del suelo.

No parecen anunciarse avances significativos en los instrumentos de los satélites ni en los algoritmos en el panorama próximo. Sin embargo, el  $\text{SO}_2$  sigue siendo un motivo de preocupación en lo que se refiere a la circulación a gran distancia. En un artículo de Chulkyu Lee y colegas publicado en el número de *Atmospheric Environment* de marzo de 2008, un equipo de investigadores coreanos y alemanes que utilizaron datos obtenidos de satélites como una de sus herramientas concluyeron que las fuentes chinas de  $\text{SO}_2$  incrementaron

el contaminante a ras del suelo en un punto situado en Corea en mayo del 2005 hasta unas 7.8 ppb. Esa es una porción considerable del nivel estándar anual de la EPA de 30 ppb o del nivel estándar de 24 horas de 140 ppb.

### ¿La época de oro?

Los instrumentos de los satélites pueden llegar a ser cada vez más importantes para rastrear la circulación de contaminantes atmosféricos a gran distancia, llenar las lagunas de datos entre monitores, verificar los cálculos y las mediciones de las emisiones desde tierra, pronosticar la calidad del aire, alertar por anticipado a los profesionales de la atención médica y proveer información adicional para quienes se ocupan de establecer las regulaciones así como para las personas y organizaciones que están intentando cumplir con los reglamentos. Junto con la información sobre los contaminantes atmosféricos, también se está utilizando información obtenida mediante satélites para ayudar con otras cuestiones ambientales de salud importantes, tales como la propagación de enfermedades infecciosas (tal como se reflejan en los cambios en la vegetación y en la temperatura, los cuales pueden influir en las poblaciones portadoras de enfermedades), el polvo, el calor, los cambios en el uso del suelo y el cambio climático.

Con base en lo que ha visto hasta ahora, Keating dice que los satélites sencillamente podrían ser un éxito para la EPA en términos del monitoreo de la contaminación atmosférica. “Creo que existen algunas aplicaciones nacionales potenciales. Pero aún está en proceso de desarrollo.”

Parte de ese proceso incluye planes de la NASA, ESA y otras instancias para una docena de nuevos satélites en diversas etapas de concepción, planeación o diseño que incluirían instrumentos de rastreo de contaminantes atmosféricos. Estos

podrían ser lanzados en cualquier momento entre los años 2009 y 2020 y posteriores, y podrían remplazar y posiblemente mejorar la flota actual, que consta por lo menos de nueve satélites que rastrean contaminantes. Keating dice que actualmente la EPA está en pláticas con la NASA sobre las

necesidades específicas de rastreo de contaminantes.

No obstante, los conflictos de intereses y las limitaciones de financiamiento podrían obstaculizar el crecimiento del campo de observación de la Tierra, incluyendo los esfuerzos por rastrear los contaminantes. El 14

de enero de 2004 el entonces presidente estadounidense George Bush anunció “una nueva visión para el programa de exploración espacial de la Nación”, enfatizando la exploración humana y no tripulada de nuestro sistema solar. Mucho del enfoque inicial está puesto en regresar a la luna y permanecer allí durante periodos prolongados, para después viajar a Marte y finalmente a algún otro planeta. Hasta la fecha se ha presupuestado poco dinero adicional para estos proyectos, de manera que los fondos provendrán principalmente de los programas ya existentes de la NASA. “En cierta medida se está postergando la ciencia de la Tierra”, dice Schoeberl. “La NASA no está del todo segura de qué quiere hacer [dado] el nuevo enfoque de la Casa Blanca sobre Marte.”

Puesto que rutinariamente las fechas del lanzamiento de los satélites se están retrasando años y las prioridades del gobierno están cambiando, Keats considera que no se mejorará ni se incrementará la flota actual. “Ya estamos en la época de oro de la información química atmosférica”, señala. “[Pero] nos preguntamos durante cuánto tiempo estarán en operación estos satélites. Nos preocupa seriamente que pueda haber un período seco.”

*Bob Weinhold*

### Para ver más imágenes obtenidas en series cronológicas

#### **Observatorio de la Tierra de la NASA**

<http://earthobservatory.nasa.gov/Observatory/datasets.html>

Series de datos sobre contaminantes seleccionados desde el año 1978

#### **NASA Giovanni**

<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni/>

Para crear vistas personalizadas de datos de detección remota

#### **Servicio de Internet de Monitoreo de la Emisión Troposférica de la ESA**

<http://www.temis.nl>

Consulta de datos en tiempo casi real sobre contaminantes y su circulación

#### **Monitoreo Global para el Ambiente y la Seguridad**

<http://www.gse-promote.org>

<http://gems.ecmwf.int>

Pronósticos diarios globales y para Europa y archivos diarios y mensuales sobre contaminantes seleccionados

#### **Centro Mundial de Datos de Detección Remota de la Atmósfera**

<http://www.wdc.dlr.de>

Fotogramas casi reales y animaciones sobre los contaminantes