

# Beneficios del monitoreo de la composición atmosférica y del intercambio internacional de datos

por Jörg Klausen (Instituto de Meteorología de Suiza, presidente del Equipo de Expertos de la OMM/VAG sobre Gestión de Datos de la Composición Atmosférica) y Claudia Volosciuk, Oksana Tarasova y Stoyka Natcheva, Secretaría de la OMM

La composición atmosférica y los cambios que ocurren en ella tienen múltiples impactos en la vida del ser humano y en el medioambiente. Por ejemplo, el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero provoca un calentamiento global que, a su vez, intensifica los fenómenos meteorológicos extremos y conduce a la acidificación de los océanos. Los crecientes niveles de contaminación del aire constituyen una amenaza para la salud humana, los ecosistemas y la producción agrícola. Para comprender el estado del aire que respiramos, los cambios que ocurren en él, los impactos resultantes y los impulsores responsables, es indispensable llevar a cabo observaciones de la composición atmosférica y también intercambiar abiertamente esa información en todos los sectores. Es de esperar que la nueva Política Unificada de Datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ayude a ampliar y a reforzar aún más ese intercambio. El texto de la citada política se refiere, por primera vez, a los datos sobre la composición atmosférica como un campo disciplinar esencial para las actividades de la OMM y establece una política organizativa para su intercambio. Asimismo, reconoce con claridad la naturaleza simbiótica de la investigación y las operaciones, así como el beneficio mutuo del intercambio de información entre esas dos comunidades.

La Vigilancia de la Atmosfera Global (VAG) de la OMM ayuda a los Estados y Territorios Miembros a observar la composición atmosférica y a compartir la información correspondiente. Sin embargo, los datos sobre la composición atmosférica son producidos por varias organizaciones dentro y fuera de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN), entre ellas los organismos nacionales y subnacionales de protección medioambiental, el ámbito académico y el sector privado. Por lo tanto, el intercambio de información sobre la composición atmosférica tiene lugar más allá de la comunidad de la OMM, con lo que la política de datos de la Organización adquiere gran interés y relevancia para el programa de la VAG.

Para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París de limitar el calentamiento global muy por debajo de 2 °C, muchos países se han comprometido a avanzar hacia las cero emisiones netas de gases de efecto invernadero. Sin acceso a

los datos atmosféricos, ni intercambio de los mismos, no se conocería el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero desde la industrialización y no se podría monitorear el progreso futuro ni determinar las zonas críticas en cuanto a emisiones para poder actuar.

## Aplicaciones importantes de los datos sobre la composición atmosférica

Las mediciones en la atmósfera a largo plazo son importantes para fundamentar y apoyar las políticas, y para demostrar en última instancia el éxito de cualquier medida adoptada. Por ejemplo, los datos sobre la composición atmosférica a largo plazo atestiguan el comienzo de una recuperación de la capa de ozono, algo que supone una historia de éxito medioambiental. La disminución de la capa de ozono de la estratosfera fue uno de los problemas medioambientales que condujeron a la firma en 1987 del Protocolo de Montreal para reducir gradualmente las sustancias nocivas para las moléculas de ozono. El éxito de este acuerdo se pone de manifiesto a través de la recuperación medida de la capa de ozono a un ritmo de entre el 1 y el 3 % por década desde el año 2000 en las regiones de la estratosfera superior más allá de los polos (OMM, 2018a). Las mediciones de las sustancias que agotan la capa de ozono, del ozono estratosférico y de la radiación ultravioleta (UV) proporcionan evidencias observacionales para apoyar el Protocolo. Las observaciones se efectúan desde el suelo y desde el espacio utilizando diversas técnicas e instrumentos. El perfil vertical del ozono se mide utilizando una ozonosonda. En la figura 1 se muestra un ejemplo de preparación de una ozonosonda para su lanzamiento. Los análisis de las observaciones a largo plazo y de calidad controlada de los clorofluorocarbonos CFC-11 revelaron una ralentización en el descenso de la concentración atmosférica de esa sustancia a partir de 2012, que se vinculó a un incremento de las emisiones mundiales al este de Asia (Montzka y otros, 2018; OMM, 2018b).

Las concentraciones de gases de efecto invernadero también están bien documentadas a través de mediciones a largo plazo realizadas por todo el mundo. Los análisis globales



Figura 1. Observación de ozono en Ushuaia (Argentina). Las ozonosondas miden el ozono y otras variables meteorológicas a diferentes alturas a medida que la sonda asciende, hasta que el globo estalla (Fuente: Lino Condori).

de esas observaciones, presentados en el *Boletín sobre los Gases de Efecto Invernadero*, publicación anual de la OMM (véase la figura 2), muestran que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) superó en 2014 el nivel de 400 partes por millón (ppm) en todas las estaciones de la VAG del hemisferio norte. En el *Boletín* se informó, en 2016, de que en lugares remotos del hemisferio sur, como la estación mundial de la VAG en el cabo Grim, en Tasmania (Australia), también se batió esa marca. En 1989, cuando se inició el programa de la VAG, la concentración media mundial de  $\text{CO}_2$  era de 353 ppm.

Los contaminantes atmosféricos (aerosoles y gases reactivos) son responsables de la mala calidad del aire, que causa

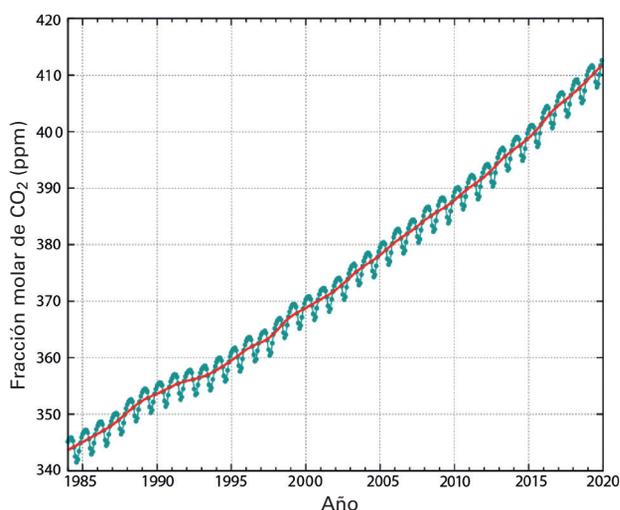


Figura 2. Fracción molar de  $\text{CO}_2$  promediada a nivel mundial. La línea roja corresponde a la media mensual sin la variación estacional; los puntos azules y la línea azul representan las medias mensuales. Para este análisis se han utilizado las observaciones de 133 estaciones. Los datos están disponibles y el análisis ha sido realizado por el Centro Mundial de Datos sobre Gases de Efecto Invernadero, operado por el Servicio Meteorológico del Japón (JMA) (Fuente: Boletín de la OMM sobre los Gases de Efecto Invernadero 16, 2020).

en todo el mundo unos siete millones de muertes prematuras cada año (OMS, 2016). Los datos sobre aerosoles y gases reactivos son importantes para determinar amenazas graves para la salud y se utilizan en las estimaciones de la carga mundial de morbilidad (Shaddick y otros, 2021). Las observaciones también se usan para supervisar el cumplimiento de las normas sobre calidad del aire y para monitorear los cambios en la abundancia de contaminantes fruto de la adopción de políticas (UNECE, 2016). El suministro de esos datos en tiempo casi real es fundamental para mejorar la exactitud de los pronósticos de los sistemas de alerta temprana y para orientar las medidas de mitigación.

Además de sus consecuencias para la salud, la contaminación atmosférica tiene un impacto considerable en la agricultura debido a la excesiva deposición de ozono y de componentes de nitrógeno y azufre. El ozono superficial es uno de los contaminantes principales que afectan a las cosechas, con pérdidas mundiales anuales en los cultivos básicos (trigo, arroz, maíz y soja) que se estiman entre el 3 y el 16 %, es decir, entre 14 000 y 26 000 millones de dólares de los Estados Unidos (Avnery y otros, 2011; Mills y otros, 2018). Los mecanismos a través de los cuales el ozono afecta a las plantas y a los cultivos se conocen bastante bien cualitativamente, pero están mal cuantificados. La figura 3 ilustra el daño a los cultivos debido al ozono.

Algunos contaminantes de vida corta también tienen impactos climáticos, por ejemplo, el ozono y los aerosoles. Entre otros efectos, contribuyen al forzamiento radiativo. Por ejemplo, los aerosoles del humo de los incendios forestales repercuten en la radiación y, de ese modo, en la predicción meteorológica (demostración en el *Boletín de la OMM sobre los Aerosoles* (OMM, 2021b)). Por lo tanto, las observaciones de los contaminantes de vida corta son de máxima importancia para incrementar la comprensión de los diferentes efectos que tienen en el sistema climático.



Figura 3. Daño en los cultivos causado por el ozono. El daño aumenta cuando la exposición al ozono se prolonga: inicialmente, el nivel de daño es pequeño (izquierda), luego los síntomas empeoran (centro y derecha) (Fuente: K. Sharps, ICP Vegetation).

## Fuentes de los datos sobre la composición atmosférica y requisitos que deben cumplir

Como se indicó anteriormente, los datos sobre la composición atmosférica se producen dentro y fuera de los SMHN. Como regla general, los organismos de protección medioambiental realizan las observaciones de los contaminantes regulados, mientras que las de alta calidad con fines de investigación, incluidas las campañas de medición por tiempo limitado, son llevadas a cabo por instituciones de investigación y universidades. Las mediciones terrestres *in situ* se complementan con mediciones aéreas *in situ* (por ejemplo, el programa Aeronave en Servicio para un Sistema de Observación Global (IAGOS)), así como por teledetección tanto terrestre como satelital. Recientemente, han surgido nuevas fuentes de datos relacionadas con la ciencia ciudadana y esa información se genera cada vez más con dispositivos sensores de bajo costo (OMM, 2021a).

Los datos de observación deben recopilarse de forma que se asegure la compatibilidad de la información procedente de diferentes fuentes, con el fin de elaborar productos coherentes a nivel mundial y entender las variaciones espaciales y temporales de la composición atmosférica. Con tal propósito, la VAG proporciona pautas de medición y herramientas de garantía y control de calidad. El resumen de datos del Centro Mundial de Datos sobre Gases de Efecto Invernadero proporciona un ejemplo de la información que puede obtenerse de esos productos coherentes. La figura 4 ilustra la evolución temporal y la distribución geográfica del CO<sub>2</sub>. Además del incremento claramente visible del CO<sub>2</sub> en el tiempo, muestra concentraciones más bajas de ese gas en el hemisferio sur, así como un ciclo estacional menos pronunciado que en el hemisferio norte debido a la menor fracción de superficie terrestre y, por tanto, a la menor cantidad de vegetación.

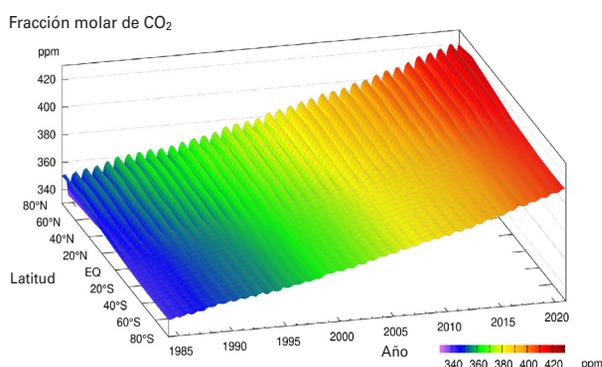


Figura 4. Variaciones medias mensuales de las fracciones molares de CO<sub>2</sub> promediadas por zonas. Las fracciones molares promediadas por zonas se han calculado para cada 20° de latitud (Fuente: Centro Mundial de Datos sobre Gases de Efecto Invernadero (JMA, 2020)).

A pesar de que la red de observaciones de la VAG está creciendo, sigue habiendo una falta de datos importante (Laj y otros, 2019), ya que en muchas partes del mundo no hay infraestructuras de observación. Por razones políticas, comerciales e institucionales, así como debido a la falta de capacidad, también ocurre que algunas observaciones no se comparten con la comunidad internacional. La figura 5 muestra la limitada disponibilidad de mediciones mediante una comparación entre el reanálisis y las observaciones de ozono de la VAG. Se ha realizado un gran esfuerzo en el marco del Informe de Evaluación del Ozono Estratosférico para recopilar todos los datos disponibles con el fin de realizar una evaluación global de varias métricas dirigidas a diferentes comunidades de usuarios (Lewis, 2017), lo que supone un paso importante para incrementar la disponibilidad de información, incluso aunque los datos brutos no se pongan a disposición de los usuarios. Ello deja entrever la gran cantidad de información que no se está utilizando plenamente.

Si la disponibilidad de información representa un desafío, la calidad de los datos de observación también. Algunas observaciones llegan sin ninguna información sobre calidad asociada, lo cual impide su completa utilización. Las necesidades en materia de observaciones vienen determinadas por la calidad de los servicios y productos finales que se basan en ellas, y se aplican no solo a la calidad de las propias observaciones, sino también a la oportunidad con la que están disponibles. Las necesidades en cuanto a datos sobre la composición atmosférica se definen según tres ámbitos de aplicación previstos dentro del amplio proceso de examen continuo de las necesidades de la OMM y se incluyen en otras aplicaciones. Por ejemplo, el monitoreo de la composición atmosférica abarca aplicaciones relacionadas con la evaluación de las distribuciones y el análisis de los cambios en su composición (espacial y temporal) a escala regional y mundial. Estas aplicaciones demandan

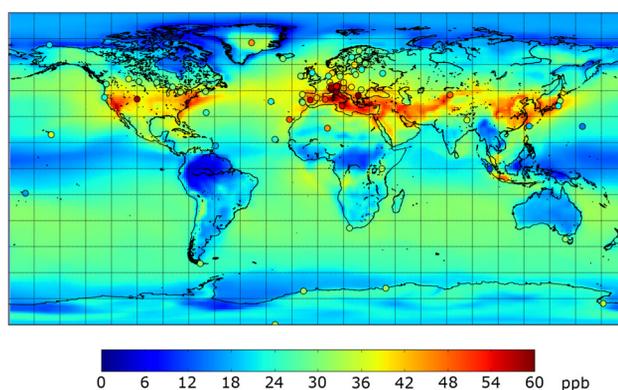


Figura 5. Distribución mundial de las concentraciones de ozono cerca de la superficie medidas por la red de estaciones de la VAG (2000-2009) superpuestas a las concentraciones de ozono simuladas por el modelo de reanálisis Monitoreo de la Composición Atmosférica y el Clima (2003-2010). Media mensual de julio (Fuente: Informe de la VAG núm. 209 (OMM, 2013)).

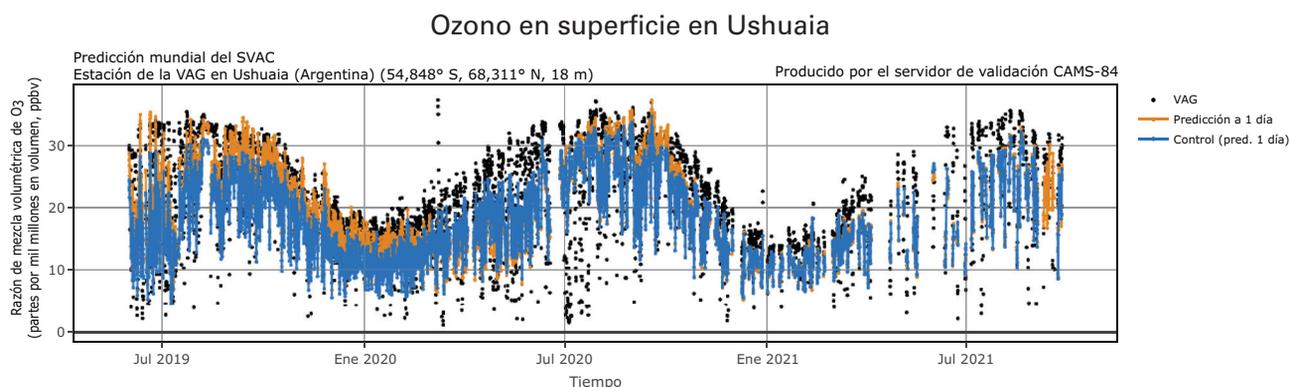


Figura 6. Validación en tiempo casi real del pronóstico de ozono en superficie del Servicio de Vigilancia Atmosférica de Copernicus (SVAC) con datos de la estación de la VAG de Ushuaia (Argentina). El SVAC utiliza datos de ozono de 15 estaciones de la VAG para la validación en tiempo casi real (Eskes y otros, 2021) (Fuente: Evaluación de predicciones mundiales del SVAC del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF)).

niveles de incertidumbre muy bajos y una buena cobertura de datos a nivel mundial o regional, mientras que el requisito de oportunidad de la información intercambiada puede relajarse bastante para asegurar una mayor calidad de las observaciones.

Por el contrario, la predicción del cambio en la composición atmosférica y sus impactos en el medioambiente incluye aplicaciones que van desde la escala mundial a la regional con resoluciones horizontales similares a la predicción numérica del tiempo mundial (aproximadamente 10 km o más) y requisitos de oportunidad estrictos (en tiempo casi real). La incertidumbre de las observaciones intercambiadas para este propósito puede ser mayor que la de las observaciones para fines de monitoreo. Este tipo de aplicaciones facilita, por ejemplo, la emisión de avisos de tormentas de arena y polvo, las predicciones de bruma o niebla, así como las predicciones meteorológicas de la composición química de la atmósfera. En la figura 6 se muestra un ejemplo de validación de una predicción en tiempo casi real. Las aplicaciones urbanas, dirigidas a las megalópolis y a los grandes complejos urbanos, deben cumplir un conjunto muy específico de requisitos en términos de incertidumbre, oportunidad, representación espacial y densidad. Estas aplicaciones necesitan resoluciones horizontales de pocos kilómetros o menos y, en algunos casos, tienen estrictos requisitos de oportunidad en cuanto a la disponibilidad de los datos. Un rasgo distintivo de este tipo de aplicaciones es su énfasis en la investigación en apoyo de los servicios operativos, como la predicción de la calidad del aire, que utiliza enfoques como los proyectos piloto y las pruebas de viabilidad. Además de las áreas mencionadas, muchas otras aplicaciones se benefician indirectamente de la información sobre la composición atmosférica. Por ejemplo, los datos sobre la composición atmosférica mejoran la estimación del forzamiento radiativo en la predicción numérica del tiempo y en las proyecciones climáticas (véase OMM, 2021b).

## Gestión e intercambio de datos sobre la composición atmosférica

El método para el intercambio de información sobre la composición atmosférica depende en gran medida de dos factores: el organismo que produce los datos y la normativa nacional por la que se rige su intercambio. Las observaciones realizadas por las instituciones gubernamentales que utilizan financiación pública son con frecuencia objeto de políticas de datos abiertos donde la información está disponible de forma gratuita en los portales de las administraciones públicas. Aquí se incluyen los datos sobre contaminación para el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales en materia de calidad del aire que entrañan la obligación de hacer pública la información.

Para la comunidad científica, los datos constituyen propiedad intelectual y en la mayoría de los casos solo se encuentran disponibles después de haber sido publicados en artículos pertinentes, lo cual puede suceder mucho tiempo después de que se tomaran las mediciones. Esa información suele ser recopilada por universidades, institutos de investigación y otros organismos durante períodos de tiempo limitados. En general, esos datos contribuyen a la labor de la comunidad operativa de la OMM, aunque en muchos casos ese no es el objetivo principal de su recopilación. Habitualmente, la comunidad especializada en los datos sobre la contaminación atmosférica ha adoptado los denominados principios FAIR (facilidad de localización, accesibilidad, interoperabilidad y reutilización) para intercambiarlos. Sin embargo, estos principios no promueven claramente el acceso abierto y sin restricciones, y si fuera necesario, tales cuestiones deberían formularse explícitamente: los datos deben ser, al mismo tiempo, técnicamente abiertos (es decir, disponibles en un formato normalizado y legible para ser procesados por una aplicación informática) y jurídicamente abiertos (con licencia explícita para

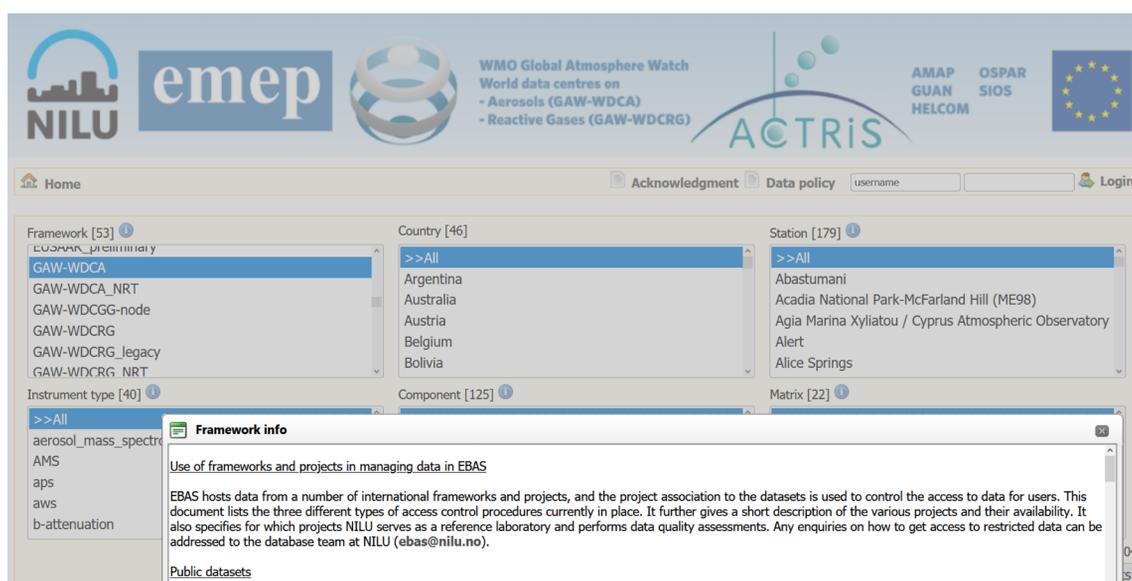


Figura 7. Los portales de metadatos OSCAR/Superficie y GAW/SIS, patrocinados por la OMM, tienen en cuenta las múltiples asociaciones con los programas y redes de observación. El Instituto Noruego de Investigación Atmosférica (NILU) implementa un concepto similar. Entre los múltiples sistemas, el instituto NILU alberga los Centros Mundiales de Datos sobre Aerosoles y Gases Reactivos de la VAG. Los datos pueden afiliarse a varios sistemas para evitar las transmisiones múltiples (Fuente: NILU).

permitir el uso comercial y no comercial y la reutilización sin restricciones).

Los datos de investigación normalmente se guardan en almacenes de datos o en archivos en la nube. Dado que una misma infraestructura investigadora está afiliada a múltiples proyectos, iniciativas y programas, la duplicidad de información en los diferentes repositorios representa un problema muy serio que la comunidad está analizando actualmente. Los almacenes de metadatos que permiten afiliaciones de datos a varios proyectos y redes están considerados como una de las soluciones posibles para evitar las transmisiones múltiples (figura 7). El mantenimiento de estos repositorios de información representa un desafío en términos de financiación y gestión debido al gran incremento en la cantidad de datos. También se han implantado de forma generalizada los identificadores de objetos digitales (DOI), que facilitan la transparencia, la trazabilidad y la asignación, especialmente entre las comunidades

operativas, de investigación y de aplicaciones. Los nuevos avances tecnológicos relacionados con la negociación de licencias de datos que reconocen el origen y la propiedad de los mismos ayudarán a los investigadores a compartirlos con la mayor libertad posible. Se admite que las restricciones y las licencias personalizadas pueden dar lugar a un complicado “apilamiento” de estas últimas.

El acceso a los datos comerciales y a la ciencia ciudadana se encuentra mucho menos estructurado e incluso puede estar restringido por suscripción. Los proyectos de ciencia ciudadana suelen tener sitios web específicos. Sin embargo, con frecuencia se distingue entre compartir los datos brutos y la información procesada (productos, gráficos); esta última, generalmente, se comparte de una forma mucho más abierta que los datos brutos. Efectivamente, eso puede limitar el potencial para el análisis de la calidad implícita de la información sin procesar.

Centros mundiales de datos dedicados a temas específicos recopilan la información procedente de las estaciones de observación de la VAG, controlan su calidad y la publican. También hay una serie de centros de datos colaboradores que proporcionan la información procedente de las redes colaboradoras. Los metadatos están disponibles en el Sistema de Información de las Estaciones de la VAG (GAW/SIS) que forma parte de la Herramienta de Análisis y Examen de la Capacidad de los Sistemas de Observación en Superficie (OSCAR)/Superficie. Estos centros de datos han trabajado en la armonización de los procedimientos de presentación y acceso a la información, y proseguirán con esos esfuerzos en el marco de la visión conjunta de un sistema federado de gestión de datos del programa de la VAG que permita

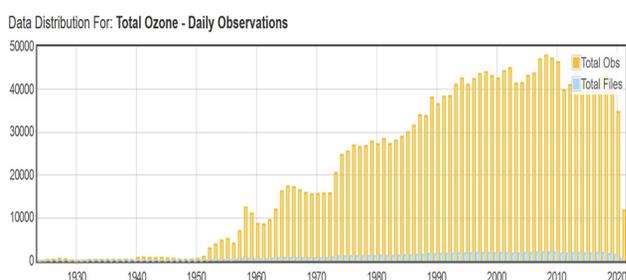


Figura 8. Información sobre datos disponibles en el sitio web de búsqueda y descarga de datos del Centro Mundial de Datos sobre el Ozono y la Radiación Ultravioleta (Fuente: WUODC).

un acceso totalmente interoperable a toda la información procedente del citado programa. En la figura 8 se ilustra un ejemplo de información sobre los datos disponibles en el Centro Mundial de Datos sobre el Ozono y la Radiación Ultravioleta. La VAG seguirá actuando de enlace con otros actores pertinentes (redes de investigación y colaboradoras, y organismos espaciales y medioambientales, entre otros) para armonizar los formatos de los datos y los metadatos y, así, facilitar el uso de los datos de la VAG y de otras fuentes en diversas aplicaciones (OMM, 2017).

El registro y la atribución son dos condiciones que no restringen el acceso y la reutilización, pero que pueden ser cruciales para motivar a la comunidad investigadora a compartir su información. Sin citas o evidencias documentadas de uso, es difícil que la comunidad investigadora pueda demostrar ante sus organismos de financiación el valor de los datos que crea. Los derechos de propiedad intelectual pueden asegurarse mediante la concesión de licencias de datos, que determinarán los derechos de utilización y velarán por la seguridad jurídica de los usuarios. En los casos del ámbito académico y el sector privado, ello les permitirá diseñar ejemplos de uso viables y modelos de negocio basados en derechos de uso concretos.

## Beneficios de la Política Unificada de Datos de la OMM

La aplicación generalizada de la Política Unificada de Datos de la OMM es fundamental para la prestación satisfactoria de múltiples servicios relacionados con la composición atmosférica. De manera similar a otros casos descritos en los artículos 2 y 9), la mejora de la predicción oportuna de los fenómenos extremos y el apoyo a la política medioambiental requieren un intercambio abierto de datos a nivel internacional. La aplicación de la Política Unificada de Datos puede facilitar avances para múltiples aplicaciones, que van desde la mejora de las previsiones de la calidad del aire hasta el apoyo a los mecanismos de transparencia formulados al amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Para utilizar con eficacia los datos en aplicaciones específicas, se necesita conocer la calidad de los mismos. La evaluación minuciosa de la incertidumbre de los datos proporciona valiosa información adicional sobre su utilidad en determinados servicios. Disponer de la información de forma casi inmediata es importante en aplicaciones tales como las predicciones y los avisos, que deben emitirse de forma oportuna. En otros ámbitos de aplicación, como el reanálisis y el análisis de tendencias, la oportunidad en el intercambio de datos no es tan importante.

La adopción de esta política por parte de múltiples organizaciones pertenecientes a los Miembros, más allá de los SMHN, garantizará que los avances en materia de servicios y políticas medioambientales se apliquen de forma mundial y eficaz en función de los costos.

Es necesario mejorar el intercambio de información entre la comunidad operativa de la OMM y la comunidad científica. Los proyectos de investigación suelen requerir el acceso a datos y servicios medioambientales externos, entre ellos la información de predicción y los registros de datos de observación, por lo que existe una interdependencia inherente entre la investigación y las operaciones. Puede que la comunidad investigadora no tenga acceso a los datos operativos (observaciones y salidas de los modelos) ni a los formatos de los datos, o no pueda influir en ellos, lo que dificulta su interoperabilidad, su interpretación y el progreso científico. Será conveniente armonizar los protocolos de intercambio de datos. La OMM puede ofrecer a la comunidad científica unas directrices en cuanto a protocolos de intercambio de información (Norma sobre Metadatos del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM (WIGOS) e infraestructura del Sistema de Información de la OMM (WIS)) para optimizar el valor de los datos de investigación, aunque los claros beneficios de esta propuesta tienen que ser expuestos a la comunidad investigadora. A su vez, la OMM debería facilitar el acceso de los datos operativos a una comunidad más amplia, haciendo hincapié en el beneficio mutuo del intercambio de información para ambas comunidades, la académica y la operativa, con el fin de avanzar en la comprensión y el conocimiento común del sistema Tierra.

La política actual de la OMM es muy reconocida en el ámbito de la comunidad científica, pero este colectivo demanda una orientación clara sobre las licencias, así como definiciones más precisas de los términos “datos fundamentales” y “datos recomendados”. Es probable que la concesión de licencias sea un factor de éxito decisivo para facilitar el intercambio de información entre los Miembros de la OMM más allá de la comunidad tradicional de los SMHN. La normalización de las licencias para los datos de la OMM podría contribuir de forma significativa a la adopción de la Política Unificada de Datos de la OMM. La armonización de la política de datos de la OMM con las licencias actuales (como las de Creative Commons, ampliamente utilizadas en la comunidad científica) ayudaría a garantizar la aceptación en el mundo académico y en el sector privado, y evitaría obstáculos prácticos para los usuarios.

Independientemente de las necesidades de una determinada aplicación en materia de oportunidad o exactitud de los datos, el hecho de que los datos estén disponibles para todos es una exigencia común. La OMM está bien posicionada para aprovechar la experiencia adquirida en su larga trayectoria de intercambio de información operativa y ampliarla también a los datos sobre la composición atmosférica.

Las referencias están disponibles en la versión en línea