

- JIN, H., L. SHUXUN, C. GUODONG, W. SHAOLING y X. LI, 2000: Permafrost and climatic change in China, *Global and Planetary Change*, 26, 387-404.
- KOHL, T. y St. GRUBER (en imprenta): Evidence of paleotemperature signals in mountain permafrost areas. 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Suiza: Extended Abstracts on New Information and Current Research. (W. Haeberli y D. Brandová (Eds.)).
- LACHENBRUCH, A.H. y B.V. MARSHALL, 1986: Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234, 689-696.
- LACHENBRUCH, A.H., T.T. CLADOUHOS y R.W. SALTUS, 1988: Permafrost temperature and the changing climate. *Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost*, Tapir, Trondheim, Vol. 3, 9-17.
- LACHENBRUCH, A.H. y B.V. MARSHALL, 1986: Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234, 689-696.
- NELSON, F.E., O.E. ANISIMOV y O.I. SHIKLOMANOV, 2001: Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 410, 889-890.
- VONDER MÜHLL, D., 2001: Thermal variations of mountain permafrost: An example of measurements since 1987 in the Swiss Alps. *Global Change in Protected Areas*, editado por G. Visconti, M. Beniston, E. D. Iannorelli, D. Barba, 83-95, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- VONDER MÜHLL, D., T. STUCKI y W. HAEBERLI, 1998: Borehole temperatures in alpine permafrost: a ten year series. *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost*, editado por A. G. Lewkowicz y M. Allard, 1089-1095, Collection Nordicana, 57, Québec.
- VONDER MÜHLL, D., C. HAUCK, H. GUBLER, R. McDONALD y N. RUSSELL, 2001: New geophysical methods of investigating the nature and distribution of mountain permafrost with special reference to radiometry techniques. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 27-38.

## Estudio de los centros de predicción de ciclones tropicales: usos y necesidades de datos de satélite

Por Russell L. ELSBERRY\* y Chris VELDEN\*\*

### Introducción

La sesión principal del quinto Cursillo Internacional sobre Ciclones Tropicales (IWTC-V) se ocupó de los usos actuales, los productos inminentes y las oportunidades futuras para utilizar datos de satélite para la predicción y la investigación de ciclones tropicales. Era el quinto de una serie de cursillos patrocinados por la OMM que reúnen a predictores e investigadores de ciclones tropicales cada cuatro años. Los objetivos principales son evaluar el progreso realizado durante los cuatro años anteriores y planificar el futuro. Debido a la importancia de los datos de satélite para la predicción de ciclones tropicales y a un incremento enorme e inminente de las corrientes de datos de satélite, era natural que los satélites fueran el tema de la sesión principal, que estuvo organizada principalmente por Chris Velden, del Instituto de Cooperación para Estudios Meteorológicos por Satélite de la Universidad de Wisconsin (UW-CIMSS).

La primera parte de la sesión principal regional de ciclones tropicales de la OMM consistió en cinco charlas invitadas a cargo de predictores de ciclones tropicales que proporcionaron los antecedentes de los usos actuales de los datos de satélites. Como estas charlas venían principalmente de centros regionales de ciclones tropicales de la OMM, podrían clasificarse como relativamente bien provistas en términos de observaciones y productos de satélites. En algunos centros, se daba el problema de que tenían más datos de satélites de los que sus sistemas de proceso y visualización podían ofrecer de forma oportuna y cómoda para el predictor para que extrajera los beneficios óptimos!

Se sabía desde el principio que los centros a los que representaban las cinco charlas invitadas no eran representativos de los usos y necesidades mundiales de los datos de satélite. Sin embargo, los aproximadamente 45 participantes predictores en el IWTC-V representaban a 36 centros de aviso. La mayor parte de estos predictores fueron seleccionados para representar a los cinco organismos regionales de ciclones tropicales de la OMM y fueron financiados por la OMM. Así que se decidió preparar un estudio para explorar cómo utilizaban los datos de satélite estos 36 centros de avi-

\* Escuela Naval de Postgrado, Monterrey, California

\*\* Instituto de Cooperación para Estudios Meteorológicos por Satélite, Madison, Wisconsin

*Aprovechando la presencia de representantes de 36 centros de predicción de ciclones tropicales en el quinto Cursillo Internacional sobre Ciclones Tropicales (IWTC-V), se realizó un estudio para documentar los usos actuales de datos de satélite en el proceso de predicción. A los centros que no tenían acceso, se les pedía información sobre lo que sería necesario para que tuvieran acceso a los datos y los utilizaran. Debido al gran aumento en la utilización de sitios Web para acceder a datos de satélite, se pidieron el grado de acceso y cualquier preocupación o problema relativo al acceso a Internet. Basándonos en las discusiones del IWTC-V, la formación profesional es un tema importante en casi todos los centros. Por ello, en una sección del estudio se incluyeron las necesidades de formación profesional y las características deseables de la formación profesional en el uso de datos de satélite.*

so. Después de escuchar las cinco charlas invitadas, también se pidió a estos predictores que identificaran las deficiencias en su adquisición de datos de satélite y lo que haría falta para que tuvieran acceso a los datos de satélite actuales y para que los usaran.

Un importante avance en los cuatro últimos años ha sido la disponibilidad en sitios Web de imágenes de satélite y datos digitales en tiempo real georreferenciados a la posición de los ciclones tropicales. Dos de los sitios Web más famosos de los EE.UU. son el del UW-CIMSS y el del Laboratorio de Investigación Naval de Monterrey (NRL). Ahora es evidente que muchos centros de aviso de ciclones tropicales acceden de forma rutinaria a estos sitios Web. Así, una segunda parte del estudio exploró el grado de adquisición de datos de satélite de los sitios Web entre los centros, y qué productos eran más útiles. Otra cuestión exploró los posibles problemas o preocupaciones de los centros sobre su dependencia de la información de dichos sitios Web sobre los que no tienen ningún control.

Otro tema clave para la mayoría de los centros de predicción representados en el IWTC-V era la necesidad de formación profesional y esto es especialmente cierto para los productos nuevos de satélite. La tercera parte del estudio exploró las necesidades de formación profesional de los centros de aviso. Se dispone de distintas opciones (locales, nacionales e internacionales). Algunos temas relacionados con la formación profesional incluyen el coste (en tiempo y en dinero) de que el profesor vaya a las distintas localidades o de que los alumnos vayan a un lugar central de formación profesional.

## Respuestas del estudio a la disponibilidad de datos de satélite

En la tabla de abajo se listan los centros de aviso que completaron el estudio. De 36 estudios distribuidos, lo devolvieron un total de 31 centros. Australia, China y los EE.UU. tienen múltiples centros de aviso de ciclones tropicales. La representante de Barbados indicó que sus respuestas al estudio eran, probablemente, características de otras oficinas de predicción caribeñas: Antigua, Jamaica, Santa Lucía, Granada, Trinidad y Tobago y Guyana. El aporte del centro de Taiwán se recibió a través de un participante de la Asociación de Ciencia del Pacífico.

### Centros de aviso de ciclones tropicales que respondieron al estudio del IWTC-V

Australia Brisbane Darwin Perth	Francia La Reunión	Filipinas
Bangladesh Barbados (representa al Caribe oriental)	Hong Kong Japón	Islas Salomón Sri Lanka
Canadá China Pekín Guangzhou	Corea Macao	Taiwán* Tailandia
Islas Cook	Madagascar	EE.UU. Guam JTWC Miami
Costa Rica Cuba Fiji	México Nueva Zelanda Pakistán	Vanuatu Vietnam

\* Información recibida a través de la Asociación de Ciencia del Pacífico

275

## Imágenes básicas geoestacionarias

La primera cuestión exploraba la disponibilidad de imágenes visibles, infrarrojas (IR) y de vapor de agua de un satélite meteorológico geoestacionario adecuado. Tales imágenes (véase el ejemplo de la Figura 1) son esenciales para la situación de los ciclones tropicales, el análisis de su estructura, la ciclogénesis y las evaluaciones sinópticas en el entorno del ciclón tropical. Un resultado satisfactorio es que todos los centros informaron de que tenían acceso a las imágenes geoestacionarias, aunque algunos centros pequeños indicaron que las imágenes eran de menor resolución que la deseable.

El estudio exploró también la adquisición y el uso de la Técnica Objetiva de Dvorak (ODT) para estimar la intensidad de los ciclones tropicales. Esta técnica, que fue desarrollada por el UW-CIMSS y por el Instituto de Cooperación para la Investigación de la Atmósfera

(CIRA), trabaja con datos IR para ciclones bien desarrollados. Dos centros de China y Cuba indicaron que tenían un sistema realizado localmente similar a la ODT. Aunque la ODT está disponible desde 1998, sólo nueve centros indicaron haber utilizado la ODT o la versión nacional. Tres centros de aviso indicaron que tenían la técnica y que estarían más interesados en la ODT si fuera más precisa para los ciclones tropicales débiles. En una sesión especial de discusión del IWTC-V se presentaron una ODT Avanzada (AODT) y una técnica de regresión lineal de variable múltiple que está desarrollando el UW-CIMSS. La AODT se está probando en el Centro Nacional de Huracanes y Centro Conjunto de Avisos de Tifones de los EE.UU. y ofrece, específicamente, estimaciones de intensidad para las etapas de tormenta tropical y de depresión tropical. Si la AODT y la técnica de regresión funcionan bien en la prueba previa a estar operativas, complementarían las estimaciones de intensidad manual de tipo Dvorak que usan casi todos los centros. Incluso los centros de aviso pequeños con ordenadores de tipo PC podrían aplicar estas dos técnicas.

#### Imágenes de satélites de órbita polar

Casi todos los centros de aviso (29 de 31) tienen acceso a las imágenes estándar visibles, IR y de vapor de agua de los satélites de órbita polar. Como podría esperarse, los centros de los países desarrollados tienen receptores para recibir directamente los datos del satélite. Lo que podría no esperarse es que varios países más pequeños (Bangladesh, Fiji, Madagascar y Sri Lanka) tengan también sus propios receptores para adquisición directa. El resto de los centros de aviso reciben los datos de los satélites de órbita polar a través de un acceso a Internet y las dos respuestas negativas provinieron de centros que no conocían los sitios Web. Seis centros indicaron que tenían los datos pero que no los utilizaban, sobre todo debido a la disponibilidad de imágenes geoestacionarias de mayor resolución temporal. La falta de formación profesional fue una de las razones que se dio para no utilizar estas imágenes. Otras razones citadas incluyen que las imágenes no llegan a tiempo (¿por problemas de comunicación?) y que eran irregulares. Por lo tanto, parece que se usan los datos de órbita polar, aunque en muchos casos como suplemento de las imágenes geoestacionarias.

#### Imágenes y sondeos de microondas

Se exploró la disponibilidad de imágenes de microondas (véase el ejemplo de la Figura 1) y de sondeos de microondas (p. ej., la Unidad de Sondeo Avanzado de Microondas (AMSU)) en dos preguntas, pero aquí están combinadas ya que las respuestas eran, por lo general, comunes. Mientras que 21 de los 31 centros indicaron que tenían acceso, ocho centros indicaron que la infor-

mación de microondas no se utilizaba. Como razón principal para no utilizarla se citó la falta de formación profesional. Sin embargo, muchos centros están empezando a tomar conciencia de las ventajas de las imágenes de microondas para detectar el centro de los ciclones tropicales durante las fases tempranas cuando están oscurecidos por la capa de cirros. El interés de los participantes en el IWTC-V en las observaciones de microondas y su interpretación fue demostrado por su asistencia a una sesión especial de discusión voluntaria sobre este asunto. El acceso a las imágenes de microondas georreferenciadas al centro de los ciclones tropicales en el sitio Web del NRL de Monterrey parece ser uno de los usos más populares de Internet. Considerando que este sitio Web experimental no está disponible siempre debido a problemas de mantenimiento durante el fin de semana, un sitio Web público con mantenimiento completo (24 horas, siete días) en el Centro de Meteorología Numérica y Oceanografía de la Armada de Monterrey, California, eliminaría estos problemas de corte. Las imágenes de microondas también son útiles para estimar la precipitación, aunque sólo han aprovechado este aspecto unos pocos centros de aviso. Un producto nuevo de la División de Investigación de Huracanes de los EE.UU. que puede incrementar el uso es un asistente de climatología y persistencia del índice de lluvia (R-CLIPER) dependiente de la intensidad para los ciclones tropicales. El R-CLIPER servirá también como medida técnica para otras técnicas de predicción de la precipitación de los ciclones tropicales.

Durante dos décadas se han intentado utilizar datos de sondeo de microondas desde satélites para detectar el núcleo cálido del ciclón tropical y para inferir la (intensidad) presión central mínima correspondiente. La nueva AMSU resulta más prometedora para lograr este objetivo debido a su mejor resolución horizontal (~ 25 km en el nadir). Tanto la presentación central como una sesión especial de discusión en el IWTC-V aumentaron la conciencia de las inminentes capacidades y procedimientos de proceso asociados a la AMSU. En este momento se están probando, al menos, tres algoritmos que relacionan los datos de la AMSU con la intensidad de los ciclones tropicales. Muchos predictores indicaron que esta era la primera vez que estaban en contacto con la AMSU y con otros productos de satélite inminentes. Por lo tanto, el estudio reveló que a muchos centros de aviso les gustaría tener acceso inmediato a (y formación profesional sobre) las estimaciones de intensidad basadas en la AMSU.

#### Radar de precipitación de la TRMM

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) tiene un radar de precipitación (RP) activo (además del instrumento pasivo de microondas (TMI)). Este

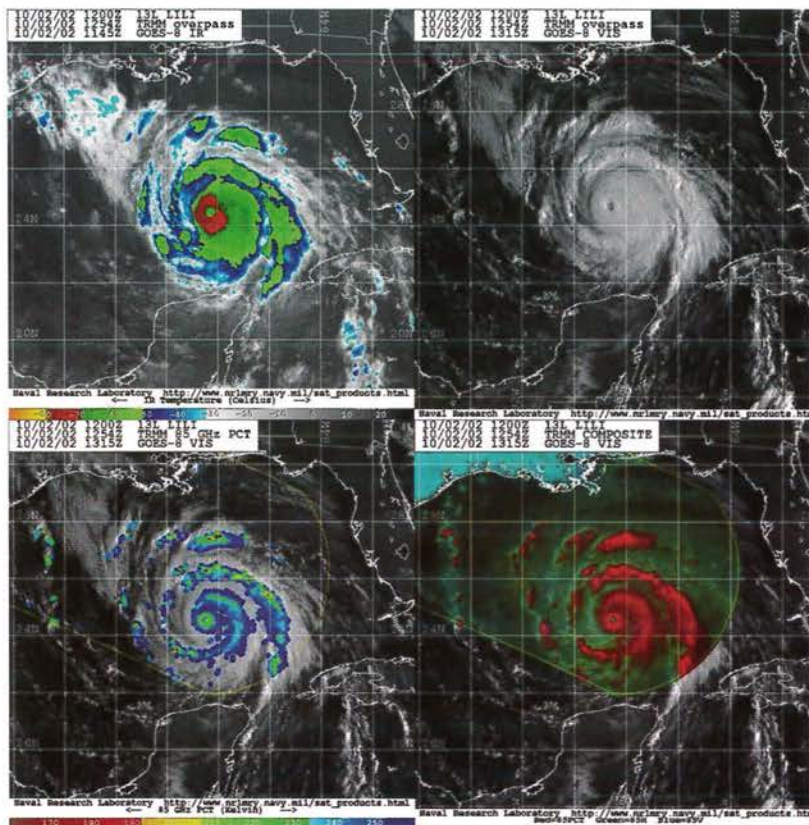


Figura 1 — Ejemplo de imágenes infrarrojas (cuadrado superior izquierdo) geostacionarias (GOES-8) e imágenes visibles (cuadrado superior derecho) del huracán Lili a las 12:45 UTC del 2 de octubre de 2002 e imágenes de microondas (paneles inferiores) de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) a las 12:54 UTC del 2 de octubre, descargadas del sitio Web público del Laboratorio de Investigación Naval de Monterrey ([http://www.nlmry.navy.mil/sat-bin/tc\\_home](http://www.nlmry.navy.mil/sat-bin/tc_home))

instrumento estaba pensado sólo para totales mensuales de precipitación, así que ha hecho falta algo de esfuerzo y de tiempo para el suministro de datos de RP en tiempo casi real. El RP ofrece índices de lluvia en niveles múltiples con una gran resolución horizontal. Sus inconvenientes son su banda estrecha de barrido y que se pierde el ciclón tropical en muchas órbitas, debido a que va a bordo de un satélite de órbita polar. Sólo ocho centros de aviso indicaron acceso en tiempo real a los datos de RP y/o su uso en el proceso de predicción. Donde se disponía de él, se usaba principalmente para estimar la distribución de precipitación relativa al centro del ciclón tropical a medida que se acerca a tierra. Once centros indicaron que tenían acceso, pero que no utilizaban el producto. Aunque esto puede deberse a la falta de oportunidad y a la cobertura limitada de los ciclones tropicales, varios centros indicaron que hacía falta formación profesional. Doce centros indicaron que no tenían acceso.

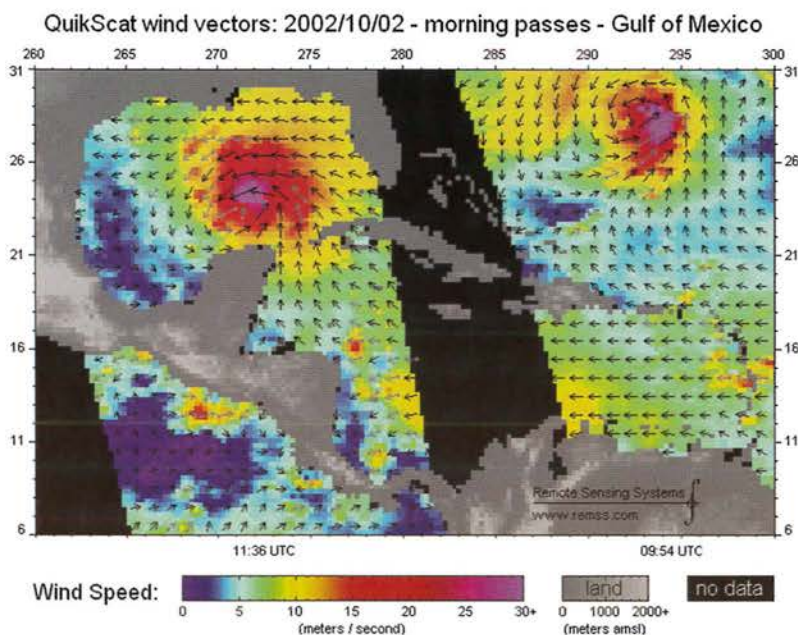
#### Datos de dispersómetro

Aunque las estimaciones basadas en dispersómetros de los vectores de viento en superficie han estado dispo-

nibles desde los satélites de corta vida SEASAT y NSCAT, y desde los Satélites Europeos de Investigación (ERS-1 y ERS-2), la aplicabilidad cerca de ciclones tropicales ha sido limitada. La mayor banda de barrido del Quikscat, disponible en la actualidad, ha originado que se intercepten muchos más ciclones tropicales (véase el ejemplo de la Figura 2). Estos datos de Quikscat están disponibles en el sitio Web de NOAA/NESDIS, con base en los EE.UU. Las dos conferencias principales y una sesión de discusión especial del IWTC-V sobre los datos de Quikscat y su interpretación generaron un gran interés entre los predictores. En muchos casos de formaciones de ciclones tropicales en zonas oceánicas remotas, Quikscat ofrece la primera evidencia del centro

de circulación del viento de superficie y esto posibilita a veces importantes relocalaciones del centro. Las distribuciones del viento de superficie de Quikscat también han mejorado el análisis de la estructura del vórtice exterior (p. ej., radio de viento de 35 kt), que es útil para estimar la generación de olas en la superficie del océano y los cambios en la estructura del viento durante la transición extratropical de un ciclón tropical. Se han expresado distintas opiniones en cuanto a cuáles son las velocidades máximas del viento en un ciclón tropical que pueden ser medidas de forma fiable por Quikscat. También surgen preguntas referentes a la manera de interpretar las estimaciones de viento debilitadas por la lluvia y de las distintas soluciones a la ambigüedad de la dirección del viento.

Veinticinco de los 31 centros de aviso que respondieron al estudio indicaron haber adquirido datos de Quikscat y que éstos eran una fuente importante de datos para sus análisis de viento de ciclones tropicales (y para análisis de viento marítimo general). De los seis centros restantes, casi todos indicaron su deseo de obtener acceso a datos de Quikscat y la necesidad de



278 *Figura 2 — Vectores de viento de Quikscat (véase el indicador de velocidad debajo de la imagen con los vientos máximos superando los 30 m s<sup>-1</sup>) descargados del sitio Web de Sistemas de Teledetección ([http://www.ssmi.com/qscat/scatterometer\\_data\\_daily.html](http://www.ssmi.com/qscat/scatterometer_data_daily.html)) para el huracán Lili la mañana del 2 de octubre correspondiente a las imágenes de la Figura 1*

formación profesional en su interpretación. Debido a la preocupación porque los satélites futuros puedan no llevar dispersómetros, una recomendación del IWTC-V fue que se exploraran todas las opciones para continuar extendiendo los datos de dispersómetros dada su aplicabilidad para la posición de los ciclones tropicales y el análisis de su estructura.

### Radar altímetro

La conferencia del IWTC-V sobre las influencias del sistema aire-mar sobre el cambio de estructura de los ciclones tropicales fue la introducción para muchos participantes al uso de datos de radar altímetro para inferir el contenido calórico del océano, ya que es una medida más adecuada de la fuente de entalpía potencial del océano que únicamente la temperatura de la superficie del mar. Además, el radar altímetro ofrece una estimación de las alturas de las olas de la superficie del océano, aunque sólo a lo largo del nadir de la trayectoria del satélite.

Sólo tres de los centros de aviso de ciclones tropicales indicaron en el estudio haber utilizado los datos de radar altímetro. Cinco centros indicaron que tenían acceso, pero que no se utilizaba para análisis del contenido calórico del océano. Veintitrés centros indicaron que no tenían acceso. Algunas de las respuestas indicaban que no estaban convencidos de que el contenido calórico del océano fuese de interés para la disminución de la TSM asociada a los ciclones tropicales debido a las capas mezcladas del océano profundo de su

gión. Se mostró un interés limitado por las estimaciones de las olas de la superficie del océano a través del radar altímetro, debido a los pocos casos en los que el satélite pasa directamente sobre el ciclón tropical.

### Estimaciones por infrarrojos o por microondas de precipitación

Como cada vez se reconoce más el daño que provoca la precipitación asociada a los ciclones tropicales, se han desarrollado distintas estimaciones de lluvia sobre el océano basándose en los datos infrarrojos geostacionarios o de

microondas de órbita polar, o en una combinación de ambos. Estas técnicas se calibran generalmente con estimaciones de radar o con medidas de registradores.

Las respuestas del estudio indican que 18 centros tienen acceso a estas estimaciones de precipitación basadas en datos de satélite. Algunos de esos centros que tienen acceso y que usan las estimaciones indican que se necesitan más evaluaciones para demostrar su precisión y su fiabilidad. Las siete respuestas de "no se usa" indicaban la opinión de que no había la suficiente precisión. Otros centros mostraron algún interés en las técnicas si éstas demuestran ser precisas, y si se dispone de formación profesional. Dos centros con predicción para islas montañosas sugirieron que no se espera que les sean tan útiles dichas estimaciones de precipitación en el océano abierto.

Como respuesta a la gran necesidad de predicciones de precipitación en la toma de tierra de ciclones tropicales, y la necesidad de herramientas más precisas, el IWTC-V recomendó que se desarrollara un modelo paramétrico que combine índices de lluvia derivados de imágenes de satélite y de radar calibradas con medidas de registradores, combinadas con una predicción a corto plazo de la trayectoria y de la intensidad.

### Respuestas del estudio sobre los usos de Internet

Como se indica en las respuestas al estudio mencionadas anteriormente, muchos centros de aviso no tienen

acceso directo a instrumentos especializados nuevos tales como AMSU, TRMM, Quikscat y radar altímetro. Por lo tanto, su acceso se ha visto limitado a los sitios Web de Internet. Por ello, estos sitios Web se han utilizado mucho, lo que ha sido un importante cambio en el proceso de predicción operativa a lo largo de los cuatro últimos años.

Como respuesta a una pregunta del estudio sobre el acceso en Internet a las imágenes de satélite por parte de los centros de aviso, 29 centros de 31 respondieron positivamente. Con mucho, las adquisiciones de datos de satélite más comunes que se mencionaron fueron Quikscat (22) y las imágenes visibles, infrarrojas y de microondas (19). Otros conjuntos de datos mencionados fueron TRMM (6) y vientos de vapor de agua (6). Esta corta lista no debería considerarse exclusiva, ya que varias respuestas positivas no ofrecieron una lista de sistemas específicos.

Otras preguntas del estudio pedían información sobre el acceso en Internet a los productos de satélite, y en especial a aquellos productos del UW-CIMSS que son más útiles. De las 30 respuestas, 22 centros indicaron que tenían acceso al UW-CIMSS (muchos centros mencionaron el producto de cizalladura vertical del viento que se muestra en la Figura 3) o a otros sitios Web de productos de satélite. De las ocho respuestas negativas, casi todas indicaron su deseo de tener acceso. En varios casos, el centro de aviso no había sido consciente de la disponibilidad de Internet y hará investigaciones para su uso futuro. Varios de estos centros indicaron que necesitarían formación profesional en el uso de estos productos basados en datos de satélite y esto se tratará más adelante.

A medida que se desarrollaban estos sitios Web experimentales que ofrecen productos basados en datos de satélite, algunos centros de predicción operativa han dudado de su utilización debido a la falta de control sobre la fuente, y sobre todo a posibles interrupciones o a la desaparición de la fuente. Al ser un pro-

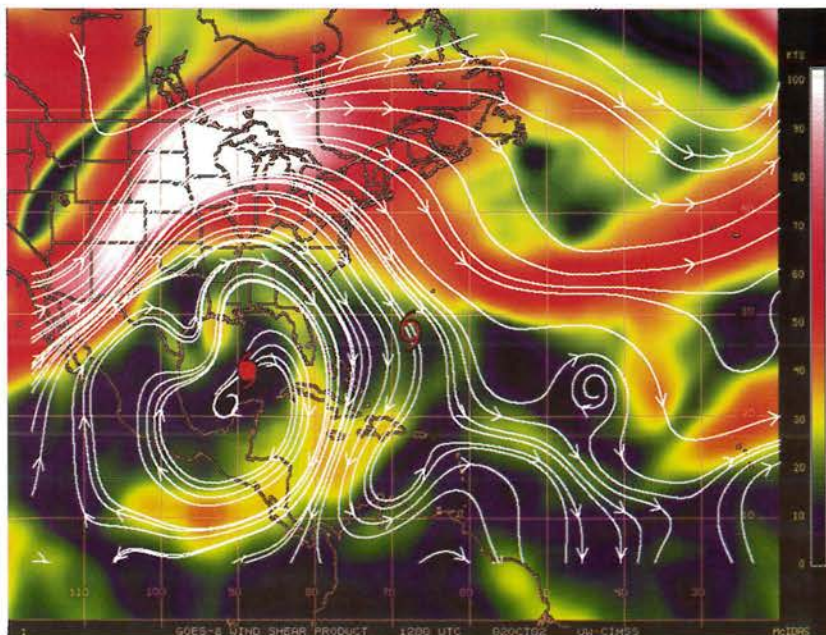


Figura 3 — Producto de cizalladura vertical del viento obtenida de datos de satélite (kts) para las 12:00 UTC de octubre de 2002 generada por el Instituto de Cooperación para Estudios Meteorológicos por Satélite de la Universidad de Wisconsin. Se cree que la región de aproximación de mayor cizalladura vertical del viento al noroeste del huracán Lili (símbolo rojo sólido) es un factor del rápido debilitamiento de la tormenta poco después de las horas de las Figuras 1 y 2

ducto experimental, también se manifestaron preocupaciones por la falta de oportunidad y la poca fiabilidad de las comunicaciones. Por lo tanto, una de las preguntas del estudio exploraba estos problemas y estas preocupaciones. De los 22 centros de aviso que indicaron usar los sitios Web para adquirir productos basados en datos de satélite, sólo hubo cuatro que no declararon preocupaciones. Doce centros listaron uno o más de los problemas anteriores. Cuatro centros indicaron que sus comunicaciones con los sitios Web dejaban de ser fiables durante los episodios de ciclones tropicales, y uno de estos centros sugirió un “sitio Web duplicado” internacional para garantizar el acceso cuando el sitio Web local esté saturado. Cuatro centros citaron como motivo de preocupación la falta de oportunidad o de disponibilidad, en especial debido a la falta de mantenimiento durante los fines de semana. Dos centros citaron el miedo a la desaparición y un centro indicó que, por esta razón, los productos de dicho sitio Web tendrían que ser sólo una herramienta auxiliar. Por último, aunque cuatro centros admitieron preocupaciones, declararon que los productos eran una parte tan importante de su análisis que dependían de ellos y que los beneficios superaban a los riesgos.

### Respuestas del estudio relacionadas con la formación profesional

Las discusiones del IWTC-V revelaron preocupaciones generalizadas sobre la formación profesional de los

predictores para utilizar de forma eficaz las observaciones y los productos de satélite. Por lo tanto, la tercera parte del estudio trató estas preocupaciones.

La formación profesional en satélites se hace generalmente de forma local bajo la dirección de un mentor. En algunos países, se organiza un programa nacional de formación profesional para las necesidades básicas de formación profesional. En los programas patrocinados por la OMM se dispone de formación profesional internacional en análisis de ciclones tropicales con algo de formación profesional en satélites, generalmente en el Centro Nacional de Huracanes de los EE.UU. para el hemisferio norte y en Australia para el hemisferio sur.

Sólo indicaron que no necesitaban formación profesional adicional la oficina de Guam del Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU. y el Servicio Meteorológico de Nueva Zelanda. Todos los demás centros que respondieron al estudio indicaron que necesitaban formación profesional adicional, y las necesidades iban desde la instrucción en la interpretación básica de satélites tipo Dvorak a la formación profesional en los productos nuevos de los sitios Web de Internet. La necesidad de formación profesional más común que se mencionó en el estudio era para utilizar las imágenes y los sondeos de microondas.

Quizá la respuesta más sorprendente es que las preocupaciones de formación profesional se expresaron no sólo en los centros de aviso de los países menos desarrollados: importantes centros de Australia, por ejemplo, indicaron esa misma necesidad. El CMRE de La Reunión indicó que este era un "problema permanente" debido a la llegada de predictores que no estaban formados en análisis de ciclones tropicales. El Centro Conjunto de Aviso de Tifones de Hawai tiene necesidad continua de formación profesional debido al ciclo de rotación de tres años de los analistas y predictores de satélite. Otros centros que no tienen predictores de ciclones tropicales a tiempo completo citan la necesidad de formación profesional "de actualización", en especial donde los ciclones son relativamente inusuales o altamente estacionales.

El obstáculo para la formación profesional que se menciona con más frecuencia es el coste de los viajes al lugar de formación. Algunos centros expresaron la opinión de que es más rentable que viaje el experto a que vayan los predictores a la localidad del experto. Sin embargo, el tiempo que tiene que dedicar el experto a la actividad de formación profesional puede estar limitado y viajar a numerosos centros de aviso puede requerir una gran cantidad de tiempo. Por ejemplo, generalmente no se paga a los investigadores que desarrollan productos nuevos de satélite para que den formación profesional, y se deben hacer acuerdos espe-

ciales. Una sugerencia era registrar la formación profesional como un seminario y facilitarla a través de un sitio Web. Otro obstáculo es que el viaje de un predictor de un centro pequeño a una reunión de formación profesional puede crear un vacío de trabajo que tiene que ser suplido por otros predictores.

## Resumen y recomendaciones

Basándose en las aportaciones de la sesión principal del IWTC-V sobre los usos actuales de los datos de satélite en los centros de predicción de ciclones tropicales, y en un estudio posterior al que respondieron los predictores participantes, se sugirieron las siguientes conclusiones:

- Los datos y los productos de satélite se han convertido en una componente vital de la serie de observaciones del centro de análisis tropical.
- Durante los cuatro últimos años, se ha producido un importante aumento en el acceso a los datos y productos de satélite y a su uso (a través de acceso directo y/o sitios Web).
- Los nuevos desarrollos y productos futuros son prometedores y los predictores están ansiosos por emplearlos, siempre que se asegure un acceso fácil y que se disponga de la formación profesional adecuada.
- La formación profesional (sobre todo en productos nuevos) es crucial para el uso eficaz de los datos de satélite.

La sesión principal del IWTC-V incluía un resumen de los futuros sistemas de satélite y las oportunidades que representa para el análisis de ciclones tropicales. Ciertamente, se espera una invasión de datos nuevos de satélite en la próxima década, en vista de lo cual, en el IWTC-V se formularon las importantes recomendaciones siguientes:

- Hay que facilitar estos datos de forma tan amplia como sea posible a los centros operativos de predicción, que necesitarán mejores redes de comunicaciones para garantizar la accesibilidad a los datos.
- Se deben desarrollar herramientas y técnicas para combinar los datos de satélite más útiles con los campos iniciales de los modelos numéricos para ayudar al predictor.
- Se debería suministrar formación profesional a los predictores operativos en el mejor uso de estas nuevas observaciones y herramientas, y la OMM puede patrocinar esta función de formación profesional. Sin embargo, suministrar formación profesional en estas reuniones requerirá apoyo financiero para los investigadores que han desarrollado productos nuevos de satélite. También habría que animar a las agencias que finan-

ción la investigación para que fomenten y apoyen la transición a operaciones de nuevas y prometedoras técnicas desarrolladas en los laboratorios de investigación, y esto debería incluir la formación profesional posterior (incluidos métodos basados en la Web).

Se reconoció que había que validar todos los datos de teledetección por satélite con el reconocimiento de aeronaves y los datos de satélite. Incluso las estimaciones de intensidad de ciclones tropicales de tipo Dvorak tienen que validarse mediante campañas de

observación de campo in situ en todas las cuencas que carecen de programas rutinarios de reconocimiento.

### *Agradecimientos*

El Programa de Investigación de Meteorología Tropical de la OMM y el Programa de Ciclones Tropicales patrocinaron el IWTC-V. Damos las gracias a los representantes de los 31 centros de aviso de ciclones tropicales que completaron el estudio. La participación de R. L. Elsberry fue financiada por la Oficina del Programa de Investigación Naval de Meteorología Marítima y la de C. Velden a través de fondos de la NOAA y del NRL.

## *El agujero de ozono antártico: 1996-2002*

Por Andreas FISCHER<sup>1</sup> y Johannes STAEHELIN<sup>2</sup>

### **Introducción**

El agujero de ozono antártico, que fue descubierto en 1985 (Farman y otros, 1985) y cuyo desarrollo se vigiló posteriormente por medidas de satélite (Stolarski y otros, 1986), está muy influenciado por las condiciones meteorológicas de la estratosfera. Las bajas temperaturas durante el invierno sobre el Antártico originan la formación del vórtice polar, una región con vientos estratosféricos de gran velocidad que generalmente abarca el continente antártico. Este vórtice limita el intercambio de aire entre su interior y el exterior y da como resultado temperaturas extremadamente bajas, que forman nubes estratosféricas polares (NEP). Éstas activan procesos químicos que, en presencia de luz solar, originan una disminución rápida del ozono y producen todos los años el agujero de ozono en la baja estratosfera. Temperaturas inferiores a  $-78^{\circ}\text{C}$  pueden producir NEP que consten de agua y ácido nítrico, mientras que temperaturas inferiores a  $-85^{\circ}\text{C}$  originan NEP de cristales de agua casi puros. Ambos tipos de NEP ofrecen las superficies donde se producen las reacciones que convierten las moléculas menos reactivas en formas mucho más reactivas que destruyen el ozono con facilidad. Dichas moléculas son resultado de productos químicos hechos por el hombre emitidos a la atmósfera, incluyendo muchos compuestos que contienen cloro (p. ej., clorofluorocarbonos (CFC)) y bromo (p. ej., haluros).

En el Ártico también se produce un tipo similar de reducción polar del ozono (Rex y otros, 1998). Sin embargo, debido a los requisitos para la formación de un agujero de ozono, es poco probable que la destrucción de ozono origine un agujero de ozono en el Ártico similar en tamaño al del Antártico. Las temperaturas mínimas en el invierno ártico son generalmente mayores y más variables que las del invierno antártico, por lo tanto las temperaturas que favorecen la formación de NEP se dan con menor frecuencia. La razón de que las temperaturas árticas sean mayores es que hay importantes diferencias entre los hemisferios en las distribuciones de tierra, océano y montañas en latitudes medias y altas que afectan a los esquemas de la circulación atmosférica. En las 20 preguntas y respuestas sobre la capa de ozono de la OMM (OMM, 2003(a)) se ofrece una visión de conjunto de la teoría de la formación del agujero de ozono.

El agujero de ozono empieza a aparecer en agosto o a principios de septiembre a medida que el sol sale sobre el Antártico después de la oscuridad total y el frío extremo del invierno. La pérdida máxima de ozono se produce durante septiembre y octubre y el agujero se disipa cuando desaparece el vórtice.

A principios de agosto ya aparecen con frecuencia valores de ozono muy bajos. Debido a su pequeña extensión, se los conoce como miniagujeros y vienen de latitudes más bajas. Tienden a intensificarse con más fuerza sobre la Península Antártica y la hoja de hielo

281

<sup>1</sup> Estudiante de Ciencias Medioambientales en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich (ETHZ); este estudio fue llevado a cabo principalmente en la OMM, como parte de un proyecto de prácticas

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Atmosféricas y Climatológicas del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich (ETH Zurich)