

en los trabajos de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (Unesco) y en el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, así como en los trabajos de otras organizaciones y en la realización de programas de carácter internacional.

De lo expuesto se deduce cuan vastas son las actividades del Servicio Hidrometeorológico de la U.R.S.S. Tanto en cuanto se refiere al empleo y uso racional de los recursos naturales, como en cuanto respecta a la recíproca utilidad de la colaboración internacional, resultando de todo ello un mayor estrechamiento en las relaciones amistosas entre las diversas naciones.

USOS ACTUALES DE LOS DATOS DE LOS SATELITES EN UNA OFICINA DE PREDICCIÓN METEOROLÓGICA

Por Ralph K. ANDERSON *

Introducción

En los últimos quince años se han vuelto asequibles a los meteorólogos de todo el mundo las ventajas de la tecnología de los satélites. Hoy día, más de 800 estaciones receptoras en más de 74 países utilizan el servicio de Transmisión Automática de Fotografías (APT) proporcionado por los satélites de órbita polar NOAA de los EE. UU. y los satélites METEOR de la U.R.S.S. Se puede obtener información adicional mediante las emisiones de mapas meteorológicos por facsímil (WEFAX) desde los satélites geoestacionarios de órbita ecuatorial. Actualmente, muchos predictores pueden observar directamente la evolución de los temporales a intervalos cronológicos que varían entre una vez cada doce horas y una vez cada quince minutos, dependiendo de los datos disponibles. Adicionalmente, en algunas zonas del mundo se dispone de manera habitual de la velocidad del viento basada en medidas de los movimientos de las nubes y del perfil vertical de la temperatura, ambas mediante los satélites. Estos datos se obtienen en centros nacionales y regionales y se intercambian mundialmente.

Inicialmente, los datos suministrados por los satélites mejoraron el análisis sinóptico del tiempo en zonas en que se carecía de datos. Más recientemente, las imágenes a frecuentes intervalos suministradas por los satélites geoestacionarios, proporcionan nuevos datos a partir de los cuales los meteorólogos pueden desarrollar métodos operativos para predicciones de fenómenos meteorológicos a corto plazo en la mesoescala. El uso de las imágenes geoestacionarias se ha limitado, hasta ahora, fundamentalmente a los EE. UU., donde cada media hora se distribuyen mediante la red nacional de facsímil, imágenes de calidad fotográfica. Este tipo de datos estará disponible a escala más universal cuando sean operativos otros satélites geoestacionarios.

* R. K. Anderson es miembro del Applications Group at the National Environmental Satellite Service. EE. UU. Colaboró en las dos Notas Técnicas de la OMM, Nos. 75 y 124, *The use of satellite pictures in weather analysis and forecasting* (OMM Nos. 190 y 333) publicadas en 1966 y 1973, respectivamente

Este artículo expone las aplicaciones corrientes de los datos suministrados por los satélites en la resolución de algunos de los problemas específicos de predicción que se presentan en una oficina meteorológica. El grado de aplicación es diferente, pues depende del tipo o combinación de los datos disponibles, sea, por uso directo del APT, del WEFAX, del facsímil por línea o del teletipo. La siguiente exposición trata fundamentalmente de los datos y resultados obtenidos por los satélites que más comúnmente se utilizan en los EE. UU.

Los datos de los satélites y los productos que se deducen de ellos

Las imágenes obtenidas por los satélites NOAA de órbita polar se emiten continuamente y pueden recibirse directamente por el usuario. Estas imágenes se pueden obtener dos veces al día, cuando el satélite está dentro del campo —por la mañana, alrededor de las 0900 hora solar local y otra vez por la noche hacia las 2100 horas local—. Las imágenes

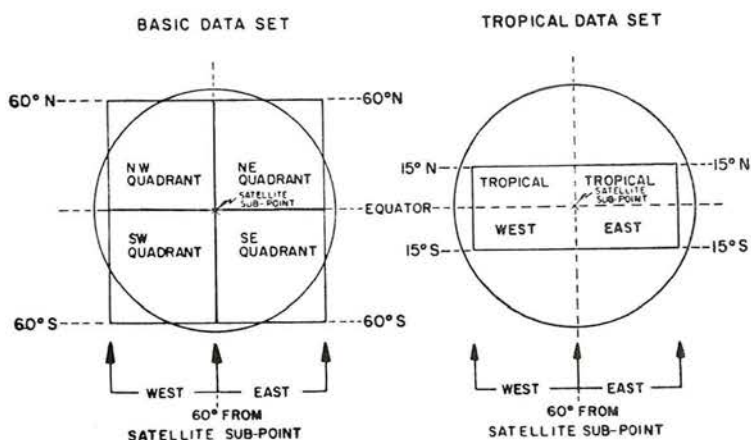


Figura 1.—Sectores de las imágenes de los satélites geoestacionarios mediante la transmisión WEFAX a partir del satélite GOES del este (75 °W) y del satélite GOES del oeste (135 °W). En la mayoría de los casos se dispone de los cuadrantes infrarrojos, a intervalos de 3 horas durante las 24 horas. También se dispone durante el día de los cuadrantes del espectro visible correspondientes. Los sectores tropicales se transmiten con menor frecuencia.

tienen una resolución de 4 km. en el espectro visible (0,5-0,73 μm) y de 8 km en el infrarrojo (10,5-12,5 μm). Las transmisiones WEFAX son una segunda fuente de datos obtenidos desde una órbita polar. Los mosaicos seleccionados, hechos a partir de varias pasadas de datos almacenados, cubren zonas fuera del campo de las estaciones de lectura directa. Los datos comprendiendo estas imágenes son transcritos por un ordenador en mapas en proyección estereográfica o Mercator. Las Transmisiones de Fotografías de Alta Resolución (HRPT) también pueden recibirse de los satélites NOAA y estos datos tienen una resolución de 1 km tanto en el campo visible como en el infrarrojo.

Los datos obtenidos a partir de los satélites de órbita polar son los más apropiados para el análisis a escala sinóptica. Aunque la resolución

espacial de los datos es capaz de definir sistemas nubosos de la mesoescala, el intervalo de 12 horas, entre las fotografías sucesivas, es demasiado largo para seguir el crecimiento y la disolución de las pequeñas circulaciones. Los sistemas meteorológicos de la mesoescala, que pueden evolucionar rápidamente en unas pocas horas, se observan y siguen mejor mediante los satélites geostacionarios.

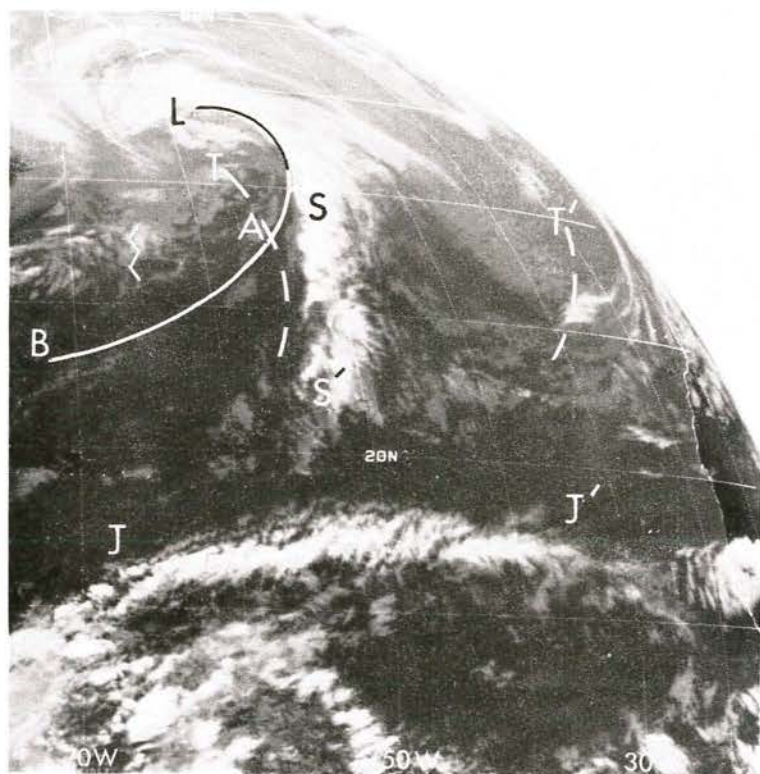


Figura 2.—Ejemplo del satélite GOES del este, sector del cuadrante noroeste WEFAX. Estas imágenes infrarrojas, del 16 de marzo de 1977 a 1800 TMG, nos muestran formaciones nubosas a escala sinóptica sobre el Atlántico Norte. Las letras de ésta y de las figuras siguientes aparecen citadas en el texto.

Los Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) (Satélites Ambientales Operativos Geostacionarios) de los EE. UU. suministran, de forma continua, imágenes cada media hora, durante las veinticuatro horas. La resolución de los datos varía desde 1 km en el espectro visible a 8 km en el infrarrojo. Los satélites GOES orbitan alrededor de la Tierra a una altura de 35.000 km, están situados a 75 °W y 135 °W, y observan continuamente la misma porción de la Tierra hasta una distancia de unos 70° de latitud, en todas direcciones desde la vertical del satélite. Debido al coste, la lectura directa de los datos suministrados por los satélites geostacionarios se limita a unos pocos centros de tratamiento de datos, dotados de grandes ordenadores. En los EE. UU. se seleccionan pequeños sectores de las imágenes y se retransmiten a las

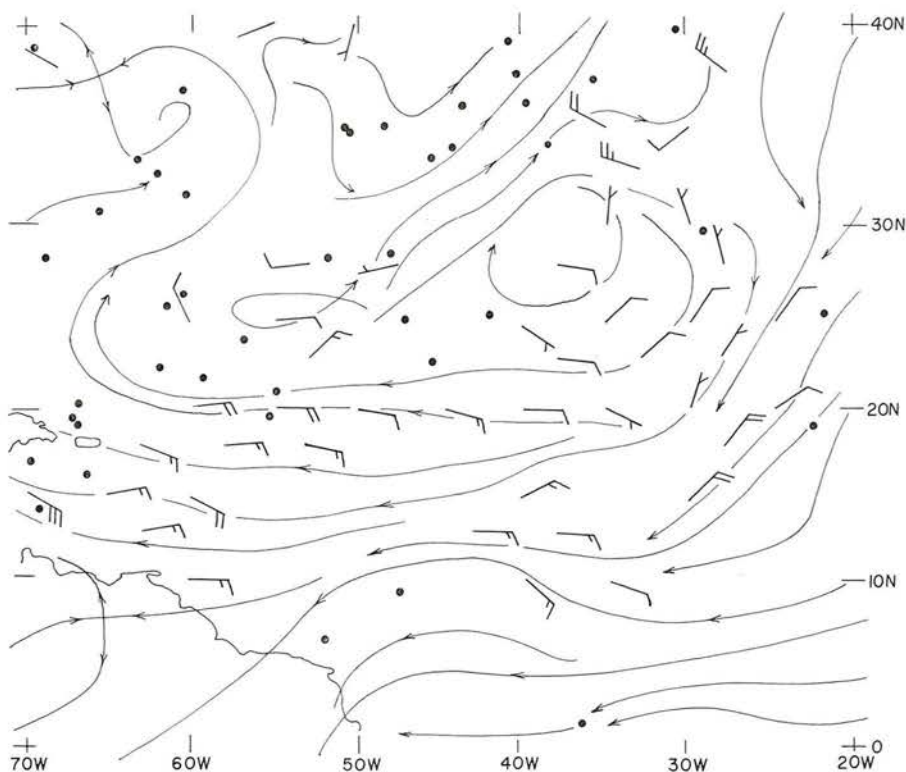
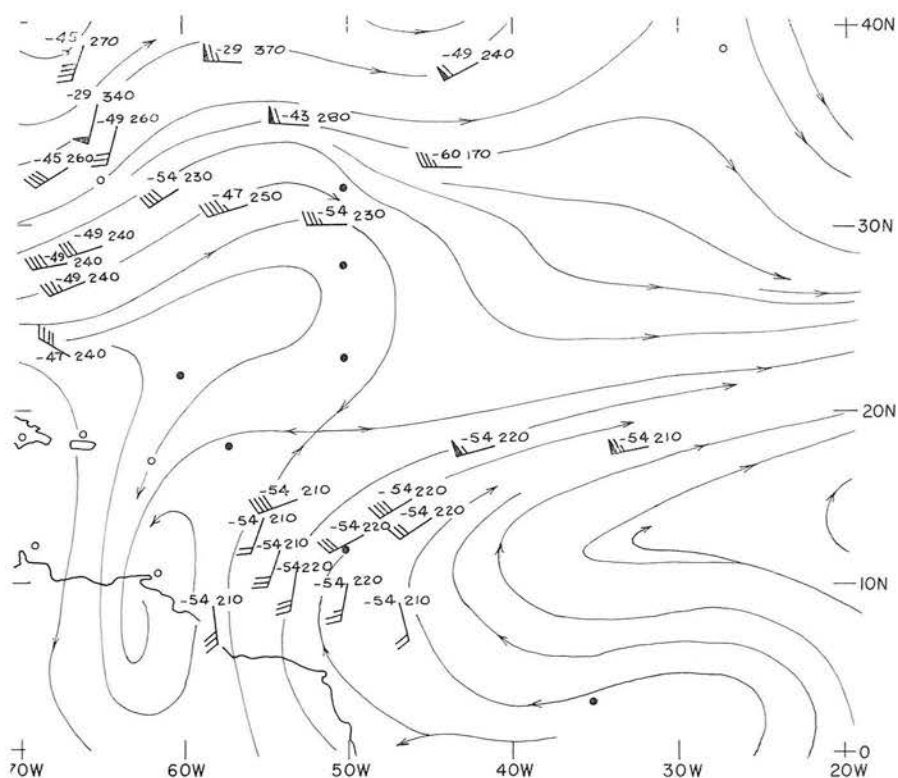


Figura 3.—Vientos por satélite del 1 de junio de 1977 a 1000 TMC; (arriba) análisis operativo de las líneas de corriente a bajo nivel, utilizando los vientos por satélite (transcritos) e informes de superficie (sin transcribir, pero señalados por circulitos negros), (página opuesta) análisis operativo de las líneas de corriente a 250 mb realizado usando viento por satélite (transcritos), datos RAWIND (sin transcribir, pero señalados por circulitos sin rellenar) e informe de aviones en vuelo (sin transcribir, pero señalados por circulitos negros). La temperatura del elemento de nube utilizado para calcular el viento en el nivel superior y la altura del elemento de nube en milibares, basada en la temperatura de la nube, son parte del informe SATWND. Estos valores también están transcritos. Algunos de los vientos por satélite para el nivel superior, obtenidos en este caso, son para niveles sensiblemente superiores o inferiores al nivel de 250 mb. Se transcriben para mostrar un ejemplo completo, pero no se usaron en el análisis.

oficinas de predicción por fotofacsimil de línea. Parte de las imágenes se emiten también cada tres horas por WEFAX para que se reciban a través de las estaciones de APT de tierra. (Figuras 1 y 2.)

Las medidas del perfil vertical de temperatura en la atmósfera se realizan por los satélites NOAA de órbita polar. Estos datos pueden recibirse por el Direct Sounder Broadcast (DSB) (Sondeador emisor directo) y requieren un complicado equipo de tierra para su tratamiento. Los datos de perfil de temperatura recibidos y tratados en los EE. UU. se transmiten por teletipo a los centros regionales de distribución de datos meteorológicos para su posterior retransmisión a los usuarios locales. Los datos se envían de dos maneras —radiancias (SARAD) y espesores (SATEU). Estos datos se usan principalmente por aquellos centros meteorológicos



que dispongan de ordenadores para el análisis y la predicción. Los datos se extienden por todo el globo sobre las porciones oceánicas libres de hielo.

También se dispone en los EE. UU. de vientos medidos con los satélites, *Figura 3*. Se basan en medidas del movimiento de las nubes, tres veces al día, usando imágenes de satélites geostacionarios. Las medidas se hacen entre los 30 °W y los 180 °W y los 45 °S y los 45 °N, usando datos del infrarrojo. Los vientos de los satélites del nivel más bajo representan el movimiento del aire a unos 900 mb. Los vientos de los satélites del nivel más alto tienen la altura que se le asigna a partir de la temperatura del cuerpo negro del elemento nuboso utilizado.

Las fotografías del espectro visible y del infrarrojo, las radiancias para los perfiles de temperatura y el movimiento de las nubes son los datos básicos de los satélites de que ahora dispone el predictor. A continuación analizaremos cómo se usan estos datos en la práctica diaria de la predicción meteorológica.

Uso de los datos de los satélites por los predictores

Análisis sinóptico.—Los datos suministrados por los satélites se pueden aplicar al análisis sinóptico indirectamente, mediante el análisis de las nubes y los sistemas nubosos, o directamente, usando las medidas cuan-

titativas de altura obtenidas del sondeador y los vientos obtenidos a partir del movimiento de las nubes.

Las fotografías de las nubes obtenidas por los satélites de órbita polar se usan normalmente para localizar y seguir los temporales, tanto en los «oestes» de las zonas templadas como en los trópicos. A partir del análisis de las nubes se pueden hacer estimaciones de la intensidad del frente, la intensidad del temporal, la dirección del viento en superficie, las posiciones de las bajas en superficie, vaguadas y dorsales en altura, centros de vorticidad en la troposfera media y la estabilidad atmosférica relativa. Por ejemplo, en la *Figura 2*, podemos identificar las siguientes características a escala sinóptica: el «chorro» subtropical (J-J') una línea de turbonada oceánica (S-S'), un centro de baja presión (L), un frente activo (L-A) que se vuelve inactivo (A-B) y los ejes de dos vaguadas en altura (T) y (T').

Las imágenes infrarrojas emitidas continuamente desde los satélites geoestacionarios hacen más fácil identificar y seguir rápidamente el movimiento de los máximos de vorticidad cerca de la corriente en chorro. Estos máximos en la atmósfera superior, a menudo producen cambios en el estado del tiempo, pero son difíciles de identificar y seguir mediante observaciones de las capas altas hechas sólo cada doce horas. A menudo van acompañados de nubes cuyo crecimiento, disipación y deformación revela que se están produciendo cambios en el campo de vorticidad troposférica superior, que pueden usarse en la diagnosis.

En los trópicos las observaciones por satélites son, con frecuencia, el único medio disponible para analizar los temporales. Las técnicas de clasificación desarrolladas a partir de datos visibles de órbitas polares, permiten estimaciones diarias de la velocidad máxima del viento en un temporal y valoraciones de su desarrollo probable. En los últimos años se ha desarrollado un nuevo sistema de clasificación que usa las imágenes infrarrojas «reforzadas» de los satélites geoestacionarios. Las imágenes de este tipo están contorneadas en diferentes tonos de gris para identificar los campos de temperatura significativos. La *Figura 4*, nos muestra una fotografía infrarroja reforzada (a) y otra no reforzada (b), del huracán *Anita*. En la versión reforzada, la banda blanca de nubes frías (A), que rodea parcialmente el ojo cálido (B), nos indica un temporal con vientos superiores a los 130 nudos. La evolución de la nube fría cerca del centro del temporal se usa para clasificar la intensidad del mismo. Esta nueva técnica infrarroja de clasificación permite, mediante los satélites geoestacionarios, una vigilancia continua durante las veinticuatro horas del día del desarrollo de los temporales tropicales.

Los datos cuantitativos suministrados por los satélites ayudan a definir los tipos de circulación troposférica a gran escala para su uso en el análisis numérico del tiempo. Los gradientes térmicos en altura, obtenidos a partir de los datos suministrados por el sondeador, ayudan a una localización más precisa de la corriente en chorro polar, tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. Las medidas de viento de los satélites proporcionan datos sobre los trópicos y subtrópicos (ver *Fig. 3*). Por tanto, los datos cuantitativos suministrados por los satélites contribuyen al perfeccionamiento de las predicciones numéricas usando tanto el modelo hemisférico como el global.

Servicios para la Aviación.—Los datos de los satélites geostacionarios son más apropiadas para las aplicaciones de la meteorología aeronáutica, ya que nos permiten ver el crecimiento y la debilitación de los sistemas me-

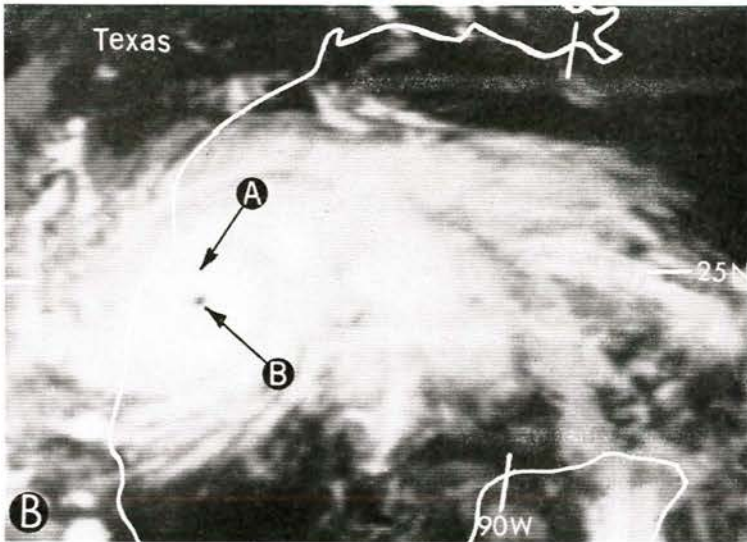
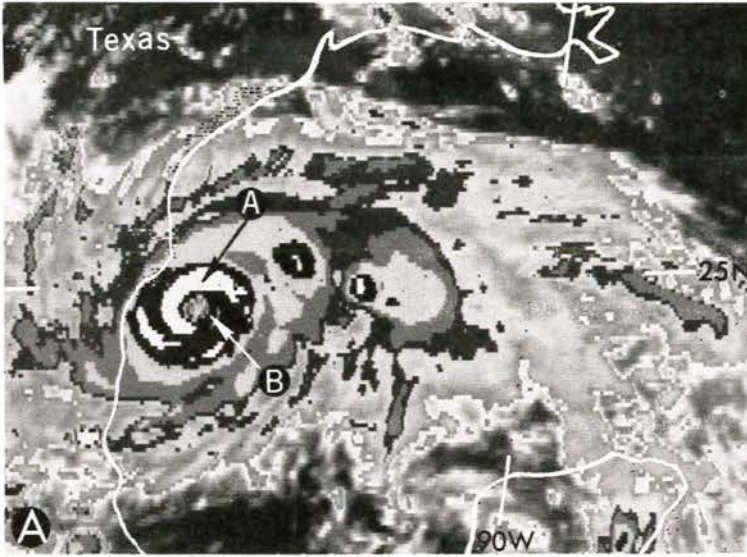


Figura 4.—(a) Huracán Anita. Imagen del satélite GOES, infrarroja reforzada, del 2 de septiembre de 1977 a 0000 TMG. La asignación de los distintos tonos de gris a las temperaturas, desde las más frías (convección señalada por (A)) a las más cálidas (periferia de la fotografía), es la siguiente: blanco desde -75° a -70° °C; negro de -69° a -64° °C; gris claro de -63° a -54° °C; gris medio de -53° a -42° °C; gris oscuro de -41° a -30° °C; primera banda de sombra gris uniforme de -29 a $+3$ °C; segunda banda de sombra gris uniforme de $+4$ a $+23$ °C. (b) Huracán Anita. Imagen infrarroja GOES (sin reforzar) del 2 de septiembre de 1977 a 0000 TMG.

teorológicos de la mesoescala. Los datos suministrados cada media hora han demostrado ser un instrumento nuevo e importante en la actualización de las predicciones terminales y en la preparación de los informes del tiempo durante el vuelo, referentes a nubes, tormentas, nieblas y estratos. Los predictores encargados de los vuelos oceánicos usaron durante algún período, las imágenes de los satélites de órbita polar para identificar y predecir las zonas de tiempo significativo y de fuertes vientos en altura.

La altura de las nubes puede obtenerse fácilmente a partir de las imágenes de nubes con el infrarrojo. Para mayor exactitud, los datos tienen que ser calibrados y tratados en forma digital. Los datos infrarrojos nos proporcionan la temperatura del cuerpo negro equivalente a la superficie superior de las nubes. Esta información, junto con el conocimiento de la estructura de la temperatura de la atmósfera en la zona de observación, nos permite medir la altura real de la cima de las nubes. La estructura de la temperatura se obtiene a partir de la transcripción de los radiosondeos, y de los análisis y las predicciones en altura. Cuando se trata de cirros es necesario hacer estimaciones de su trasmisividad para obtener la altura idónea de la cima de las nubes. El cálculo de la cima de las nubes se puede hacer a partir de datos del infrarrojo, sean de satélites geostacionarios o de satélites de órbita polar. La *Figura 5*, muestra un

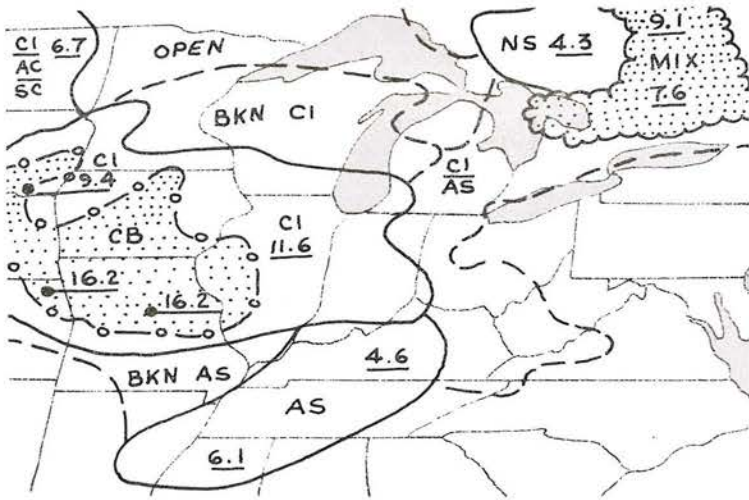


Figura 5.—Nefoanálisis y mapa de las cimas de las nubes sobre los EE. UU. del 12 de septiembre a 1030 TMG. Las alturas de las cimas de las nubes se dan en kilómetros. Sus valores máximos están subrayados; un circulito negro marca las posiciones de las cimas de altura máxima. Los otros valores de altura son valores medios de las cimas con relación a la zona en que se encuentran. Una línea de puntos y trazos rodea las zonas de cumulonimbus, una línea de trazos bordea las zonas de nubes aisladas en diversas capas, una línea continua rodea una zona cubierta uniformemente y la línea festoneada limita la zona cubierta de nubes de diversos tipos.

nefoanálisis y las alturas de las cimas de las nubes obtenidas a partir de imágenes infrarrojas. Aparecen marcadas las alturas máximas de las cimas de las nubes así como sus valores medios. Es un ejemplo de mapa facsímil operativo para su aplicación en informes para la aviación.

Las imágenes infrarrojas reforzadas también nos suministran información cuantitativa sobre la altura de las cimas de las nubes. La *Figura 6* es una imagen infrarroja reforzada tomada al mismo tiempo que la *Figura 5*. En ella aparecen contorneadas las nubes frías de forma similar a la usada en el análisis de huracanes que ya se describió anteriormente. En este ejemplo, los tonos grises más claros rodeados de negro representan las cimas más frías. Los puntos A y B corresponden a los valores máximos de las cimas dados en la *Figura 5*. Las fotografías infrarrojas reforzadas ayudan a identificar las zonas de tormentas activas. Estas fotografías se hacen con relativa facilidad y permiten que el predictor aprecie de una ojeada los aspectos más importantes de la topografía de las nubes.

Las imágenes de los satélites se usan corrientemente como ayuda a hacer las predicciones a corto plazo (0-6 horas), de la disipación y formación de niebla y estratos. Las fotografías de los satélites en el espectro visible, tomadas en las primeras horas de la mañana revelan claramente la extensión y los límites de las nieblas y de las capas de estratos, tan frecuentes en los regímenes de altas presiones. Las variaciones de brillo en las cimas de una capa de niebla o estratos nos dan una idea del espesor relativo de la capa. Las partes más espesas aparecen como las más brillantes. El estudio de las fotografías de los satélites muestran que las zonas más oscuras se disipan primero, mientras que las más brillantes son las más persistentes. Normalmente las zonas de niebla durante el día se contraen hacia el centro o hacia el sitio en que las nubes son más brillantes y más espesas.

En la *Figura 7*, aparece un ejemplo de niebla y estratos. Nótese que las zonas más brillantes (A) en la primera fotografía persisten. Mientras que la niebla correspondiente a las zonas más grises (B) se ha disipado en una hora y media. Nótese también, que las nieblas de valle (C), en la Columbia Británica, pueden identificarse con facilidad. El análisis de las nieblas y estratos puede mejorarse reforzando los datos del espectro visible con contornos de varios tonos de brillo. Este tipo de análisis es posible usando imágenes del espectro visible de satélites de órbita polar o geoestacionarios.

Un análisis cuidadoso de las imágenes infrarrojas de los satélites geoestacionarios durante la tarde, puede darnos algunas indicaciones de dónde se forman las nieblas de advección o estratos, por la noche. El aire oceánico húmedo, moviéndose tierra adentro en las primeras horas de la tarde hará que la tierra que está debajo de él aparezca más oscura que la tierra que está debajo de aire más seco. Esto ocurre porque la tierra situada debajo del aire húmedo se enfría más lentamente. Más tarde, por la noche, es más probable que la niebla o los estratos se formen en las zonas más oscuras, zonas más húmedas, que fueron detectadas por el satélite a principios de la tarde. De esta manera podemos identificar las zonas con altas probabilidades de formación de nieblas, varias horas antes de que éstas se formen. La detección de estas zonas húmedas requiere que las imágenes infrarrojas estén muy reforzadas en el intervalo de temperaturas adecuado. La visión de las imágenes, como una película cinematográfica en movimiento, hace más fácil localizar un límite de aire húmedo que se mueve tierra adentro.

Son también importantes para la aviación las reducciones de la visibilidad producidas por polvo o calima. El polvo en suspensión puede detectarse fácilmente en las imágenes del espectro visible. Este tipo de polvo se produce en las zonas áridas bajo la acción de vientos fuertes. Puede reducir la visibilidad tanto en tierra como en altura, dependiendo de la fuerza del viento y de la estabilidad. Los satélites revelan los límites de las zonas de baja visibilidad. Una vez diagnosticada la situación productora de polvo, se puede predecir la persistencia y trayectoria del mismo. La calima atmosférica y la contaminación también influyen en la reducción de la visibilidad durante el vuelo de los aviones. Los sensores de los satélites del espectro visible detectan mejor la calima y la contaminación cuando la declinación del sol es pequeña. Para este propósito son más adecuadas las fotografías hechas desde los satélites geoestacionarios cerca del orto o del ocaso del sol. Una vez identificados, se pueden predecir los límites de la calima y de la contaminación, usando los cambios que se esperan en la circulación y en la estabilidad.

Se puede obtener considerable información referente a los frentes con ráfagas tormentosas, a partir de las imágenes de los satélites geoestacionarios ya sean del espectro visible o del infrarrojo. Las imágenes del espectro visible nos muestran arcos nubosos que se alejan de las tormentas. Estos arcos representan líneas de cambio del viento, líneas de cizalladura vertical del viento cerca del suelo y líneas de turbonada. Pueden ser identificados y seguidos con imágenes cada media hora. El conocimiento de su presencia y movimiento es una valiosa información para las predicciones terminales con validez de 0 a 3 horas.

Avisos de fenómenos meteorológicos peligrosos.—Los predictores que disponen de las imágenes de los satélites geoestacionarios las encuentran extremadamente útiles para vigilar las tormentas intensas. Los vientos fuertes, los tornados y las inundaciones repentinas, que a menudo acompañan a las tormentas intensas, son producidos por circulaciones en la mesoescala, que son demasiado pequeñas para ser definidas adecuadamente a partir de las observaciones en superficie convencionales. Estas circulaciones pueden ser detectadas por el análisis nefoscópico de las imágenes de los satélites y después se las puede seguir a medida que se desarrollan los sistemas meteorológicos asociados. Ello permite que los predictores sean más específicos en cuanto a donde se esperan condiciones de mal tiempo y, en muchos casos, se puede emitir un aviso previo. Incluso los temporales de gran escala, como los huracanes, se pueden predecir mejor mediante una vigilancia por satélites con imágenes a intervalos frecuentes. El rápido ahondamiento de estos temporales, o los cambios en su trayectoria, pueden tener una gran repercusión en el tiempo en las costas, tanto por la fuerza del viento como por su localización.

En los EE. UU. cuando se esperan tornados, se hace que el satélite GOES del este proporcione imágenes a intervalos de 15 minutos para el National Severe Storm Center. Estas fotografías se convierten electrónicamente en películas animadas y se usan para señalar los lugares en que es probable que se produzcan tornados. Los datos del espectro visible con resolución 1 km, se usan para seguir las líneas de turbonada a medida que se forman y crecen para producir mal tiempo. Las imágenes infrarrojas reforzadas tales como la representada en la *Figura 6*,

también son convertidas en películas en movimiento, en tiempo real, para su uso en el proceso de predicción.

Las situaciones de posible inundación repentina se evalúan analizando las imágenes de tormentas persistentes que se mueven lentamente. Una vez que ha sido identificado este tipo de tormenta, es posible calcular las estimaciones cuantitativas de precipitaciones, en media hora, punto a punto. Esto se puede hacer usando una técnica desarrollada recientemente que utiliza relaciones empíricas entre las cantidades de precipitación, temperatura de la cima de las nubes obtenidas por infrarrojos, crecimiento de las nubes, y fusión de las nubes (la *Figura 6* nos

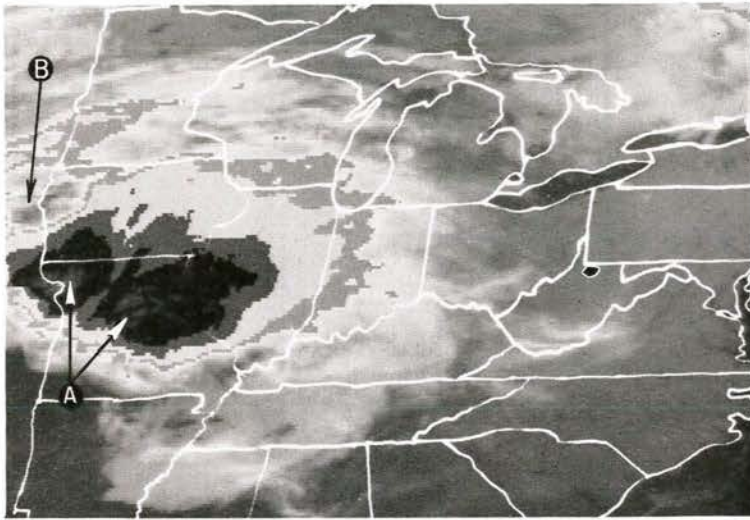


Figura 6.—Nubes sobre los EE. UU. Imágenes del GOES infrarrojas reforzadas, del 12 de septiembre de 1977 a 1030 TMG. Las temperaturas asignadas a los tonos de gris desde las zonas más frías (centro de convección (A)) hasta las zonas más cálidas, son las siguientes: tonos grises continuos (A), contorneados de negro, inferiores a -62°C ; negro de -62° a -59°C ; gris oscuro de -58° a -53°C ; gris claro de -52° a -42°C ; gris medio de -41° a -32°C ; tonos grises continuos de -31° a $+28^{\circ}\text{C}$.

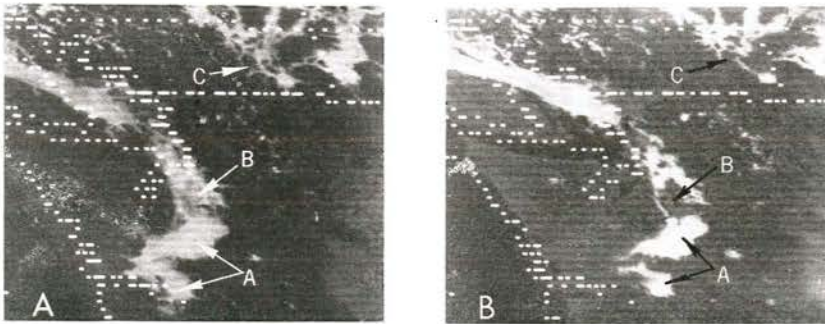


Figura 7.—Estratos y nieblas en zonas al noroeste de los EE. UU. Imágenes del GOES, del espectro visible, del 7 de octubre de 1976. (A) Imagen de las 0815 hora local. (B) Imagen de las 0945 hora local.

muestra el tipo de imágenes infrarrojas que se utilizan en este análisis). Este método todavía se está desarrollando y comprobando. Promete ser una valiosa herramienta en los casos en que las observaciones de superficie son dispersas o inexistentes, o lentas en su recepción. Esta técnica se desarrolló para estudiar las lluvias convectivas en los EE. UU., pero se puede adaptar a otras zonas.

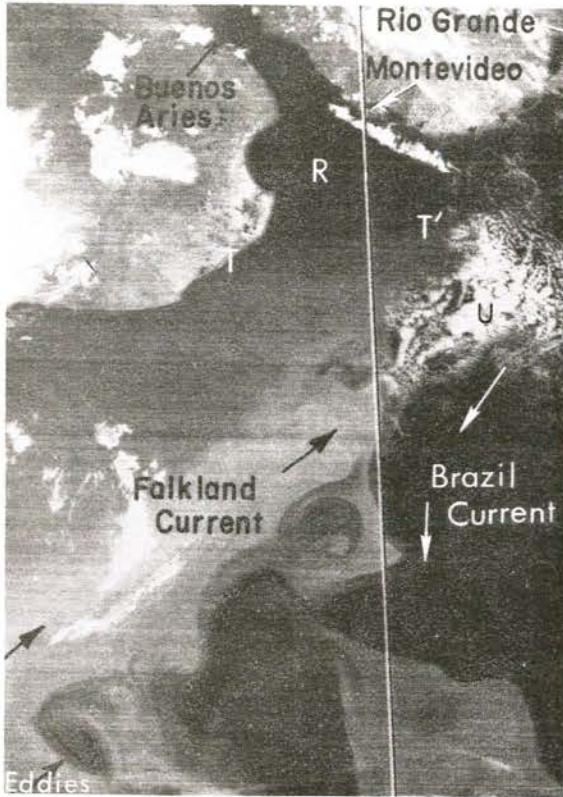


Figura 8.—Distribución de la temperatura de la superficie del mar, en la parte occidental del Atlántico Sur. Fotografía infrarroja NOAA VHRR del 31 de octubre de 1975.

Aplicaciones a la agricultura.—Las aplicaciones corrientes de los datos de los satélites a la agricultura son la estimación de las precipitaciones y las medidas de la temperatura del suelo, para avisos de heladas. También se están desarrollando nuevas aplicaciones en campos como la administración de los bosques.

Hay muchos procedimientos de estimación de las precipitaciones que relacionan empíricamente las fotografías de las nubes por los satélites con los valores de la precipitación. Los esquemas más concordantes se refieren a las lluvias convectivas en los trópicos y en los subtropicos. Se pueden hacer estimaciones aproximadas para períodos de 24 horas, o mayores, a partir de las imágenes emitidas por los satélites de órbita polar dos veces al día. Son posibles estimaciones más exactas, usando las imágenes geostacionarias emitidas continuamente y aplicando la técnica del infrarrojo reforzado expuesta anteriormente en re-

lación con los avisos de inundaciones repentinas. Las estimaciones de precipitación por satélites son importantes en zonas en las que se dispone de pocos pluviómetros y se necesita información para la predicción y la planificación de los recursos hidráulicos.

Los satélites geoestacionarios permiten vigilar los cambios de la temperatura del suelo en las zonas cultivadas. Los satélites nos muestran las zonas afectadas por las mismas. Con este propósito se usan las imágenes infrarrojas reforzadas o el análisis con ordenador de los datos digitales.

Los satélites pueden, también, desempeñar un papel en la administración de los bosques. Pueden detectarse los incendios forestales de tamaño significativo en zonas remotas mediante sus penachos de humo. El humo se aprecia mejor en los datos del espectro visible. El análisis de los tipos de las nubes cerca de los incendios es, a menudo, útil para los predictores que realizan predicciones en la vecindad de los incendios. El conocimiento de las condiciones de las nubes convectivas en la proximidad de los incendios se puede aplicar en la predicción a corto plazo de las características locales de los vientos. Las aplicaciones de los datos de los satélites a la agricultura son relativamente nuevas y se han hecho en los últimos años. Posteriormente, tendrán más desarrollo e influencia en este campo.

Predicciones para la Marina.—La información de los satélites en relación con las predicciones meteorológicas para la marina incluyen: la localización e intensidad de los principales temporales oceánicos; las temperaturas de la superficie del mar y alguna información sobre el estado del mar. Todos los tipos de datos de los satélites son aplicables a los problemas de la meteorología marina. Los temporales marinos pueden ser localizados y seguidos adecuadamente por medio de las imágenes de los satélites de órbita polar. Las imágenes geoestacionarias son útiles para vigilar, a intervalos cortos, el ahondamiento de los temporales y para obtener información sobre el viento y el tiempo en la mesoescala para su uso en la confección de predicciones a corto plazo en las zonas costeras. Dichas predicciones son cada vez más importantes en las actividades de perforación frente a la costa.

La temperatura de la superficie del mar cambia lentamente y se puede vigilar adecuadamente usando las imágenes infrarrojas de los satélites de órbita polar. El conocimiento de las temperaturas superficiales en el océano se puede utilizar para preparar predicciones de nieblas marinas y de la distribución de las nubes convectivas en función del viento previsto. Los satélites nos muestran la situación exacta de los gradientes significativos sobre la superficie del mar, que definen los bordes de las corrientes marinas. El conocimiento de estos bordes de las corrientes, juntamente con las predicciones de los vientos, puede aplicarse en la programación de las rutas de los barcos.

La *Figura 8* nos muestra el remolino provocado por la interacción de la corriente de Falkland y la corriente del Brasil, al este de Argentina. El estrecho borde oriental de la corriente fría de Falkland que se mueve hacia el norte aparece claramente en esta imagen VHRR. El efecto de las temperaturas del mar en la formación local de nubes, se aprecia en U, donde el aire frío se mueve sobre una porción cálida de la corriente del

Brasil, produciendo cúmulos. Otras variaciones a pequeña escala, que se aprecian en la fotografía y que pueden afectar a la nubosidad local, son las aguas cálidas del Río de la Plata (R) y los remolinos cálidos y fríos en los límites de las corrientes.



Figura 9.—Hielo en el estrecho de Davis.
Imagen NOAA VHRR, del espectro visible, el 30 de marzo de 1976.

Confección de mapas de suelo nevado y de hielo.—Los límites de nieve y hielo afectan a menudo a las predicciones de temperatura y nubosidad. Los análisis de suelo nevado y de hielo se realizan mejor con los datos VHRR de alta resolución. La *Figura 9* nos muestra un límite de hielo en el Estrecho de Davis, al oeste de Groenlandia. Las flechas indican el borde del hielo. En este caso, se observa la formación de líneas de cúmulos corriente abajo del límite, porque el aire frío se mueve sobre agua más cálida. Efectos similares de nubes se observan corriente abajo de los límites del suelo nevado. El conocimiento de las zonas cubiertas de nieve también ayuda en la predicción de las temperaturas locales y de las nieblas.

Empleo de las imágenes de los satélites en la enseñanza.—Las imágenes de los satélites son una ayuda inapreciable para la enseñanza de los predictores. Esto es especialmente cierto con referencia a las fotografías de los satélites geostacionarios montadas como películas con imágenes en movimiento. Este tipo de películas nos muestra la evolución de los sistemas nubosos producidos por las circulaciones a escala sinóptica a lo largo de su ciclo de existencia. Los predictores pueden comparar directamente la evolución de las nubes con los cambios correspondientes en la circulación tal y como estos aparecen representados en los análisis de superficie y de altura. Durante muchos años, los meteoró-

logos han aplicado los modelos frontales desarrollados por la Escuela Noruega, para el análisis de las nubes y del tiempo en las latitudes templadas, así como para realizar las predicciones. Estos modelos fueron deducidos a partir de observaciones en superficie y de un número limitado de observaciones en altura. El modelo frontal noruego es muy idealizado y, normalmente, proporciona una descripción inadecuada de las nubes y del tiempo en un temporal dado. Las imágenes de los satélites proporcionan las bases para nuevos modelos basados no sólo en una observación estática sino en la observación de los sistemas nubosos en continuo movimiento. Los predictores que estudian la evolución de los temporales en las películas

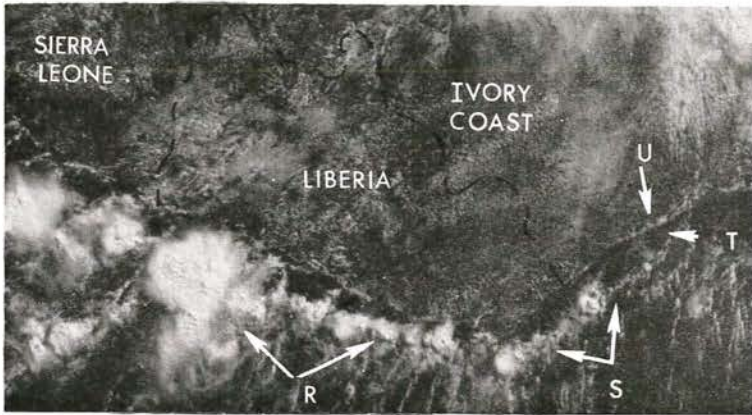


Figura 10.—Convección de brisa terrestre a lo largo de la costa Africana. Imagen NOAA VHRR, del espectro visible, el 13 de julio de 1973.

obtenidas por los satélites, pronto se acostumbrarán a combinar su conocimiento de la evolución de los sistemas nubosos con la predicción de las configuraciones de flujo y podrán realizar mejores predicciones de las nubes y del tiempo.

Los sistemas meteorológicos de la mesoescala causan la mayor parte de los fenómenos que tienen que predecir los meteorólogos. Las redes normales de las observaciones en superficie y en altura no permiten individualizar los sistemas meteorológicos de la mesoescala. Debido a que las estaciones están demasiado separadas y las observaciones se hacen a intervalos cronológicos demasiado largos, en la actualidad, sólo se comprende en forma imperfecta el comportamiento de los sistemas meteorológicos de la mesoescala. Los satélites proporcionan observaciones directas para el desarrollo de mejores modelos de los fenómenos meteorológicos en la mesoescala. Por otro lado, estos modelos proporcionarán las bases para realizar unas mejores predicciones a corto plazo. La importancia de las líneas convectivas y su interacción en la producción de mal tiempo, fue poco comprendida antes de que se estudiara mediante las imágenes de los satélites. Los satélites también nos muestran cómo los regímenes de brisas, terrestres y marinas en los océanos y lagos, juegan un papel fundamental en el tiempo local.

La Figura 10 nos muestra un régimen de brisa tierra-mar a lo largo de la costa Africana. En esta fotografía tomada por la mañana, las líneas de

convección (R) y (S) señalan la zona de convergencia de la brisa nocturna terrestre y un flujo suroeste, de bajo nivel, a lo largo de la costa. La zona más clara (T) está producida por la subsidencia a lo largo de la línea costera. Las películas del comportamiento diurno de las líneas convectivas de este tipo, permiten a los predictores una comprensión más completa de los efectos de las circulaciones locales y tenerlos en cuenta en sus predicciones del tiempo local. Las películas con sistemas en movimiento obtenidas por los satélites pueden resultar extremadamente efectivas en la enseñanza meteorológica.

Conclusión

En este artículo hemos resumido los diversos tipos de datos de los satélites de que disponen los predictores en el mundo. Los datos más corrientes son los obtenidos mediante el sistema APT de recepción directa desde los satélites de órbita polar. Los países que poseen grandes instalaciones de equipo receptor terrestre pueden obtener los datos del Very High Resolution Radiometer (Radiómetro de resolución muy alta) a partir del sistema High Resolution Picture Trasmisión (Trasmisión de Fotografías de alta resolución), así como los datos de recepción directa de los satélites NOAA. Actualmente, sólo un pequeño número de países pueden recibir datos directamente de los satélites geoestacionarios, y distribuir estos datos a sus servicios de predicción, a intervalos frecuentes. Sin embargo, las transmisiones WEFAX proporcionan accesos a las imágenes en forma restringida. Los principales avances en las aplicaciones a la predicción se han producido, en los últimos cinco años, como consecuencia del estudio de los datos de los satélites geoestacionarios a intervalos frecuentes. Esto ha conducido en los EE. UU., a aplicaciones útiles al análisis sinóptico, la meteorología aeronáutica, la meteorología marina, los avisos de mal tiempo y a otros tipos de actividades de la predicción. En un futuro próximo, será posible este tipo de aplicaciones a partir de los satélites geoestacionarios de Japón y Europa. Se espera que con el perfeccionamiento de la tecnología, los beneficios y las aplicaciones de las observaciones mediante satélites geoestacionarios puedan ser accesibles cada vez a más países del mundo. Hasta que esto sea posible, los datos suministrados por estos satélites se pueden emplear en la enseñanza de meteorólogos de muchos países para que puedan obtener un conocimiento más profundo y una mejor comprensión de los sistemas meteorológicos peculiares de su región del globo.

APLICACIONES ESPECIALES DE LA METEOROLOGIA Y LA CLIMATOLOGIA

*Por H. E. LANDSBERG**

El próximo año (1979) la Comisión de Aplicaciones Especiales de la Meteorología y de la Climatología (CAEMC), sucesora de la Comisión de Climatología (CCI), celebrará su 50 aniversario. Cuando la Organización Meteoroló-

* El Profesor H. E., Landsberg es Presidente de la Comisión Técnica de la OMM para Aplicaciones Especiales de la Meteorología y la Climatología.