

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda de dos partes).
<i>Autor / Adscripción</i>	Michel Rosengaus Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 10(2): 59-78
<i>Fecha de publicación</i>	1995
<i>Resumen</i>	En la primera parte se trataron principios de funcionamiento y conceptos esenciales para la correcta interpretación de productos de radar en cuanto a sus características clásicas, aquellas que los radares meteorológicos presentan desde su concepción después de la II Guerra Mundial. En esta segunda parte se hace lo propio para los aspectos modernos de los radares meteorológicos, incluyendo el control y procesamiento digital, la capacidad Doppler y la doble polarización. Se discuten sus productos, la operación rutinaria de un radar meteorológico moderno, su relación con otros sistemas de medición similares, así como sus aplicaciones e impacto en la hidrología.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1232

Revisión temática

Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda de dos partes)

Michel Rosengaus

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

En la primera parte se trataron principios de funcionamiento y conceptos esenciales para la correcta interpretación de productos de radar en cuanto a sus características clásicas, aquellas que los radares meteorológicos presentan desde su concepción después de la II Guerra Mundial. En esta segunda parte se hace lo propio para los aspectos modernos de los radares meteorológicos, incluyendo el control y procesamiento digital, la capacidad Doppler y la doble polarización. Se discuten sus productos, la operación rutinaria de un radar meteorológico moderno, su relación con otros sistemas de medición similares, así como sus aplicaciones e impacto en la hidrología.

En la primera parte de este trabajo se trataron los aspectos clásicos de los radares meteorológicos, es decir, las características de este tipo de sistemas que aún prevalecen sin cambiar significativamente. Comprenderlas resulta fundamental para su utilización adecuada y la de sus productos, incluyendo los últimos avances.

Los radares meteorológicos modernos, como casi todas las herramientas que forman parte de nuestra vida cotidiana, se vieron afectados significativamente por la *revolución digital*. Sus capacidades, adicionales a las tratadas en la primera parte, se encuentran íntimamente ligadas a la posibilidad de procesar y almacenar digitalmente la señal captada por el receptor, así como de controlar su operación a través de computadoras.

El advenimiento de los microprocesadores, y su tecnología asociada, pusieron este tipo de instrumentos al alcance de instituciones operativas más allá del ámbito de la investigación. Los aspectos modernos que se tratarán en este capítulo han estado incorporándose a los radares durante los últimos 15 años, pero es sólo recientemente que su instalación se ha venido generalizando.

Ampliación de funciones para un radar moderno

Aunque los campos de viento que arrastran a las tormentas se podían estimar indirectamente con los radares antiguos, utilizando como trazadores a las tormentas mismas, la capacidad de los radares modernos para registrar el *corrimiento de frecuencia Doppler* en la señal de eco permite medir directamente al menos una componente, la radial, del vector velocidad de vientos.

Algunos fenómenos meteorológicos, como los tornados, dejan *firmas* reconocibles en un despliegue en modo *Doppler* con las que se identifica su presencia a distancia, aún antes de que existan reportes directos del mismo. Dado que el radar es capaz de medir muchas veces por segundo la componente radial de la velocidad, y que la turbulencia se caracteriza por variaciones de la velocidad alrededor de su valor medio, el cálculo de estadísticas sobre los valores de velocidad medidos en una secuencia de pulsos, permite identificar el nivel de turbulencia en diferentes zonas de la atmósfera.

Esta capacidad *Doppler* proporciona al radar una mayor utilidad que la exclusivamente hidrometeorológica, por lo que hoy en día es ampliamente utilizado

para alertar a las aeronaves que transitan sobre zonas con fuerte cortante, turbulencia o inclusive la presencia cercana a los aeropuertos del peligroso fenómeno de corrientes descendentes abruptas.

Aunque las mediciones de radar meteorológico todavía no se utilizan en forma rutinaria, es previsible que se conviertan en importantes datos de entrada para modelos numéricos de la atmósfera, sobre todo conforme estos tienden a aumentar su resolución y a concentrarse en mayores detalles de la dinámica atmosférica. Se ha realizado en forma experimental la cobertura simultánea, por dos o tres radares *Doppler*, de una cierta zona, lográndose la reconstrucción total del su campo de velocidades de viento.

En términos generales, las funciones de un radar, descritas en la primera parte, se pueden realizar mejor si se utilizan sus nuevas capacidades. El ejemplo más claro es el de la clasificación de lluvia (en gotas de agua, granizo, copos de nieve, etc.) pues, aunque la múltiple polarización no requiere necesariamente de un radar digital, la clasificación requiere comparar mediciones sucesivas en, al menos, dos polarizaciones distintas (horizontal y vertical). De no poderse almacenar la señal, dicha comparación no puede realizarse. Los productos de un radar moderno (digital y *Doppler*) tienen una menor contaminación de ecos fijos, consideran mejor la atenuación de la señal por gotas de lluvia en su recorrido y permiten el ajuste por bloqueo parcial por el relieve del terreno.

De alguna manera, las capacidades prácticas de los radares modernos se amplificaron enormemente al poder digitalizar (y almacenar en memoria) la señal analógica de los sistemas originales, permitiendo un procesamiento más ágil y eficiente y reduciendo los costos al pasar de electrónica analógica especializada a electrónica digital genérica. Los radares antiguos estaban restringidos al procesamiento en línea de una señal analógica que, casi instantáneamente, dejaba de existir después de ser medida.

Productos modernos de un radar meteorológico

PPI de altitud constante, CAPPI

El indicador de posición en planta, PPI, uno de los productos de radar más comunes, tiene el inconveniente de su difícil interpretación puesto que representa mediciones a mayores niveles atmosféricos conforme la distancia radial aumenta (suponiendo el ángulo de elevación $\phi \geq 0$). La posibilidad de almacenar una representación digitalizada de las mediciones realizadas en barridos anteriores, permite corregir este problema generando un producto que efectivamente

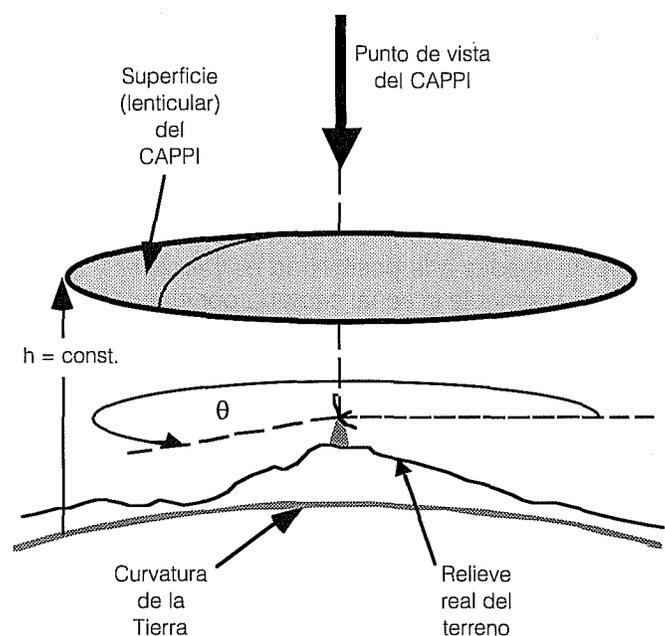
representa mediciones a un nivel atmosférico constante (sobre el nivel del mar) llamado PPI de altitud constante, CAPPI (por sus siglas en inglés *Constant Altitude PPI*), (ilustración 1).

Esto se logra realizando barridos PPI sucesivos con ángulos de elevación cada vez mayores y almacenando la porción de los datos que corresponden al nivel atmosférico de interés. Después de esto, la computadora de control y procesamiento reconstruye las mediciones que se hubieran obtenido si la antena hubiera barrido a una altitud constante, (ilustración 2).

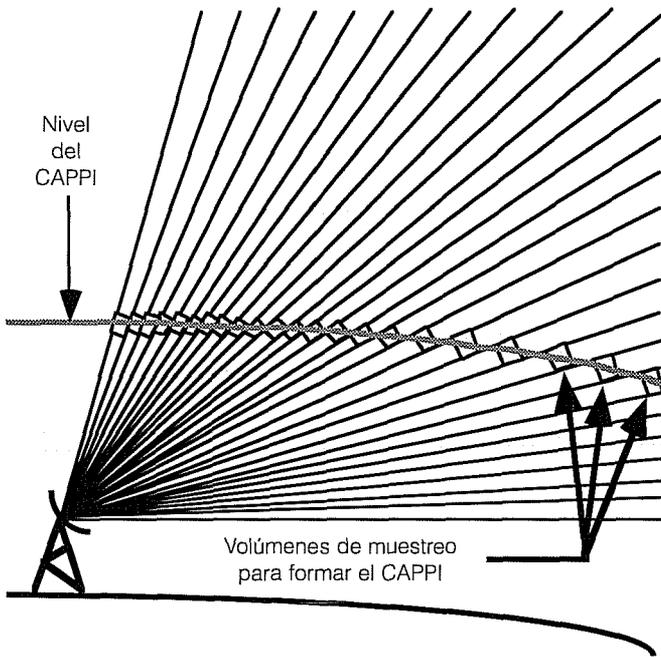
Es importante observar que un radar analógico, incapaz para almacenar información, aunque sea por un breve lapso, no puede obtener el producto CAPPI porque este requiere de varias revoluciones de la antena para ser formado; por esta misma razón la frecuencia con la que se puede obtener, de seis a diez por hora, es menor a la de un PPI. El despliegue del producto CAPPI ocurre en una pantalla completamente similar a la descrita para el indicador de posición en planta.

El CAPPI más bajo, permitido por el relieve del terreno en una cierta zona, es el de mayor interés desde el punto de vista hidrológico, pues mide la precipitación más cerca de la superficie del terreno. Hoy en día el CAPPI es el producto de radar más común. Vale la pena recordar que el CAPPI, aunque representa mediciones a altitud constante, no mantiene la misma resolución para toda distancia radial, es decir, sigue sufriendo de la misma degradación en resolución que el resto de las mediciones de radar.

1. Esquema de definición del CAPPI



2. Construcción del CAPPI a partir del barrido del radar



PseudoCAPPI

En forma inversa al producto anterior, un producto muy socorrido para propósitos hidrológicos (entendiéndose como estimación de lluvia en tiempo real), es el llamado pseudoCAPPI, nomenclatura que aún no se encuentra totalmente estandarizada. Como su nombre lo indica es similar a un CAPPI pero para cada posición (r, θ) se almacena el valor de reflectividad (no la altitud) del eco más bajo disponible. Este es el producto que idealmente debería representar mejor a la lluvia efectivamente ocurrida sobre tierra. Su forma de despliegue es similar a la del PPI o CAPPI (intensidad de ecos en el plano (r, θ)).

Tope de ecos

Un producto moderno muy utilizado es el tope de ecos, que no representa la medición de reflectividad en sí, sino la altitud a la que los ecos más altos fueron detectados. Su obtención requiere del procesamiento de múltiples barridos PPI.

Para cada celda de medición en planta (definida por las coordenadas r y θ de su centro) se almacena la altitud a la que se detecta el eco discernible más alto conforme avanzan los barridos. Al finalizar, dichas altitudes $h(r, \theta)$ son desplegadas en pantalla en forma similar a un PPI o a un CAPPI.

El tope de ecos es, de alguna manera, comparable con las imágenes de satélite infrarrojas, que representan las temperaturas (e indirectamente las altitudes) de los topes de nube. Sin embargo el tope de ecos representa la altitud de los ecos, presumiblemente precipitación pluvial, no necesariamente de las nubes como en el caso de las imágenes de satélite.

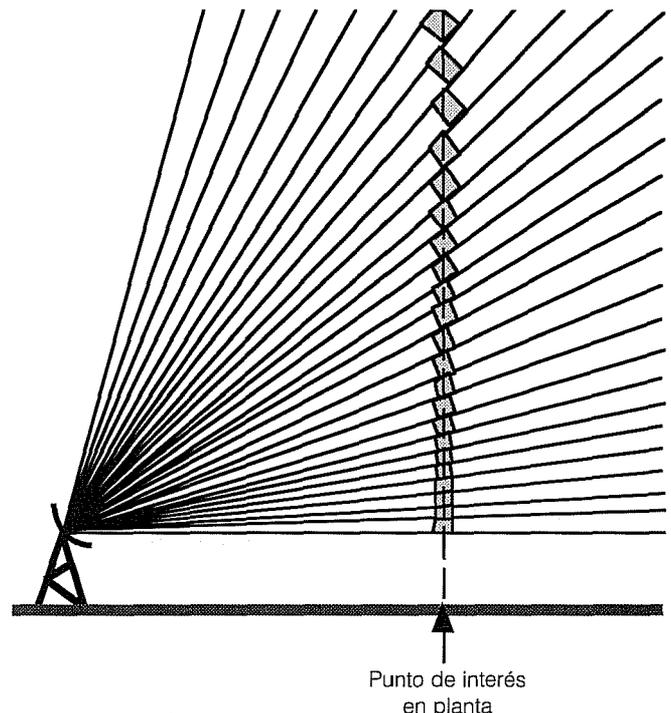
La altura alcanzada por las nubes convectivas es un índice de su precipitación potencial, generándose las máximas intensidades de lluvia para nubes con topes muy altos (hasta de 10 o 12 km sobre el nivel del mar).

Integración vertical de la precipitación

Es común también un producto llamado integración vertical de la precipitación que intenta evaluar los volúmenes de agua disponibles en una tormenta. Como su nombre lo indica es la acumulación vertical para cada una de las celdas (r, θ) de la precipitación (obtenida a partir de la reflectividad) a diferentes niveles, (ilustración 3).

Si se tienen secuencias de barridos volumétricos en el tiempo (o alternativamente secuencias de varios CAPPI o pseudoCAPPI) se pueden obtener productos de lluvia acumulada durante un cierto lapso. Obviamente esta lista no es exhaustiva, muchas otras combinaciones son interesantes para diversos propósitos.

3. Construcción del producto integración vertical de precipitación



Barrido volumétrico

A estas alturas es obvio que para obtener productos no directos o procesados del radar se requiere de un conjunto de barridos PPI. Si la capacidad de control y procesamiento de la computadora lo permite, el mecanismo de operación más eficiente es el barrido volumétrico que no es otra cosa que un conjunto de barridos PPI organizados y almacenados en un volumen que incluye la totalidad del alcance nominal del radar.

El barrido volumétrico toma el mismo tiempo que un CAPPI (del orden de diez minutos) pero permite generar una gran variedad de productos procesados de radar. Por ejemplo, una vez almacenadas las mediciones de un barrido volumétrico, un RHI podría obtenerse simplemente como un corte radial (en el plano (r, ϕ)) específico de dicho volumen de datos, un CAPPI sería un corte sobre el plano (r, θ) de la altitud deseada.

Puesto que un barrido volumétrico incluye todas las mediciones realizables por el radar, cualquiera de los productos puede ser generado a partir de él. Su mayor desventaja como herramienta de operación rutinaria es el volumen de almacenamiento que requiere. Por ejemplo un barrido volumétrico de reflectividad de 8 bits (256 niveles distintos) con celdas de 1 km x 1° en planta y el equivalente a diez capas atmosféricas y un alcance nominal de 230 km generaría del orden de ¡828 000 bytes cada diez minutos!

La existencia de barridos volumétricos permite la generación de muchos otros productos como cortes arbitrarios a través del volumen, por ejemplo verticales pero no necesariamente pasando por el origen.

La versatilidad del barrido volumétrico lo hace el producto preferido para propósitos de investigación y desarrollo y conforme evolucionen los medios de almacenamiento masivo probablemente se convierta en el mecanismo de archivo más usual.

Aunque no es común en el medio operativo, la visualización directa de los volúmenes (no de cortes bidimensionales) permite la mejor interpretación de fenómenos y aumenta la *intuición meteorológica* del usuario, por lo que es probable que paulatinamente se implante en sistemas comerciales futuros.

Componentes de un radar meteorológico moderno: procesamiento y control digital

Los componentes internos del transmisor, receptor, procesador y de la consola de control de un radar meteorológico moderno son similares a los de un radar tradicional ya descritos en el texto e ilustración 1 del

capítulo anterior. La importante diferencia es que muchos de los primeros cuentan con tecnología electrónica digital.

El transmisor es la parte que ha experimentado menos cambios ya que, la potencia de la señal enviada (en el orden de centenas de kW) obliga a utilizar electrónica analógica. La señal retrodispersada por los ecos atmosféricos se digitaliza en el momento de su recepción en una etapa temprana del procesamiento, y de ahí en adelante se manejan con electrónica digital, es decir como una aproximación discreta de la señal continua originalmente recibida.

Una parte de este proceso se realiza en los componentes del radar y otra en las computadoras digitales de uso genérico (usualmente del tipo estación de trabajo o microcomputadoras de alto poder). Para el operador del radar, el cambio más obvio entre los radares antiguos y los modernos se presenta en la consola de control.

Casi sin excepción, las consolas de control actuales son virtuales, es decir, no existen como un objeto físico en realidad, sino que son simuladas mediante un *software* en microcomputadoras de uso genérico. Los antiguos botones, perillas, interruptores y pantallas de despliegue se presentan ahora como gráficas en la pantalla de la computadora y el operador interactúa con estos controles a través de un dispositivo apuntador o *ratón*, o puede cambiar el programa del radar (de barrido PPI a barrido RHI, o de modo de reflectividad a modo *Doppler*, por ejemplo) estableciendo los parámetros en pantalla. La computadora envía las nuevas instrucciones al radar para ser ejecutadas apenas esto sea posible.

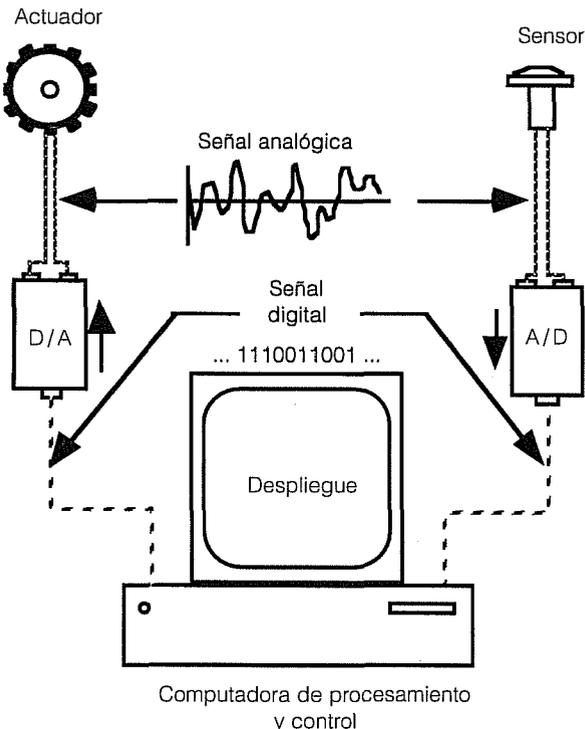
Además de la disminución del costo, una de las mayores ventajas de los equipos modernos es que, dado que las comunicaciones entre sus componentes son más afines a una red de computadoras, es perfectamente posible instalar la máquina de despliegue y control en un sitio diferente al de la antena y la electrónica de alta potencia, lo que permite colocar los radares en los sitios idóneos sin las restricciones del difícil acceso, la habitación para los operadores y las condiciones climáticas moderadas.

El operador-administrador de los equipos puede encontrarse a decenas de metros o a centenas de kilómetros del sitio sin que sus funciones se vean alteradas. Obviamente, las tareas de operación y mantenimiento se siguen realizando en cualquier situación y siguen requiriendo múltiples condiciones (electricidad, enlace de telecomunicación, etc.). La posibilidad de transmitir información digital a grandes distancias, sin degradación alguna en el contenido de la señal, ha permitido esta importante mejora.

La evolución de los radares puede compararse con la ocurrida en los laboratorios (de hidráulica por ejemplo). Las mediciones analógicas realizadas por los múltiples transductores (medidores de presión, de gasto, de nivel del agua, de concentración, etc.) son pasadas a través de un *convertidor analógico a digital* para procesar la información eficiente y económicamente usando equipos de cómputo genéricos, desplegarla, analizarla, si el caso lo requiere tomar decisiones con base en ellos, calcular el nuevo estado requerido para los instrumentos (compuertas, válvulas, bombas, etc.), generar las instrucciones digitales de control, pasarlas a un *convertidor digital a analógico* y enviarlas como señales analógicas a los actuadores de dichos instrumentos, todo ello en línea y continuamente, (ilustración 4). Sólo es necesario recordar que, en este caso, el laboratorio es la atmósfera terrestre en general, que no se tiene control sobre sus condiciones y que por ello la interpretación de las mediciones puede ser compleja.

Una posible mejora en los radares meteorológicos, aún en estado de experimentación, es la sustitución de las antenas parabólicas provistas de control electromecánico, por antenas de estado sólido que prácticamente eliminan las partes móviles. Esta nueva tecnología pretende dirigir el haz de radar en un cierto rango de direcciones sin necesidad de girar, físicamente, la antena.

4. Similitud con la instrumentación moderna de un laboratorio



Despliegue, almacenamiento y transmisión digital

La parte del procesamiento de la señal elaborada anteriormente por medios analógicos, se realiza hoy en día, al menos parcialmente, en el ámbito digital con sus herramientas equivalentes. En esta sección trataremos aspectos del procesamiento adicional, que se realiza en equipos modernos, de gran importancia en la comprensión e interpretación adecuada de los productos de radar.

Iniciamos con el equivalente digital de la señal analógica que representa la reflectividad medida como una función de distancia radial, ángulo de azimut y ángulo de elevación. Por ejemplo un PPI sería una secuencia de valores $z(r, \theta; \phi)$ donde ϕ permanece constante; de la misma forma para un barrido RHI sería una secuencia de valores $z(r, \phi; \theta)$ con θ constante y para un barrido volumétrico sería $z(r, \theta, \phi)$.

Los antiguos métodos de despliegue estaban orientados a este tipo de sistema coordenado (esférico) pero el paso a computadoras digitales estándar hace más conveniente guardar la información en un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, h) , donde $x=0, y=0$ representa la posición en planta del radar y h es la elevación sobre el nivel del mar. De hecho, la generación de productos procesados, como el CAPPI, requieren necesariamente de esto, pues representa información del tipo $z(r, \theta; h)$.

Los sistemas modernos usualmente realizan como parte de su procesamiento una transformación a un sistema coordenado cartesiano, donde en el caso más general, el del barrido volumétrico, la medición de reflectividad queda manifestada como $z(x, y, h)$. Obviamente, dicha transformación requiere de un algoritmo de interpolación entre los voxeles, o los pixeles volumétricos, del sistema esférico al sistema cartesiano, mismo que puede implantarse de diversas maneras: asignar el valor del voxel más cercano, promediar voxeles cercanos, interpolación lineal, etcétera.

Independientemente de cómo se haga, el resultado en coordenadas cartesianas, donde los voxeles tienen forma de paralelepípedo, usualmente disponible para el usuario o analista, no hace obvia la variación de resolución de las mediciones con la distancia radial. Este efecto se oculta debido a que las celdas volumétricas en que la reflectividad es reportada tienen igual dimensión respecto de cualquier distancia del radar.

Debemos recordar que esta transformación es un artificio computacional conveniente para su almacenamiento y despliegue eficiente en equipo convencional, pero que las mediciones mismas de las que provienen tienen una degradación importante en resolución al aumentar la distancia al radar.

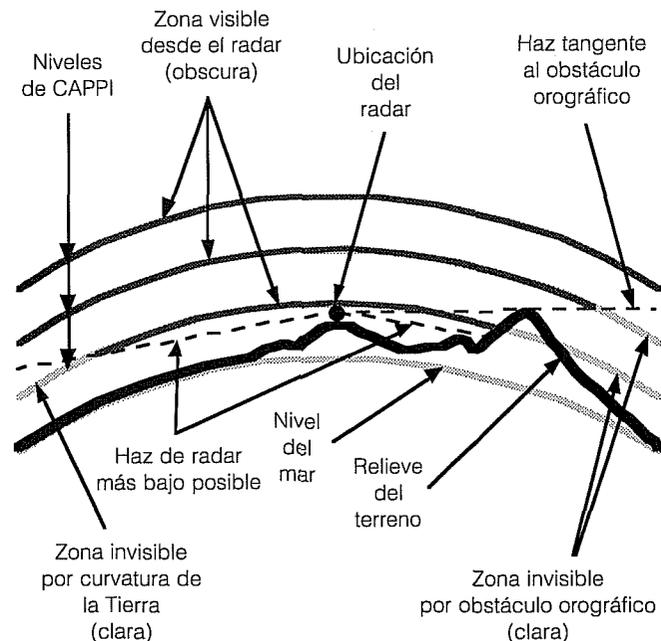
La lección clara para el usuario es que, no importando que los pixeles de su producto aparezcan uniformes en tamaño, se resuelven detalles más pequeños cerca del radar que lejos de él. Considerar esto es muy importante en estudios de investigación y desarrollo en hidrología y meteorología que pretendan usar información de radar.

¿Qué pasa cuando el operador solicita del radar un producto en el que alguno de los pixeles o voxels no tiene valor porque su posición no está incluida dentro del alcance real del radar, digamos, debido a obstáculos orográficos? Ver ilustración 5 para el caso de un CAPPI a bajos niveles. Con los equipos modernos se puede realizar una búsqueda automática de los valores de reflectividad medidos que se encuentran cerca del pixel o del voxel faltante, de acuerdo a un cierto algoritmo y restricciones.

Lo anterior se hace con el ánimo de presentar una aproximación adecuada al producto que el operador solicita, pero al mismo tiempo oculta el hecho de que algunas zonas dentro del alcance nominal del radar son efectivamente invisibles para él.

Los radares antiguos siempre reportaban estas zonas sin eco; los radares modernos pueden llegar a reportar ecos en zonas invisibles. Este es otro de los casos en el que los instrumentos de mayor complejidad no excluyen al usuario o al operador de la obligación de comprender cómo se llega a dicho resultado. Estos algoritmos de búsqueda automática de valores veci-

5. Zonas invisibles al radar para los CAPPI de bajo nivel



nos puede desactivarse a voluntad, por lo que es una tarea fácil verificar qué tan afectado se encuentra un producto por este efecto.

La medición de reflectividad se encuentra codificada en 256 niveles, pero se acostumbra desplegarla en una gama de mucho menor cantidad a través de la asignación de colores a diversos rangos de dichos niveles. Se usan del orden de seis colores para productos de reflectividad (o precipitación) y 12 para campos de viento (en modo *Doppler*), además de los colores asignados a los mapas de referencia geográfica de fondo y anotaciones.

Usualmente la escala de colores asociada a la reflectividad es lineal y por lo tanto en productos de lámina de lluvia resulta logarítmica (ver primera parte). Es importante recordar que, para trabajos de investigación y desarrollo, la información codificada en los archivos de medición tienen mayor detalle (o resolución en reflectividad o lluvia) que la aparente que resulta de observar el producto en pantalla.

Con el almacenamiento y despliegue digital de productos de radar también se logra integrar, a manera de mosaicos, a productos de cobertura mayor a un radar individual, por ejemplo a nivel regional o nacional. Este tipo de productos integrados permite interpretar, de manera mucho más precisa, las características y la peligrosidad de fenómenos sinópticos que rebasan la cobertura de radares aislados. Esta integración se puede realizar también con imágenes de satélite y despliegue de mediciones puntuales en la superficie.

La imposibilidad de almacenar las mediciones hacía del radar un instrumento torpe para evaluar o estudiar condiciones o eventos históricos. La calidad de las calcas obtenidas de la pantalla o el detalle de los mensajes codificados (ver primera parte), permitían realizarlos sólo en forma muy burda.

Actualmente, el almacenamiento digital de la información en medios magnéticos permite crear un archivo de condiciones históricas de gran utilidad para estudios de calibración hidrológica de radares, análisis de riesgo, estudios climatológicos, soporte de toma de decisiones en casos de emergencia, etcétera.

Es importante considerar el volumen diario, relativamente alto, de datos generados por el radar y planear adecuadamente su archivo final. En una empresa de este tipo es esencial mantener suficiente versatilidad en el diseño inicial para permitir usos futuros no obvios en el momento actual o para propósitos de instituciones diferentes a la que administra el sistema.

En dicho diseño es importante no sólo considerar el alto costo de la obtención de las mediciones, sino el de la oportunidad perdida años después de no contarse con mediciones de suficiente versatilidad, fre-

cuencia o continuidad. Es muy recomendable también mantener un registro paralelo detallado de las condiciones de operación de los radares a través del tiempo.

Hemos hablado de las ventajas del almacenamiento permanente de información, pero la posibilidad del almacenamiento digital en memoria de mediciones de pulsos previos también presenta algunas. Una de ellas fue ilustrada brevemente en la primera parte: la posibilidad de considerar la atenuación de la energía transmitida y reflejada en su trayectoria a través de la atmósfera debido a las partículas de agua. Si la señal no pudiera almacenarse para ser procesada una fracción de segundo después, dichos algoritmos de cálculo de atenuación serían imposibles.

Finalmente, la manifestación digital de las mediciones implica grandes ventajas al considerar la facilidad con que puede transmitirse. Antiguamente los productos de radar detallados eran *sólo para los ojos del operador*. Las condiciones de los países en desarrollo impedían contar con un meteorólogo de radar disponible continuamente en cada una de las posibles ubicaciones de estos instrumentos.

Durante una emergencia, el experto podía observar sólo un radar de la red. Hoy en día, los archivos digitales del radar (que contienen cualquiera de los productos ya descritos) se transmiten sin degradación alguna en la calidad de la información, aún en un pro-

ceso de varios pasos, por ejemplo de la estación de radar a la oficina hidrometeorológica estatal, de ahí a la correspondiente oficina nacional e inclusive a centros con responsabilidad multinacional.

Obviamente, estas acciones no podían realizarse ni con el faccímil telefónico. La tecnología actual permite a un experto en hidrometeorología de radar (o de huracanes, o de algún otro fenómeno) observar, tal y como si él fuera el operador local, las mediciones realizadas en todos y cada uno de los radares de la red. Más aún, puesto que los radares son controlables remotamente, un solo responsable del seguimiento del fenómeno, puede mantener una política de operación congruente y eficiente en todos los radares de la red y aún realizar cambios al instante, dependiendo de la evolución del meteoro.

Al analizar las posibilidades de transmisión de información debe considerarse la calidad del enlace de telecomunicaciones, por ejemplo, el barrido volumétrico completo al que se hizo mención anteriormente (828 Kb) requeriría de una transmisión de cerca de 15 minutos sobre una línea limpia de 9 600 bps (mayor al tiempo que se requirió para hacer el barrido).

Mediciones a través del efecto Doppler

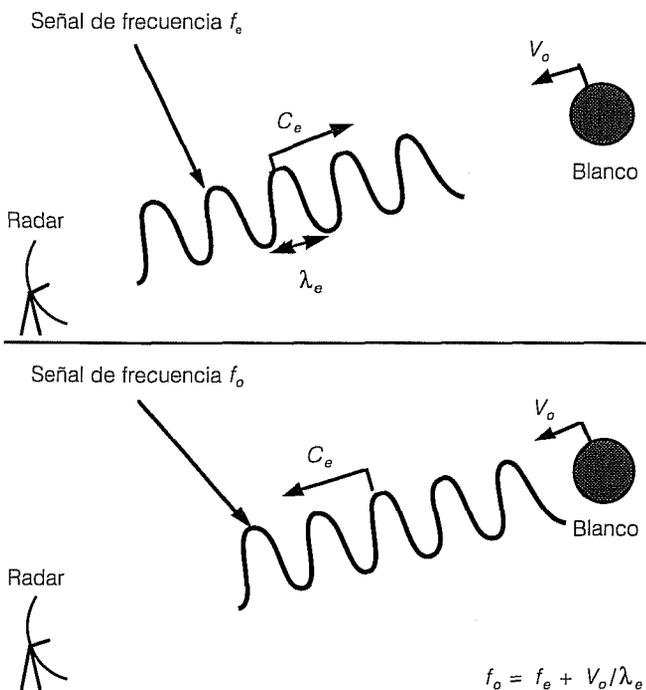
Hasta ahora hemos supuesto que las partículas de agua suspendidas en la atmósfera *reflejan* la energía recibida del radar. De hecho, el proceso no es precisamente así. La energía emitida por el radar viaja como un campo oscilatorio electromagnético, y al incidir sobre una partícula de agua, excita a sus moléculas, mismas que responden oscilando a dicha frecuencia y reemitiendo energía en todas direcciones, con una parte de ésta en dirección hacia el radar.

De esta manera, el comportamiento externo es similar a una simple reflexión, pero explicar el efecto *Doppler* en este caso particular requiere de una descripción más precisa.

Los radares meteorológicos modernos realizan mediciones de la velocidad a la que se mueven los ecos a través del uso del efecto *Doppler* que consiste en el aumento o disminución de la frecuencia de una señal oscilatoria al ser reflejada por un objeto que se acerca o aleja del transmisor-receptor, con respecto a la frecuencia original de la señal.

El efecto *Doppler* puede lograrse con cualquier tipo de señal oscilatoria, tanto sónica como electromagnética. Es común ejemplificar su existencia comparando el tono de una sirena emitida por una ambulancia al acercarse y al alejarse de la persona que escucha el sonido. Aunque la sirena emite un sonido a cierta frecuencia constante, mientras se acerca se oye más

6. Incremento de frecuencia de la señal reemitida con respecto a la original (efecto Doppler)



aguda (aumenta su frecuencia) y mientras se aleja se oye más grave (disminuye su frecuencia).

Para ser un poco más estrictos consideremos la situación esquematizada en la ilustración 6. Se emite una señal oscilatoria de frecuencia f_e (en ciclos por segundo o Hz). La celeridad a la que avanza la señal emitida es

$$C_e = \frac{\lambda_e}{T_e} = \lambda_e f_e$$

donde λ_e es la longitud de onda y T_e su periodo de oscilación. La frecuencia con la que llegarían crestas de la señal a un blanco inmóvil sería

$$f_o = \frac{1}{T_e} = \frac{C_e}{\lambda_e}$$

o sea, una cresta cada T_e segundos, por lo que sus moléculas serían excitadas, vibrarían y reemitirían una señal a la misma frecuencia f_e . En el caso de un blanco móvil avanzando hacia el emisor a una velocidad V_o , desde el punto de vista de un observador sobre dicho blanco (no consciente de estar sobre un blanco móvil), la velocidad de avance de la señal sería

$$C_e + V_o = \frac{\lambda_e}{T_e} = \lambda_e f_e$$

o sea, recibiría crestas a una frecuencia

$$f_o = \frac{1}{T_e} = \frac{C_e + V_o}{\lambda_e}$$

es decir, una cresta cada T_e segundos. Por lo tanto f_o sería la frecuencia a la que las moléculas serían excitadas, vibrarían y reemitirían la señal. Colocando a f_o en la forma

$$f_o = \frac{C_e}{\lambda_e} + \frac{V_o}{\lambda_e} = f_e + \frac{V_o}{\lambda_e}$$

es fácil identificar que la señal reemitida tendría un incremento de V_o/λ_e sobre la frecuencia de la señal original. Dado que el blanco puede ser considerado un emisor, un análisis completamente similar para el recorrido de regreso (del blanco hacia el radar) indicaría otro incremento de frecuencia V_o/λ_e . Por lo tanto, la señal finalmente recibida por retrodispersión del blanco tendría un incremento total de frecuencia

$$\Delta f = \frac{2 V_o}{\lambda_e}$$

con respecto a la originalmente emitida. Δf es precisamente el *corrimiento de frecuencia Doppler*.

Esto implica que f es proporcional a la velocidad del objeto reflejante con una constante de proporcionalidad perfectamente definida. Así pues, bajo estas condiciones, la medición del corrimiento de la frecuencia es una medida directa de la velocidad del objeto sin requerir ningún tipo de calibración. Esto también implica que el instrumento debe ser capaz de medir un corrimiento de la frecuencia sumamente pequeño con respecto a la frecuencia base de emisión. Como ejemplo, para banda S ($\lambda_e = 0.1\text{m}$) y velocidad de los blancos $V_o = 30\text{ m/s}$, $f_e = 3 \times 10^9\text{ Hz}$ y $\Delta f = 300\text{ Hz}$.

Afortunadamente la electrónica actual puede realizar satisfactoriamente esta tarea con base en la medición del corrimiento de frecuencia, no entre dos ondas individuales dentro del mismo pulso, sino entre ondas correspondientes en pulsos sucesivos. Muy importante es recordar que el *corrimiento de frecuencia Doppler* se encuentra asociado a la velocidad del objeto reflejante hacia (Δf positivo) o desde (Δf negativo) el emisor-receptor. Si el objeto se mueve sin acercarse o alejarse del instrumento (tangencialmente) no existe corrimiento alguno de la frecuencia.

En el caso de un radar meteorológico, los objetos reflejantes son una enorme cantidad de partículas de agua que se encuentran dentro del volumen de muestreo del radar, cada una de ellas moviéndose en diferente dirección y con diferente velocidad. Si las partículas son suficientemente pequeñas, se puede considerar que son arrastradas por el viento a su alrededor.

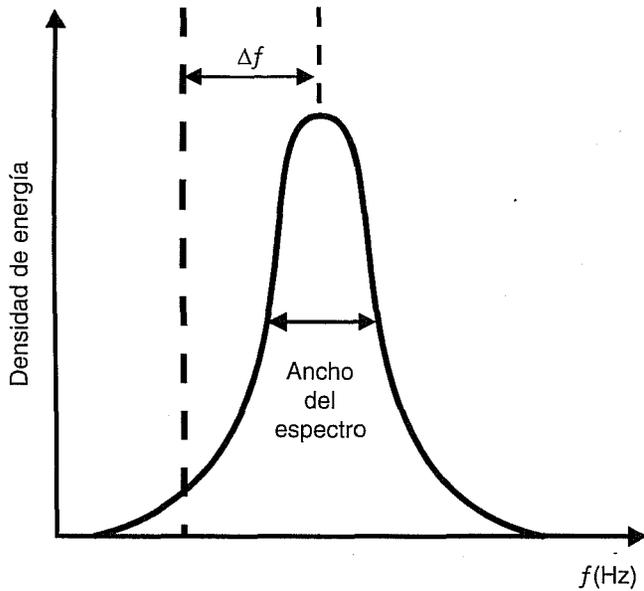
La señal recibida por el radar es una combinación de los reflejos individuales de cada una de las partículas en el volumen y el corrimiento de frecuencia se calcula en base a un análisis espectral de la señal, o sea analizando la distribución de energía en un rango de frecuencias alrededor de f_e .

Como se muestra en la ilustración 7, la velocidad del viento (radial) promedio en el volumen de muestreo se calcula del corrimiento de la frecuencia pico del espectro con respecto a f_e . Nuevamente, la medición del viento con el radar *Doppler* no es puntual, corresponde a un valor representativo de un volumen de la atmósfera.

Usualmente los pulsos electromagnéticos en modo *Doppler* de operación son más cortos que en modo de reflectividad por lo que la resolución radial es mayor. La degradación en la resolución transversal al haz con la distancia radial es tan significativa en este caso como en el de mediciones de reflectividad.

Entonces ¿Sólo podemos medir el viento en zonas de la atmósfera con precipitación pluvial? Afortunadamente, la medición *Doppler* es sobre la frecuencia de

7. Medición de la velocidad a través de la identificación del corrimiento entre la frecuencia emitida y la frecuencia pico del espectro recibido

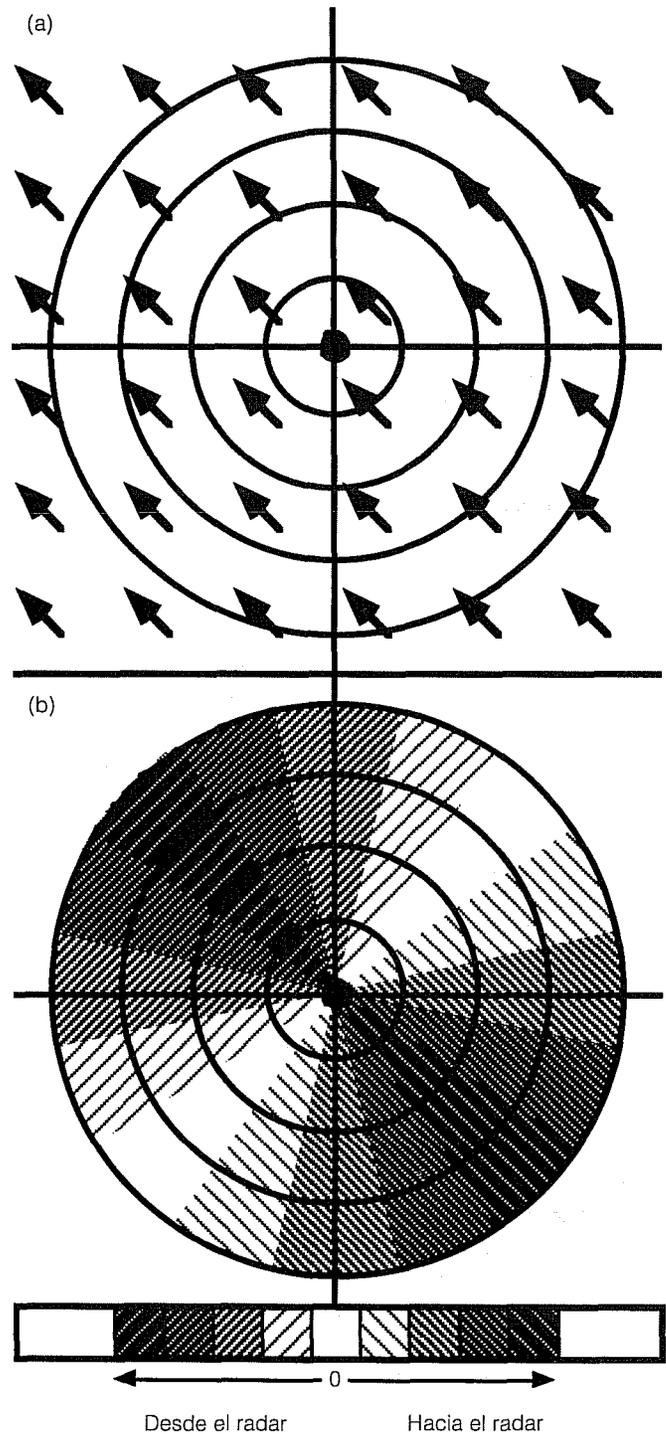


la señal, no sobre su amplitud, y en general es necesario que solamente existan ecos que rebasen el umbral de sensibilidad del receptor para tener estimaciones del viento. Así pues, es común que tanto partículas de agua como otro tipo de partículas suspendidas en la atmósfera proporcionen ecos suficientemente grandes dentro de la cobertura nominal en modo *Doppler* (usualmente $r \leq 120$ km) para poder medir el viento.

El lector sagaz se cuestionará inmediatamente qué tan razonable es suponer que las gotas de agua que están precipitándose son buenos trazadores del movimiento del viento. De hecho, no lo son (por ejemplo con velocidades de descenso de entre 10 y 20 km/h). Sin embargo debemos considerar que el radar meteorológico opera usualmente con ángulos de elevación muy pequeños, como máximo de unos cuantos grados, por lo que la velocidad de descenso de las gotas de agua aporta muy poco al componente de la velocidad en dirección radial. Es por ello que las gotas, aún precipitándose, son buenos trazadores del flujo horizontal y el radar provee de buenos estimados de la velocidad del viento (horizontal) en dirección hacia o desde el radar.

El hecho de que la medición que se hace del campo de vientos a través de radar *Doppler* es exclusivamente del componente radial del mismo, hace de la interpretación, inclusive de casos simples, algo relativamente complejo que requiere experiencia por parte del operador o del usuario.

8. Representación de un campo de vientos completamente uniforme (superior) en la pantalla de un radar *Doppler* (inferior). En un radar real aparecería en colores



Presentamos aquí sólo el caso más simple imaginable, un producto CAPPI de un campo de vientos con dirección y magnitud constante, como el que se muestra en la sección *a* de la ilustración 8. El despliegue de dicho producto en modo *Doppler* aparecería como se ilustra en la sección *b* de la ilustración 8. Como puede observarse, la magnitud total de la velocidad del viento es capturada sólo para el azimut de donde viene (SE en el ejemplo) y hacia donde va el viento (NW en el ejemplo). De hecho, para los ángulos de azimut perpendiculares a la dirección del viento (SW y NE en el ejemplo), la medición indica un valor nulo (o sea el viento es tangencial).

En principio, los productos mencionados (CAPPI, pseudoCAPPI, tope de ecos, integración vertical de la precipitación, barridos volumétricos) pueden ser obtenidos para modo *Doppler*, es decir que los colores en pantalla indican diferentes rangos de velocidad radial del viento.

Productos de turbulencia

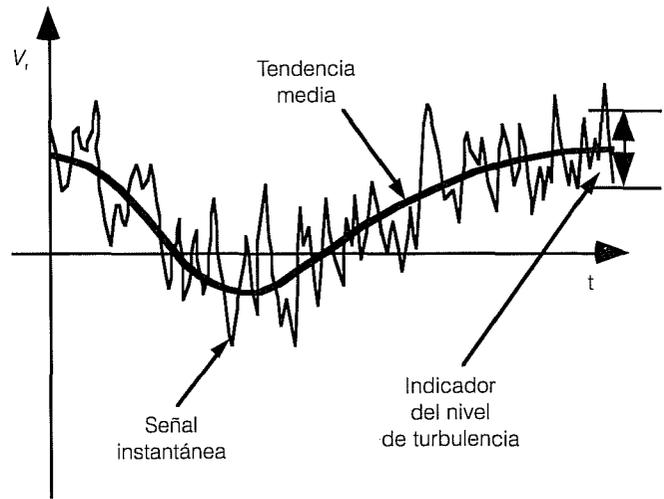
Denominamos turbulencia a todos aquellos movimientos, aparentemente caóticos, del aire atmosférico que varían alrededor de un cierto flujo (aparentemente no caótico) al que llamamos flujo medio. En realidad, lo que llamamos flujo medio y turbulencia es estrictamente cuestión de la escala de nuestro enfoque, y en ningún lugar es esto más obvio que en la atmósfera.

La turbulencia global se manifiesta como ciclones a anticiclones que producen flujos medios a la escala de una aeronave y lo que puede ser turbulencia para una aeronave es el flujo medio para un insecto. Dado el volumen de muestreo al que corresponden las mediciones *Doppler* de radar, es claro que, en este contexto, turbulencia es considerado todo flujo atmosférico de una escala igual o menor a la de dicho volumen, o sea aquellos flujos que arrastran a los diferentes blancos dentro del volumen de muestreo a velocidades y en direcciones diferentes. Las variaciones de velocidad detectadas entre pulsos, contra aquellas detectadas como ancho espectral para un solo pulso, son las de mayor escala e igual a la del volumen de muestreo.

Cualquier instrumento que mida con alta frecuencia a la velocidad de flujo puede funcionar como un indicador de turbulencia, ya que esta se manifiesta a través de variaciones del flujo instantáneo alrededor de lo que aparece como un flujo medio, como se aprecia en la ilustración 9.

De manera burda podemos identificar en una cierta porción (que define la escala) de una señal la velocidad media (no necesariamente una constante, ilustración 9) como la tendencia central y el nivel de turbu-

9. Identificación de velocidad media y nivel de turbulencia a partir de una señal de velocidad instantánea



lencia como la desviación estándar alrededor de la tendencia central.

El radar, midiendo la velocidad instantánea centenas de veces por segundo, no es la excepción y operando en modo *Doppler* puede obtener productos indicadores del nivel de turbulencia en diferentes regiones de la atmósfera dentro de su volumen de cobertura. A una escala *subvolumen de muestreo*, la alta turbulencia se manifiesta en la presencia de energía de la señal recibida distribuida en un rango mayor de frecuencias, es decir, en un mayor ancho del espectro (ilustración 7).

Es obvio que la medición del nivel de turbulencia a través del efecto *Doppler* está asociada únicamente con las fluctuaciones de la velocidad en dirección radial pero, en la mayoría de los casos, esto no significa un problema de falta de representatividad del nivel de turbulencia general (en todas direcciones).

Dado que la escala a la que dicha medición de turbulencia se realiza está pobremente definida, los productos de turbulencia de radar deben ser considerados únicamente como indicadores relativos de la misma, es decir, una comparación cualitativa de los niveles de turbulencia entre diferentes regiones o instantes.

Nuevamente, los productos de radar mencionados se solicitan mostrando el nivel de turbulencia a través de distintos colores en pantalla. La identificación de niveles de turbulencia, característicos de ciertos fenómenos meteorológicos, en combinación con otro tipo de mediciones, pueden producir eventualmente algoritmos de identificación automática de dichos fenómenos a través de radar.

Minimización de ecos fijos

Los radares modernos tienen varias formas de eliminar los ecos fijos (provenientes de objetos inmóviles que no son parte de la atmósfera) que son los principales efectos que dificultan la correcta interpretación meteorológica de los productos de reflectividad, debido a que pueden confundirse con ecos meteorológicos o porque con su intensidad opacan ecos meteorológicos reales que se encuentran en las mismas zonas. Sin embargo, ninguno de estos mecanismos es perfecto, por lo que es más honesto denominarlos mecanismos de *minimización* de ecos fijos:

- Primer mecanismo. El radar, en modo *Doppler*, se encuentra midiendo la velocidad de los ecos además de su reflectividad. Se puede establecer una banda angosta de velocidades alrededor de cero que identifiquen ecos inmóviles y ser supuestos por el procesamiento interno del radar como ecos fijos que son automáticamente eliminados del producto. Esto implica operar el radar alternativamente (o simultáneamente) en modo de reflectividad y en modo *Doppler*. Si se mide reflectividad con los pulsos correspondientes al modo *Doppler* (usualmente más cortos) a través de dos receptores independientes, se puede determinar simultáneamente la velocidad y la reflectividad, pudiendo aplicarse este tipo de filtro directamente. A esta operación combinada, a veces se le denomina con el confuso nombre de reflectividad *Doppler*. Sus desventajas son que depende de velocidades radiales, es decir, puede llegar a eliminar ecos atmosféricos que se mueven en dirección tangencial. Además, su rango de aplicación es exclusivamente el del modo *Doppler* de operación ($r \leq 120$ km).
- Segundo mecanismo. Contempla la señal que producen los blancos fijos compuesta por innumerables reflejos individuales dentro del volumen de muestreo, pero todos ellos a la misma frecuencia (sin corrimiento de frecuencia *Doppler*). Esto implica un espectro de la señal más concentrado o con menor ancho. Existen algoritmos que diferencian los ecos fijos de los atmosféricos con base en esta diferencia en el espectro de la señal recibida.
- Tercer mecanismo. Se fundamenta en mascarillas de ecos fijos conocidos, con las que estos se eliminan antes de desplegarlos. Las mascarillas se forman analizando mediciones de reflectividad en días claros (sin ecos meteorológicos), preferiblemente un conglomerado de estos. Su mayor ventaja es no necesitar la capacidad *Doppler* para su aplicación. Sin embargo, requieren de mascarillas diferentes para

cada producto usual y hace la fuerte suposición de que ni las mascarillas ni los productos a corregir se encuentran afectados por propagación anómala (que podría colocar ecos fijos en posiciones inusuales).

Es importante recordar que, además de que los mecanismos mencionados no son perfectos, de hecho se orientan a eliminar los ecos fijos, no necesariamente todos los ecos falsos. Polvo o insectos en la atmósfera seguirán apareciendo como meteoros. Uno de los casos donde se muestran claramente insuficientes, es el de radares de rastreo de tormentas marinas (huracanes, por ejemplo), mismos que por su función observan hacia el mar.

El oleaje sobre la superficie marina, precisamente en eventos extremos, puede ser de gran magnitud, producir fuertes reflejos de la energía del radar (por sus superficies y por el denso aerosol de agua que se suspende en la parte baja de la atmósfera) y con ello *contaminar* significativamente las mediciones.

Puesto que el oleaje completamente desarrollado viaja a velocidades iguales a las del viento que lo produce y genera ecos fuertes de posición variable, los mecanismos antes mencionados resultan completamente inútiles en este caso.

Doblamiento de frecuencias

Uno de los principios fundamentales de la disciplina del procesamiento digital de señales establece que el rango de frecuencias sobre el que un análisis espectral puede identificar energía en la señal, se encuentra limitado por la llamada *frecuencia de Nyquist* (asociada con la frecuencia de muestreo y la duración total de la muestra).

Puesto que las mediciones de velocidad en modo *Doppler* se realizan a través de corrimientos de frecuencia, esto se traduce en que las mediciones de viento a través del efecto *Doppler* están limitadas a un cierto rango preestablecido desde el diseño en el radar. Más aún, el rango de velocidades detectable puede ampliarse sólo sacrificando el alcance nominal en modo *Doppler*. Por ello, los diseñadores requieren realizar un compromiso entre rango de velocidades (inequívocamente) detectables y el alcance al que se pueden realizar las mediciones. Cuando las velocidades de viento reales rebasan dichos límites, las zonas que lo presentan muestran colores representativos de la parte opuesta de la escala de colores. Por ejemplo, si el rango medible es de -90 a +90 km/h, con colores azul oscuro representando el rango de -90 a -70 km/h y rojo oscuro representando el rango de +70 a +90 km/h, un viento positivo (hacia el radar) de 100 km/h

quedaría representado (erróneamente) en color azul oscuro, como si fuera un viento alejándose del radar.

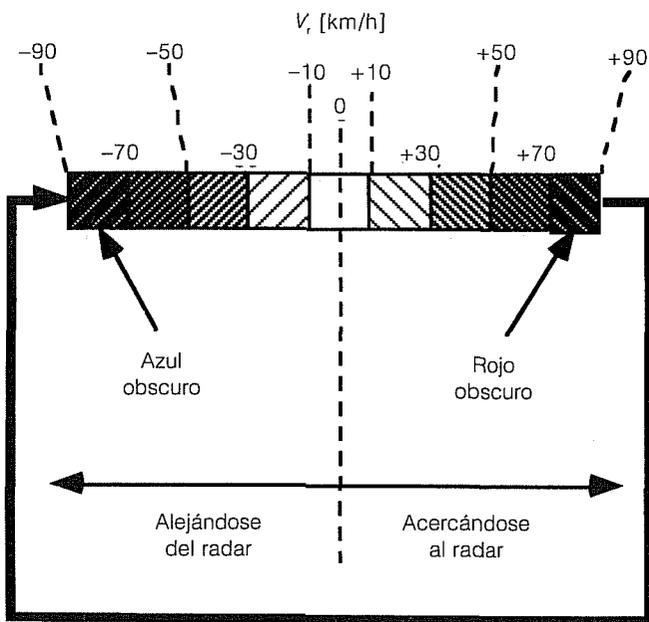
Gráficamente este efecto aparecería como una escala de colores circular, en la que una vez agotados los colores de alguno de los extremos de la escala, se regresa al extremo opuesto (ilustración 10). Este efecto que *confunde* las velocidades fuera del rango preestablecido con otras dentro de él es conocido como *aliasamiento* (traducción burda de la palabra inglesa *aliasing*), con el mismo significado que a la palabra *alias* se le da en el contexto policiaco.

Un poco de experiencia al respecto permite identificar este caso rápidamente pues se observan zonas con vientos encontrados discontinuos. En el ejemplo se presentarían zonas de color azul oscuro y rojo oscuro directamente como vecinas, sin intervención de la escala normal de colores entre estos dos extremos, (ilustración 11).

Reconstrucción del campo de vientos

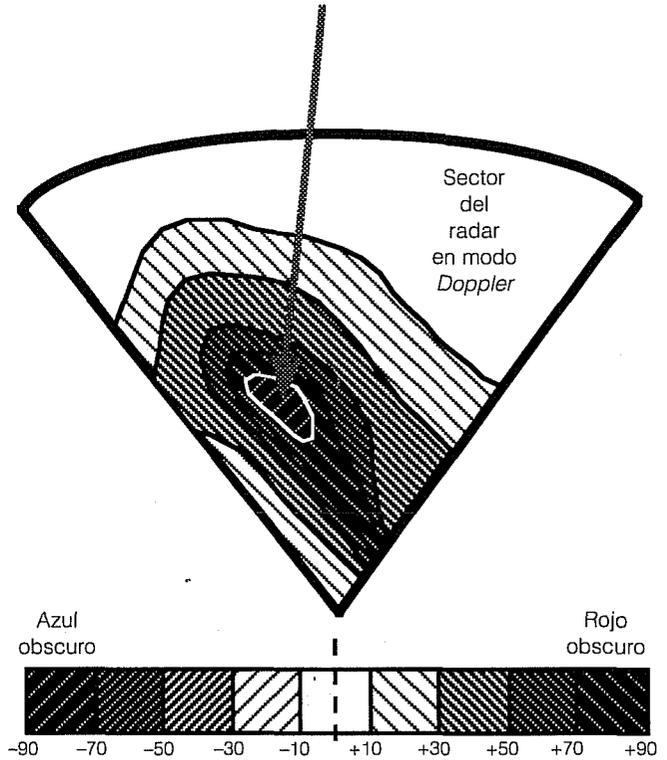
Si en un espacio tridimensional cubierto por tres radares *Doppler* (identificados por subíndices 1, 2 y 3) localizados en los puntos (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) y (x_3, y_3, z_3) respectivamente, estos miden (en modo *Doppler*) simultáneamente un volumen de muestreo cuyo centro corresponde a la posición (x_0, y_0, z_0) , cada uno estará midiendo la componente radial $(V_{i1}, i = 1, 2, 3)$ de un vector velocidad único V que tiene como componen-

10. Manifestación del doblamiento de frecuencias en la escala de velocidades de viento



11. Identificación intuitiva de problemas de doblamiento de frecuencias sobre el despliegue *Doppler* en pantalla

Zona con $90 < V_r < 110$ (hacia el radar erróneamente desplegada como $-90 < V_r < -70$ (alejándose del radar)



tes en el marco de referencia cartesiano a (V_x, V_y, V_z) . Los vectores que van del punto de medición a cada uno de los radares están definidos por las componentes

$$R_i = \{x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0\} \quad i = 1, 2, 3$$

que tienen una magnitud

$$|R_i| = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad i = 1, 2, 3$$

y por lo tanto los vectores unitarios correspondientes a las direcciones del blanco a cada radar están definidos por las componentes

$$\hat{r}_{xi} = \frac{x_i - x_0}{|R_i|}$$

$$\hat{r}_{yi} = \frac{y_i - y_0}{|R_i|} \quad i = 1, 2, 3$$

$$\hat{r}_{zi} = \frac{z_i - z_0}{|R_i|}$$

La medición de cada radar corresponde al producto punto entre el vector velocidad V (desconocido) y el correspondiente vector unitario desde el radar (conocidos a partir de la geometría del problema)

$$V_{ri} = V \cdot \hat{r}_i \quad i = 1, 2, 3$$

ecuación que colocada de otra forma establece tres ecuaciones lineales (en V_x, V_y, V_z)

$$V_{ri} = V_x \hat{r}_{xi} + V_y \hat{r}_{yi} + V_z \hat{r}_{zi} \quad i = 1, 2, 3$$

mismas que al resolverse definen al vector velocidad en el punto (x_o, y_o, z_o) . Puesto que este cálculo se puede repetir para cada uno de los puntos cubiertos por los tres radares simultáneamente, tenemos un mecanismo para reconstruir el campo de vientos tridimensional en dicho volumen. En su interpretación, es necesario recordar que en zonas donde efectivamente hay precipitación, la velocidad vertical, V_z , representará más bien la velocidad terminal de precipitación de las gotas y no la componente vertical del viento. La granularidad con la que este cálculo tiene que realizarse no debe rebasar el orden de magnitud de la resolución de las mediciones del radar. Además, es necesario ser cuidadoso en zonas mal condicionadas para dar resultados de gran precisión.

Desgraciadamente, es muy poco común contar con radares *Doppler* tan cercanos uno a otro como para considerar lo anterior como una herramienta más allá de proyectos de investigación o de desarrollo, al menos en la época actual.

Si operamos con ángulos de elevación suficientemente bajos se puede considerar que la aportación de la velocidad vertical a las mediciones es despreciable (o alternativamente V_z se supone como nula o como la velocidad terminal de precipitación) y con ello se puede estimar el campo de velocidades bidimensional (en planos horizontales) utilizando únicamente dos radares *Doppler* cercanos. Más aún, si se tiene información adicional que permita estimar, ya sea la dirección o la celeridad del viento, un solo radar *Doppler* puede ser utilizado para obtener la otra incógnita (la celeridad o la dirección).

Esta información adicional usualmente proviene de estaciones puntuales de radiosondeo, globo piloto, sonda anclada, anemómetro en superficie, reporte aeronáutico, etc. y es necesario hacer fuertes suposiciones en cuanto a la uniformidad y permanencia del flujo. El hecho de que la reconstrucción del campo de vientos sea en planos horizontales, de ninguna manera lo restringe a uno solo de estos planos, pudiéndose obtener a varios niveles atmosféricos.

En resumen, la reconstrucción automática de campos de viento se encuentra por ahora en el ámbito de la investigación, el desarrollo y los estudios especiales, pero de ninguna manera es un objetivo inalcanzable. Es previsible que eventualmente estas mediciones y cálculos alimentarán a modelos numéricos de la fluidodinámica de la atmósfera a nivel mesoescala y microescala en forma rutinaria.

Clasificación de lluvias a través de doble polarización

¿Es posible detectar el tipo de precipitación (lluvia, granizo, nieve) utilizando mediciones de radar? Esta capacidad, necesariamente se encuentra sujeta a la posibilidad de medir una señal reflejada por los blancos que presentara una diferencia característica entre los varios tipos de precipitación. El mecanismo más común, aunque existen otros como la longitud de onda múltiple, es el de doble polarización.

La polarización de un campo electromagnético indica la orientación de los campos eléctrico y magnético que lo componen, mismos que son ortogonales entre sí. Por convención se utiliza la orientación del campo eléctrico para definir la polarización del campo electromagnético completo.

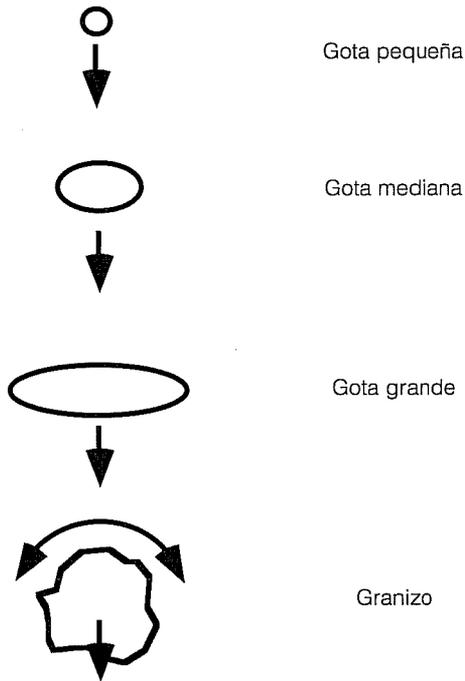
Los radares con doble polarización (u otras variantes como múltiple polarización, polarización circular, etc.) contienen dispositivos que cambian la orientación del campo electromagnético entre un pulso y otro con el propósito de emitir señales a las que los blancos son más o menos sensibles de acuerdo a su geometría. Los radares de doble polarización sólo utilizan las orientaciones horizontal y vertical.

Debido a las fuerzas que actúan sobre ellas, las gotas de agua en precipitación no son esféricas, ni mucho menos (como normalmente se ilustran) alargadas en el sentido vertical. Por el contrario, es más grande en el sentido horizontal que en el vertical. Esta asimetría se acentúa conforme más grandes son las gotas y mayor velocidad descendente que alcanzan. Así pues las gotas muy pequeñas tienden a ser casi esféricas y las muy grandes muy aplanadas, (ilustración 12).

Una partícula esférica responde igualmente a la excitación electromagnética de polarización horizontal y vertical, mientras que una partícula más bien larga responde con mayor retrodispersión a excitación de polarización horizontal que a la de polarización vertical.

Si el radar emite alternativamente pulsos de polarización horizontal y vertical y tiene la capacidad de procesar en conjunto los ecos recibidos (por ejemplo como la relación de reflectividades provenientes de pulsos de polarización horizontal y vertical, Z_H/Z_V), mos-

12. Diferencia de forma de partículas de precipitación de acuerdo a su tamaño o a su estado



se puede clasificar el tipo de precipitación de acuerdo a la tabla

Z bajo	ZDR = 0	llovizna
Z alto	ZDR = 0	granizo
Z alto	ZDR > 0	aguacero intenso

Esta es una visión muy simplista; numerosos estudios realizados han propuesto otros parámetros de clasificación originados de mediciones con doble polarización, con límites más cuantitativos y precisos que permiten identificar las variantes de precipitación local típicas. Sin embargo prevalecen numerosas incógnitas acerca de su aplicación fuera de las zonas de estudio que les dieron origen.

La aplicación operativa de la doble polarización para clasificación de precipitación requiere de estudios locales formales y cuidadosos que podrían realizarse en las zonas donde el granizo produce daños importantes, tanto por el beneficio potencial que tendrían como por la disponibilidad de financiamiento por parte de los propios interesados.

Operación típica de un radar meteorológico moderno

Paradójicamente, aunque en los radares modernos es fácil modificar el programa de operación para ajustarse a la situación, lo típico es que operen continuamente bajo un solo programa: barrido volumétrico, quizá con alternancia entre el modo de reflectividad y el modo *Doppler*. Este barrido se puede repetir cada diez minutos por ejemplo.

Dado que el resto de los productos del modo en cuestión (reflectividad, *Doppler* o reflectividad con doble polarización) se pueden obtener del barrido volumétrico, los productos requeridos se pueden solicitar (local o remotamente) con sólo diez minutos de retraso, una vez que el barrido volumétrico haya finalizado.

La excepción a esta regla son los radares cuya computadora de control y despliegue no tiene suficiente capacidad para almacenar en memoria la totalidad de los datos correspondientes a un barrido volumétrico. En estos casos, el producto más común es el CAPPI a un nivel relativamente bajo de la atmósfera.

Nótese que la obtención de este producto también implica un barrido volumétrico, pero al finalizar cada revolución de la antena se descartan todos los datos que no correspondan al nivel del CAPPI solicitado. De todas formas la obtención del producto requiere de mediciones que se realizan en aproximadamente, diez minutos.

trará una marcada diferencia entre los blancos esféricos y los alargados. En el caso esférico la relación sería igual a 1, mientras en el otro sería mayor (o mucho mayor) a 1. Esto permitiría diferenciar entre el tamaño característico de las gotas en un cierto volumen de muestreo aún cuando la densidad de gotas en ambos casos fuera tal que produjera una reflectividad (de polarización única) igual. De hecho lo común es que en los aguaceros intensos las gotas sean grandes y produzcan reflectividades mucho mayores que en el caso de lloviznas.

Aunque las partículas de granizo (nos referimos al granizo de tamaño mayor que puede ser muy destructivo para las cosechas) no son necesariamente esféricas, descienden girando aleatoriamente. Así pues, un conjunto grande de ellos (como los que se encontrarían dentro del volumen de muestreo del radar) presentan una señal retrodispersa conjunta muy similar a la que producirían partículas completamente esféricas ($z_H/z_V \approx 1$). Por su gran tamaño también producen reflectividades altas.

Utilizando el producto de doble polarización más común, denominado relación de despolarización de la reflectividad o simbólicamente ZDR

$$ZDR = 10 \log_{10} \left[\frac{z_H}{z_V} \right]$$

Actualmente el controlador del radar no necesariamente se encuentra en el mismo sitio del radar, sino en el centro de toma de decisiones asociado a su uso, comúnmente la oficina central o local del Servicio Meteorológico Nacional. De hecho pueden existir varios usuarios simultáneos en diversos lugares, pero sólo uno puede dictar simultáneamente la forma de operación al radar. Si la computadora que funciona como el *servidor de productos de radar* tiene suficiente capacidad, diversas solicitudes pueden ser atendidas (casi) simultáneamente, sin requerir que el radar opere de manera diferente para satisfacer a cada uno de los posibles usuarios. Para distribución masiva de información de radar, un mecanismo eficiente es colocar periódicamente los productos más comunes en forma pictórica (ya como imágenes en formatos estándar) en una computadora que funciona como un *tablero de boletines electrónico* (BBS por sus siglas en inglés). Los usuarios pueden tener acceso a dicha información vía *modem* (o inclusive faccímil) sin utilizar recursos explícitos del servicio meteorológico correspondiente. Obviamente un BBS de este tipo es mejor explotado si incluye también información hidrometeorológica de otros tipos (boletines, mediciones en superficie, imágenes de satélite, etcétera.).

Relación con otros sistemas de medición

Desde el punto de vista del hidrólogo o del ingeniero hidráulico las mediciones de lluvia directas sobre la superficie del terreno han sido siempre su principal fuente de información en cuanto a precipitación pluvial.

Con el advenimiento de las estaciones automáticas y telemétricas las mediciones pueden realizarse con gran resolución en el tiempo, y ser concentradas en un centro de procesamiento y análisis en tiempo casi real, además representan mediciones directas de la variable de interés.

Siendo así ¿Porqué recurrir a radares meteorológicos? Esta disyuntiva no es fácil de resolver y aún produce acaloradas discusiones entre expertos. La realidad es que ambos métodos de medición son diferentes y más que competidores pueden identificarse como sistemas complementarios.

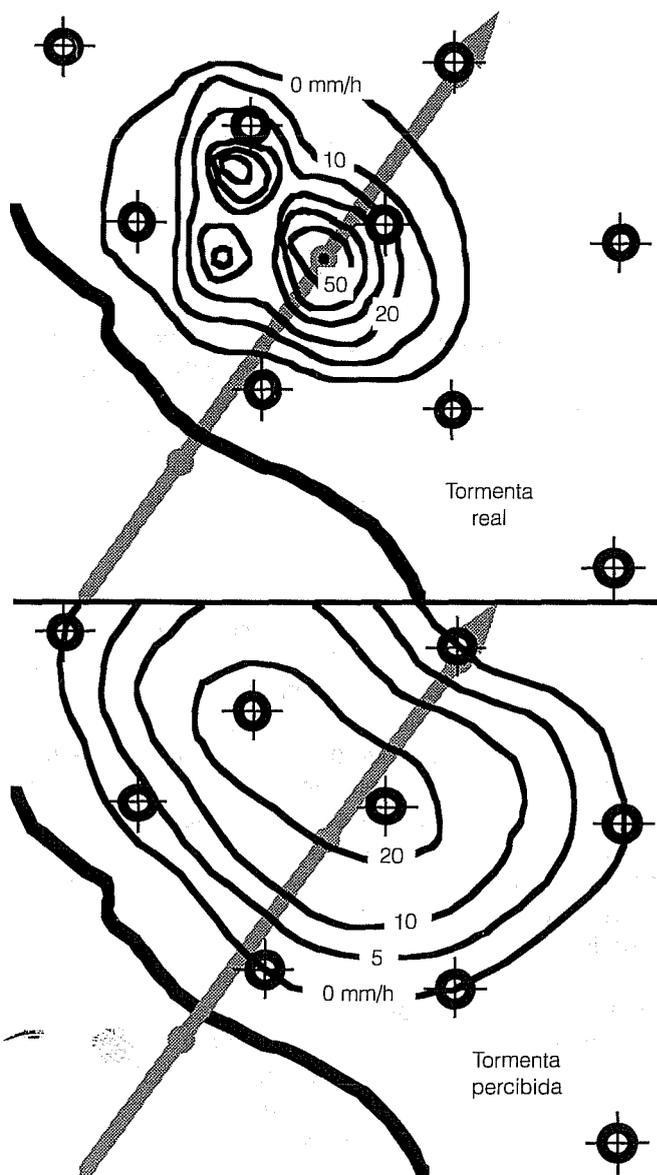
Las mediciones directas de lluvia en estaciones de superficie son mediciones puntuales. Cuando se utilizan para propósitos climatológicos (caracterización de condiciones típicas de una cierta región), considerando acumulados (o promedios) en largos intervalos (semanas, meses o años), los campos de precipitación resultan suficientemente suaves en cuanto a su distribución espacial como para ser adecuadamente representados por una red de mediciones puntuales a

través de un mecanismo de interpolación que produce un mapa de isoyetas.

Sin embargo, en aplicaciones de tiempo real, hidrología operativa y protección civil, la irregularidad espacial natural de la lluvia, tormenta por tormenta o en tiempos de acumulación cortos (del orden de minutos a horas), es tal que los mapas de isoyetas obtenidos de una red de estaciones en superficie son rara vez representativos de la realidad.

Por supuesto que esta aseveración depende del tipo de lluvia (sinóptica o celdas convectivas), de la

13. Percepción de una tormenta real con base en mediciones puntuales de una red de estaciones meteorológicas en superficie



densidad de la red de estaciones y de la uniformidad de parámetros fisiográficos pertinentes en la zona. Como un ejemplo sencillo se presenta el hecho de que una red de estaciones en superficie, separadas entre sí cada 30 km, podría ignorar celdas convectivas intensas con escalas en el orden de sólo unos 10 km, (ilustración 13). Obviamente, un radar meteorológico detectaría la estructura espacial de una tormenta como la de la ilustración 13 en forma mucho más detallada que la red de estaciones en superficie.

Existe además la cuestión de la relación beneficio costo de ambos tipos de sistemas. En forma ideal, si se tuviera un radar muy bien calibrado para estimar lluvia satisfactoriamente en un radio de 230 km con una apertura de haz de 1° y con resolución radial de 1 km, se podría considerar equivalente a una red (polar) de $360 \times 230 = 82,800$ estaciones automáticas en superficie. Sin embargo, la inversión inicial sería equivalente al costo de una red de tan sólo cien estaciones automáticas (separadas unos 40 km entre sí).

Aún bajo la óptica más realista en la que un radar es equivalente a una red de estaciones instaladas a intervalos de 20 km, si la distribución espacial detallada es de importancia, el radar meteorológico tiene ventajas de beneficio costo en relación a un sistema de mediciones en superficie.

Pero, bajo esta óptica ¿Por qué instalar estaciones automáticas de superficie? La respuesta más directa es que, aunque puntuales y poco representativas de su entorno (en el contexto instantáneo), las mediciones en superficie representan la verdad sobre el terreno, sin las múltiples incertidumbres de las mediciones de radar ya mencionadas, entre ellas la de medir a una cierta altura sobre el terreno.

Las estaciones automáticas permiten anclar las estimaciones de radar a valores reales puntuales. Más aún, sin ellas una calibración hidrológica del radar (o sea la obtención de la relación reflectividad a lluvia) sería imposible. Como se puede observar, estos dos sistemas son complementarios: el radar provee una distribución espacial confiable de la lluvia con alta incertidumbre en cuanto a su valor absoluto, mientras que las mediciones en tierra proveen valores únicamente puntuales confiables desde el punto de vista de su valor absoluto, pero poco representativos de su entorno instantáneo.

El otro sistema que puede competir con el radar en cuanto a estimación de lluvia en tiempo real es el de las imágenes de satélite geoestacionario meteorológico (la serie GOES para el continente americano). La visión que el satélite tiene de la atmósfera es desde arriba con muy poca penetración a través de la misma (algo en lo que el radar es excelente). Así pues, el sa-

télite GOES observa las partes superiores de las estructuras nubosas, ya sea en cuanto a la luz solar que refleja (banda visible) como a su altitud (a través de la temperatura en la banda infrarroja).

La banda de vapor de agua tiene cierta penetración y representa una medición de la humedad (no necesariamente nubes) en la parte superior de la atmósfera. Las imágenes tienen una periodicidad de 30 minutos y su resolución va aproximadamente de 4 km/píxel en banda infrarroja hasta 1km/píxel en banda visible.

Combinando las diversas bandas y procesando las imágenes para considerar los diferentes tipos de nubes, los factores externos a la imagen que pueden influenciar los registros de precipitación pluvial (orografía, acceso de aire marítimo húmedo, etc.) y otras mediciones meteorológicas, es previsible la obtención de estimaciones de lluvia útiles operativamente.

Sin embargo, los esfuerzos realizados hasta hoy en día han producido resultados con una incertidumbre mucho mayor a las mediciones de radar, sobre todo cuando se intenta hacer una estimación instantánea (en contraste con un acumulado durante intervalos largos). De hecho, los estudios conjuntos con satélite y radar muestran que los ecos de radar siempre se encuentran dentro de las zonas de alto potencial de lluvia identificables de las imágenes de satélite, pero estas últimas rara vez permiten una delimitación precisa de las zonas de lluvia.

¿Por qué utilizar imágenes de satélite entonces? Básicamente, por su cobertura hemisférica total y su costo de operación. Una estación de recepción de imágenes GOES, que tiene cobertura nacional, requiere una inversión de 1/10 de la que se necesita para un solo radar meteorológico de gran alcance. Además no se encuentra limitada a zonas terrestres o con islas suficientes para permitir cobertura marina como en el caso del radar.

De hecho, las imágenes de satélite son frecuentemente utilizadas en conjunto con los productos de radar para crear mosaicos de estimación de lluvia con cobertura nacional. Una densidad de radares tal que compita con la cobertura de satélite es alcanzable hoy en día por países desarrollados o por naciones isleñas o de muy pequeño territorio.

En conclusión, los tres sistemas de estimación de lluvias en tiempo real, realizables hoy en día, no compiten directamente uno contra otro; de hecho se complementan en diversos factores y son útiles en el proceso de calibración de los otros. De alguna manera se puede visualizar un sistema conjunto que utilice las imágenes de satélite para la gran visión (poco detalle y precisión), los radares meteorológicos para la distribución espacial de la lluvia y las estaciones automáti-

cas en tierra como anclas puntuales a valores absolutos confiables. Es previsible que en el futuro se tengan sistemas combinados de estimación de lluvia, retroalimentados entre sí y dotados de un mecanismo de calibración continua.

Aplicación hidrológica de radares meteorológicos

Independientemente de la gran utilidad de los radares en meteorología, su aplicación específica a fenómenos hidrológicos requiere de una calibración hidrológica que no debe ser confundida con la calibración electrónica.

La calibración hidrológica se refiere a la obtención de relaciones reflectividad a intensidad de lluvia, específicas para la zona de que se trata, para los mecanismos de generación de lluvias típicos e inclusive para diferentes épocas del año. Esta calibración puede inclusive absorber imperfecciones en los algoritmos de corrección por atenuación, bloqueo parcial del haz, reducción de la resolución al aumentar la distancia radial, etcétera.

Para realizar este proceso es necesario contar con una red de pluviógrafos con una resolución temporal en el orden de minutos. Por ejemplo las estaciones agrometeorológicas programadas para almacenar lámina acumulada cada hora, o los reportes sinópticos de observatorios cada tres horas no son suficientes. Además se requiere una densidad espacial, al menos en zonas limitadas, cercana a la resolución espacial del radar, digamos con una separación de 1 a 10 km entre pluviógrafos que rebase a cualquier red de observación hidrológica operativa, por lo que se requieren de zonas explícitamente instrumentadas para la tarea de calibración. Afortunadamente, no es necesario que dichos pluviógrafos sean telemétricos ya que el análisis puede realizarse *fuera de línea*.

Una vez que se tiene un radar calibrado hidrológicamente, es relativamente sencillo aplicar sus resultados a las tareas rutinarias del hidrólogo operativo. En países en vías de desarrollo se ha generalizado el uso de modelos de cuenca (lluvia a escurrimiento) que utilizan información pluviométrica sumamente elemental, por ejemplo láminas acumuladas en 24 horas que se consideran representativas de la lluvia en toda la cuenca o subcuenca, simplemente porque es el único dato con el que se cuenta.

Lo anterior no se debe, básicamente, a la falta de tecnología hidrológica más avanzada, sino a que es la única información pluviométrica con la que se ha contado. Los modelos son simplistas, no porque se desconozca la manera más compleja de modelar, sino

porque los datos disponibles no ameritaban el desarrollo e implantación de nuevos modelos.

Al entrar en operación un radar en la zona, súbitamente el hidrólogo operativo tiene a su disposición una mayor cantidad de información detallada sobre la precipitación pluvial que la que puede manejar. La manera más rápida de aplicar con ventaja esta información es a través del mismo tipo de modelo que ha demostrado ser útil en la zona pero dividiendo la cuenca en un número mucho mayor de subcuencas, mismas que pueden alcanzar dimensiones del orden de la resolución espacial del radar.

Sin embargo, la disponibilidad misma del radar puede llegar a motivar el desarrollo e implantación de modelos lluvia escurrimiento con características especiales que exploten específicamente sus peculiaridades.

Una gran ventaja del radar es que sus mediciones se encuentran disponibles continua y casi instantáneamente, en forma digital, en un centro de operaciones donde es relativamente sencillo conectar equipo de cómputo que opere los modelos lluvia escurrimiento. Obviamente, la importancia de utilizar el radar se magnifica conforme más pequeña o más urbanizada sea la cuenca, por sobre cuencas grandes que responden insensiblemente a lluvias cortas de limitada extensión (aunque muy intensas).

Si el tiempo de concentración en una cuenca se mide en días, el radar probablemente no será de máxima utilidad (o al menos existen otros instrumentos que lo pueden sustituir exitosamente), pero si se mide en horas (o minutos en zonas urbanas) la estimación de lluvia con radar no tiene competencia. Esta característica se manifiesta en la utilización preferencial del radar, en países desarrollados, para alertas sobre inundaciones relámpago.

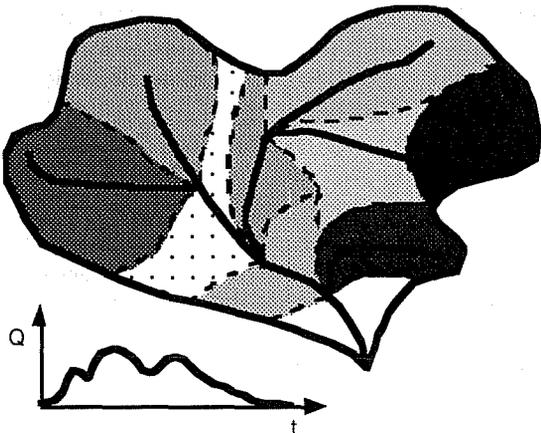
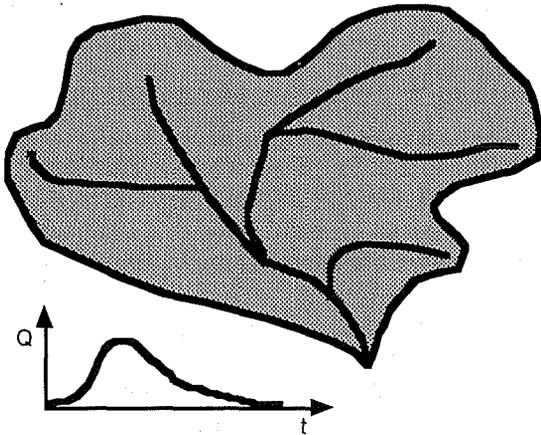
Por inercia natural, existe una cierta resistencia de la comunidad hidrológica a cambiar sus mecanismos de operación para orientarlos hacia los radares debido a que se percibe a estos como estimadores (contra medidores) de lluvia con una alta incertidumbre. De hecho, previa realización de los estudios de calibración hidrológica, esta desconfianza es justificada. Sin embargo debe recordarse que las estaciones en tierra también tienen gran incertidumbre en la definición del campo de lluvias de tormentas individuales.

Una vez calibrados, los radares ofrecen enormes ventajas en cuanto a resolución espacial, disponibilidad instantánea y continua de datos, y cuando son utilizados en conjunto con estaciones automáticas telemétricas aisladas en la zona, también en cuanto a definición cuantitativa del campo de precipitación y su evolución en el tiempo.

Los beneficios potenciales de transformar los modelos lluvia-escorrentamiento de una cierta cuenca, para utilizar el radar, pueden ser fácilmente evaluados por los hidrólogos a cargo de dicha cuenca, aún antes de entrar en operación. Para ello basta comparar los resultados de los modelos y los mismos modelos aplicados a un número mucho mayor de subcuencas (compatible con la mayor resolución espacial y temporal del radar) para tormentas sintéticas.

Las corridas en ambos casos deben planearse para que los volúmenes totales de lluvia precipitada en un cierto intervalo sean iguales entre corridas, sólo su distribución espacial y temporal debe cambiar. La comparación de los hidrogramas de salida indicará qué tan importante sería contar con esa resolución espacial y temporal incrementada, (ilustración 14). El escéptico puede, adicionalmente, introducir un error en el volumen total de precipitación (para el caso de alta resolución solamente) congruente con las incertidumbres del radar (por ejemplo $\pm 20\%$) y verificar a qué es

14. Análisis de sensibilidad de la cuenca a una distribución de lluvia en el espacio más detallada ante la perspectiva de instalarse un radar en la zona



más sensible la cuenca ¿A un error en la estimación global de lluvia o a un error en la definición de su estructura en el espacio y en el tiempo?

Conclusión

Los avances recientes de los radares meteorológicos han logrado que algunos de sus productos pasen del ámbito del conocimiento de personal muy especializado en electrónica y meteorología, al del público de la televisión donde comúnmente se presenta en los reportes del estado del tiempo mosaicos simplificados integrados de mediciones de lluvia provenientes de redes de radares meteorológicos.

Ahora, los radares meteorológicos son potencialmente útiles para innumerables profesionistas, negocios y actividades en una forma directa, sin la interpretación intermedia de un meteorólogo. Específicamente, las estimaciones de lluvia en tiempo real vía radar representan un gran recurso para facilitar la tarea de los hidrólogos operativos, el personal de protección civil y los ingenieros hidráulicos asociados con actividades que involucren de alguna manera a la precipitación pluvial.

Por supuesto que su incremento en utilidad para la meteorología es innegable, al punto de convertirse en una de las principales herramientas para pronósticos a muy corto plazo. Los principales avances que han repercutido en los radares meteorológicos son:

- Su incorporación de procesamiento y control digital a través de computadoras genéricas en lugar de circuitos analógicos especializados.
- La incorporación de la capacidad para medir las velocidades de los blancos a través del efecto *Doppler*.
- La utilización de mediciones con doble polarización para clasificar el tipo de precipitación pluvial que se observa. Esta es una de las capacidades que aún no se explotan a plenitud pero que tienen un futuro promisorio.

Estas nuevas características, su forma de operación, sus ventajas y posibles aplicaciones así como ciertas limitaciones que deben tomarse en cuenta para su utilización, son discutidos.

Por supuesto que las mayores capacidades de los radares modernos no excentan al usuario de comprender su funcionamiento.

De hecho la interpretación y explotación adecuadas de algunos de los productos modernos (como barridos volumétricos y mediciones *Doppler*) requieren de un esfuerzo y preparación adicionales.

La integración transparente del radar meteorológico a las labores de hidrología operativa (y actividades conexas) representa una excitante línea de investigación, desarrollo e implantación de tecnología para los próximos años.

Bibliografía

Se presenta en un cuadro que correlaciona las fichas bibliográficas (números arábigos) con los temas (letras) con el fin de facilitar la búsqueda de fuentes de información sobre temas específicos.

Fichas bibliográficas:

1. Acker A. E. *How to Speak Radar*, 37 pp., Varian Associates, Palo Alto, California, EUA, 1988.
2. Atlas D. *Radar in Meteorology*, 806 pp. Sociedad Meteorológica Americana, Boston, MA, EUA, 1990.
3. Battan, L.J. *Radar Meteorology*, University of Chicago Press, 1959.
4. Battan, L.J. *Radar Observations of the Atmosphere*, University of Chicago Press, 1973.
5. Browning K.A. *Nowcasting*, 256 pp., Academic Press, 1982.
6. Clift G. A. *Use of Radar in Meteorology*, Nota técnica No. 181, Publicación No.625, 90 pp., Organización Mundial de Meteorología, Ginebra, Suiza, 1985.
7. Cluckie I.D. y C.G., *Collier Hydrological Applications of Weather Radar*, 644 pp., Ellis Horwood, 1991.
8. Collier, C.G. y m., Chapuis. *Weather Radar Networking*, 580 pp., Kluwer Academic Publishers, Países Bajos, 1990.
9. Díez Pérez, J.A. *Estudio sobre uso del radar para fines meteorológicos*, Recursos Hidráulicos, vol.I, no.4, pags. 437-451, México, 1972.
10. Doviak R.J. y d.s., Zrnic. *Doppler Radar and Weather Observations*, 458 pp., Academic Press, 1984.
11. Dunlap, O.E., *El radar*, 246 pp., Fondo de Cultura Económica, México, 1946.
12. España A. *Análisis de las técnicas utilizadas para la estimación de lluvia asociada a ciclones tropicales*, Tesis Profesional, ESIA/IPN, 1993.
13. Hardaker P.J. *Meteorological Radar Theory (an Introduction)*, vols. I y II, Metstar Consultants, Oficina Meteorológica del Reino Unido, 1994.
14. Hiser H. W. *Radar Meteorology*, 4ª edición, 310 pp, Laboratorio de Sensores Remotos, Universidad de Miami, Florida, EUA, 1981.
15. IPESA. *Estudio sobre el uso de radar para fines meteorológicos en el Valle de México*, 56 pp., Informe Final, Departamento del Distrito Federal, México, 1979.
16. Kingsley S. y Quegan Sh. *Understanding Radar Systems*, 375 pp., McGraw Hill, 1992.
17. Marshall J.S. y W.M., Palmer. *Relation of Raindrop Size to Intensity*, Journal of Meteorology, vol.5, pags. 165-166, 1948.
18. Mendoza G. M. *El cálculo de la cobertura real de radares meteorológicos y su ubicación óptima*, Tesis Profesional, ESIA/IPN, 1994.
19. Organización Meteorológica Mundial. *Lectures Presented at the Seminar on Radar Meteorology*, Publicación No. 626, 309 pp. Ginebra, Suiza, 1984.
20. Rinehart R. E. *Radar for Meteorologists*, 2ª edición, 333 pp., Departamento de Ciencias Atmosféricas, Universidad de Dakota del Norte, EUA, 1991.
21. Rosengaus M. M. *COBRADAR, un sistema para el cálculo de cobertura real de radares meteorológicos*, Informe Técnico No.4, GHYFHE, IMTA, Jiutepec, Morelos, 1992.
22. Rosengaus M. M. *AUTOTOPO, un sistema para la obtención automática de perfiles orográficos*, Informe Técnico No.5, GHYFHE, IMTA, Jiutepec, Morelos, 1992.
23. Rosengaus M. M., *Extensiones al sistema COBRADAR: cobertura de radares meteorológicos a altura constante sobre el terreno*, Informe Técnico No.9, GHYFHE, IMTA, Jiutepec, Morelos, 1993.
24. Servicio Meteorológico Nacional. *Resumen, radar móvil*, Informe Técnico Interno, SARH, México, 1982.
25. Servicio Meteorológico Nacional, *Análisis de las observaciones de radar y su relación con el granizo en la región lagunera durante abril y mayo de 1982*, Informe Técnico Interno, SARH, México, 1982.
26. Servicio Meteorológico Nacional, *Manual de operación para estaciones de radar meteorológico*, Informe Técnico Interno, SARH, México.
27. Skolnik, M.I., *Introduction to Radar Systems*, 581 pp., McGraw Hill, 1980.
28. Wiggert, V., et al, *Computer Software for the Assessment of Growth Histories of Waether Radar Echoes*, 86 pp., Administración Nacional del Océano y la Atmósfera, EUA, 1976.

Temas:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> A. Generalidades B. Teoría sobre radar en general C. Aspectos clásicos D. Aspectos modernos E. Historia F. Productos de radar G. Resolución H. Cobertura (nominal y real) I. Obstáculos orográficos J. Ubicación de radares K. Atenuación L. Ecos falsos
(fijos, atmosféricos y de viaje múltiple) | <ul style="list-style-type: none"> M. Lóbulos laterales N. Propagación anómala O. Banda brillante P. Medición de lluvia Q. Procesamiento digital de señales R. Efecto <i>Doppler</i> S. Medición de campos de viento T. Estimación de turbulencia U. Minimización de ecos fijos V. Doblamiento de frecuencias W. Clasificación de lluvias X. Integración con otros sistemas de observación hidrometeorológica Y. Calibración hidrológica. Z. Aplicaciones en hidrología |
|---|---|

Correlación de fichas bibliográficas (números arábigos) con temas (letras)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1		•																									
2					•											•	•	•	•					•			•
3		•	•			•					•		•	•	•	•											
4		•	•			•					•		•	•	•	•											
5																			•	•	•						
6	•	•	•	•		•					•			•				•									
7								•		•						•								•	•	•	•
8				•				•	•			•			•	•		•	•					•	•	•	•
9	•		•					•		•						•											
10		•		•							•					•	•	•			•						
11	•	•			•																						
12	•																										
13	•				•							•		•	•			•	•				•	•			
14			•		•	•					•	•	•														
15					•	•	•	•		•						•											
16		•						•										•									
17																•											
18	•							•	•	•																	
19								•	•	•		•				•					•			•	•		
20		•	•	•	•		•	•			•	•		•		•				•	•			•			
21								•	•	•		•															
22								•	•	•		•															
23								•	•	•		•															•
24			•																								
25			•					•	•															•		•	
26	•		•				•				•	•		•		•											
27		•									•	•	•	•			•										
28																•	•										