

## Revisión temática

# Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos

(primera de dos partes)

Michel Rosengaus Moshinsky

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*México se encuentra, en cuanto a la observación hidrometeorológica se refiere, en el umbral de una nueva época que se sustenta, esencialmente, en una red moderna de radares meteorológicos cuya versión actual es una combinación de tecnologías disponibles antes de la II Guerra Mundial, con tecnologías de avanzada. Esta primera parte se restringe a los aspectos clásicos que todavía son parte de los instrumentos modernos. Se presentan conceptos fundamentales, dirigidos a los ingenieros hidráulicos e hidrólogos, que permiten una mejor comprensión del funcionamiento de los equipos, así como una serie de limitaciones y restricciones esenciales para interpretar correctamente sus resultados.*

### Introducción

Entre los datos más codiciados por un hidrólogo o un ingeniero hidráulico siempre han estado la evolución en el tiempo y la distribución espacial de la precipitación pluvial dentro de una cuenca de interés. En México, este tipo de información ha permanecido fuera del alcance de los especialistas y por ello los métodos y herramientas usuales se fundamentan en datos mucho más elementales, como la lluvia registrada a intervalos de 24 horas en unos cuantos puntos aislados de la cuenca. El radar meteorológico es un instrumento de observación atmosférica específicamente orientado a la vigilancia continua (en tiempo y espacio) de la precipitación pluvial.

Recientemente, México ha emprendido un programa de modernización del Servicio Meteorológico Nacional, SMN, que en algunos aspectos no tiene precedente en ningún otro lugar del mundo: se actualizaron los cinco radares meteorológicos con que hasta antes del programa contaba el SMN y se instalaron siete más, todos ellos con especificaciones similares, y en ciertos aspectos superiores, a las de los sistemas con que cuentan los países desarrollados.

Así como hoy día es común la toma de decisiones en base a productos meteorológicos de satélite y existe un conocimiento intuitivo bien difundido sobre qué y

cómo miden los sensores instalados en los satélites y cómo se interpretan las imágenes en las que estas mediciones se plasman, se hace necesario obtener un conocimiento similar con respecto a los radares meteorológicos. Es de suma importancia que se conozcan tanto sus capacidades como sus limitaciones, de tal manera que se eviten interpretaciones erróneas.

Las características de los radares meteorológicos se agrupan naturalmente en relación a su desarrollo que se inicia poco antes de su aparición en la II Guerra Mundial. Por lo extenso del tema, el trabajo se divide en dos secciones: en la primera se abordan los aspectos clásicos, es decir aquellos que han sido parte de la tecnología de radar por varias décadas, pero que permanecen en los sistemas actuales; en la segunda se abordan los aspectos modernos, que son aquellos que se han incorporado a la tecnología de radares operativos a partir del advenimiento de la electrónica digital y los microprocesadores.

Es importante puntualizar que el enfoque del presente trabajo es eminentemente conceptual; se trata de exponer las ideas fundamentales en la operación, capacidades y limitaciones de los radares meteorológicos, por lo que no es una condición necesaria tener conocimientos sobre ingeniería electrónica o meteorología para comprenderlos. Más aún, la estructura del trabajo se encuentra orientada a responder ordenada

y metódicamente a interrogantes que ingenieros hidráulicos e hidrólogos podrían manifestar al encontrarse por primera vez frente a estos instrumentos o a sus productos impresos o digitales. También es necesario admitir que el alcance del mismo es limitado y que no debe esperarse el poder *diseñar* un sistema de este tipo con los fundamentos expuestos; el trabajo se encuentra dirigido específicamente a usuarios de esta nueva información hidrometeorológica en México.

### Breve reseña histórica

La palabra radar proviene de los vocablos ingleses *radio detection and ranging* que describen brevemente su función. En español podría traducirse como detección y medición de distancia a través de ondas de radio. El radar fue desarrollado casi paralelamente por ingleses y norteamericanos, en los años previos y durante la II Guerra Mundial, como un instrumento para detectar y ubicar a distancia aeronaves enemigas. En ocasiones, durante su utilización militar, se detectaban ecos provenientes de zonas en donde, se sabía, no volaban aeronaves en ese momento. Puesto que los ecos parecían venir del cielo, aparentemente vacío, se dio en llamarlos *ángeles*. Más tarde se averiguó que las señales provenían de *blancos atmosféricos*, es decir, zonas que presentaban gotas de agua condensadas en suspensión. Dichos ecos eran considerados como contaminación indeseable, dado el propósito de los primeros sistemas.

Inmediatamente después de la Guerra, pero aún con interés militar, se encomendó a diversas instituciones de investigación que exploraran la posibilidad de utilizar el radar como auxiliar en la navegación balística, mediante la detección de zonas con lluvia.

Estas investigaciones originaron mejores sistemas, no para minimizar la detección de ecos atmosféricos, sino para enfatizarlos. Este fue el nacimiento del radar meteorológico, instrumento tan común actualmente.

Las características básicas y los principios de operación del radar de aquel entonces no han cambiado significativamente hasta nuestros días. Las más importantes mejoras son el resultado de substituir parte del procesamiento analógico y del control de la señal por su equivalente digital. El advenimiento de los microprocesadores ha incrementado la capacidad de los sistemas y los ha hecho viables económicamente.

Hoy en día, los países desarrollados intentan establecer densas redes de radares meteorológicos con distancias entre unidades de tan solo unos 100 a 200 km y su utilización se ha generalizado al punto que se ha convertido en uno de los productos usuales que el

público espera en un reporte meteorológico a través de la televisión comercial.

### Propósitos de los radares meteorológicos

#### *Rastreo de tormentas*

Implica la ubicación de las tormentas en cuanto a su distancia y acimut a la posición del radar en forma relativamente continua, de tal manera que se pueda seguir su movimiento y con ello establecer alertas para tomar las medidas pertinentes. Los radares de alta potencia realizan este tipo de labores a distancias de hasta 450 km o más.

#### *Evaluación cuantitativa de lluvia*

Implica la evaluación de la intensidad de lluvia instantánea en mm/hora que produce una tormenta, una vez ubicada y suponiendo que se encontrara suficientemente cerca (a unos 230 km). Es importante puntualizar que no se trata de una estimación cualitativa (lluvias ligeras, medias o intensas) sino de una medición que, bajo una calibración cuidadosa, sirva para establecer las tasas de precipitación con errores de más o menos veinte por ciento.

#### *Medición del campo de vientos*

Los radares modernos con capacidad Doppler, pueden medir con alta precisión el componente de los vientos en dirección hacia o desde el radar, con tan solo encontrar pequeños ecos en la atmósfera. Esta tarea pueden realizarla a distancias de hasta unos 120 km. La cobertura de una cierta zona con varios radares permite la reconstrucción tridimensional del campo de vientos.

#### *Clasificación de precipitación pluvial*

Los radares equipados con múltiple polarización efectúan mediciones que resultan indicativas del tipo de precipitación: llovizna, lluvia intensa, granizo o nieve. Esta capacidad debe considerarse todavía como en etapa de desarrollo.

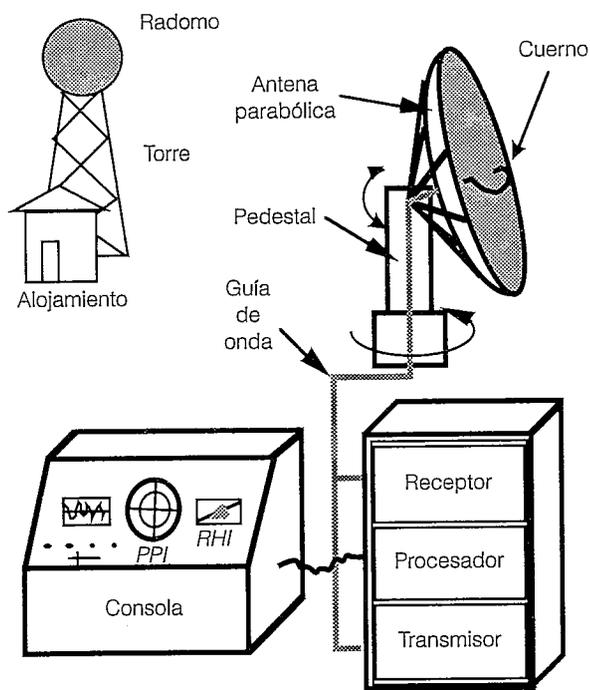
Si los radares meteorológicos generaran productos inequívocos de los resultados antes descritos, el resto del planteamiento de este trabajo sería puramente académico. El hecho es que la tecnología aún no permite la generación de datos exactos y por ello, en la medida en que se conozca el funcionamiento de un radar meteorológico, sus productos se podrán interpretar cada vez con mayor precisión.

## Componentes de un radar tradicional

- Un transmisor de pulsos de alta potencia (entre 100 y 1000 kW) usualmente basado en la tecnología de magnetrón.
- Una guía de onda o conducto que dirige los pulsos electromagnéticos del transmisor al foco de la antena y los pulsos recibidos de la antena al receptor.
- Un receptor de gran sensibilidad capaz de detectar potencias del orden de 0.0001 watts.
- Un procesador de la señal recibida.
- Una consola de despliegue y control.
- Una antena, usualmente con geometría de paraboloide de revolución (similar a las antenas de TV vía satélite) montada sobre un pedestal que le permite girar en acimut y en ángulo de elevación.
- Un radomo o cubierta casi esférica que protege a la antena contra cargas asimétricas por viento, humedecimiento de su superficie e intemperización.

Una estación de radar generalmente tiene otros componentes como una torre sobre la que se fijan la antena y el radomo, una planta de baterías y un generador de electricidad, así como los alojamientos de estos equipos y del personal de operación. En la ilustración 1 se muestra esquemáticamente una estación de radar tradicional.

### 1. Esquema de componentes de un radar



## Principios de funcionamiento

En una primera aproximación se puede asociar el funcionamiento de un radar con el de un faro marino, con la particularidad que lo importante es que un observador en el faro pueda ver al barco cuando es iluminado y no que el faro sea visto por un observador situado, a lo lejos, en la nave. El reflector gira en acimut lanzando un haz de luz concentrado hacia el infinito. Parte de la energía lumínica alcanza su objetivo y es reflejada en dirección al faro donde alcanza la retina del observador, lo que le permite ubicar al barco.

En el caso de un radar, la energía no es lumínica sino electromagnética y no sólo es el emisor de energía, sino también el observador o receptor del reflejo. En este sentido actúa como si el faro no se encontrara prendido todo el tiempo, sino intermitentemente. El lapso durante el cual el faro permanecería apagado y detectando los reflejos del barco, sería el mismo que le tomaría a la luz viajar de ida y vuelta del faro hasta el punto más lejano posible de interés.

Si a esta analogía añadimos la posibilidad de poder apuntar el faro a diferentes ángulos de elevación (para detectar aeronaves por ejemplo) la similitud con el radar es casi completa. Nótese que la única diferencia esencial entre la luz y las microondas del radar es su frecuencia; y así como los ojos de un humano están diseñados para detectar el espectro visible de la luz, el radar está diseñado para detectar ondas electromagnéticas en la banda de microondas.

El radar envía pulsos electromagnéticos de gran potencia (250 kW y de muy corta duración (1  $\mu$ s) en dirección radial hacia el infinito, repitiéndolos entre unas cien y mil veces por segundo. Entre pulso y pulso el radar se encuentra a la escucha de posibles reflejos o ecos durante el 99.9% del tiempo de operación. Cualquier objeto (no transparente a la energía electromagnética) que se encuentre al paso, reflejará parte de la energía recibida (dispersión) comportándose como un pequeño emisor que transmite en todos sentidos. Una pequeña porción de esta energía viajará de regreso en dirección al radar (retrodispersión) que al detectarla le permitirá ubicar la posición del objeto, así como su opacidad.

El radar puede identificar la distancia a la que se encuentra el blanco reflector a través de una medición muy precisa del tiempo que transcurrió entre la emisión del pulso y la recepción de su eco. Estos son tiempos sumamente cortos, 1ms, para un blanco que se encuentre a 300 km de distancia. La correspondencia entre medir tiempos y distancias se establece a partir de que los pulsos electromagnéticos viajan a través de la atmósfera a una velocidad constante igual a

la de la luz, muy cercana a los 300,000 km/s. Por otro lado, el acimut y el ángulo de elevación correspondiente al blanco los obtiene el radar de sensores montados sobre el pedestal de la antena. La medición instantánea, al emitir el pulso, es válida aún cuando la antena se encuentre en movimiento continuo, ya que durante el lapso entre pulsos (1 ms aproximadamente) el giro de la misma es despreciable.

Estos tres elementos permiten en un sistema coordinado esférico, natural en el radar, ubicar la posición del blanco y desplegarlo en una pantalla de rayos catódicos como un punto luminoso. Al girar la antena en acimut puede desplegarse un mapa de ecos en planta y al girar en ángulo de elevación puede hacerse en un corte radial vertical.

Además de la ubicación del blanco, que se identifica en cuanto a la presencia o ausencia de algún eco, el radar calcula la relación entre la energía recibida asociada al eco, y aquella transmitida originalmente. Puesto que objetos muy opacos al paso de los pulsos reflejarán una mayor cantidad de energía que aquellos que son más transparentes, el radar es capaz de identificar qué tipo de blancos han producido los ecos.

En el contexto de radares meteorológicos, una zona con gran densidad de gotas de agua (o gotas de gran tamaño) se comporta como más opaca que una zona con menos densidad de estas (o de menores tamaños). Es precisamente a través de este hecho como el radar puede efectuar mediciones indirectas de la precipitación pluvial. Es importante establecer que los *blancos atmosféricos* no son completamente opacos al paso de la energía, que pasando a través de ellos se encuentra disponible para realizar mediciones análogas para blancos que se encuentren más allá en la dirección radial del radar. Estos ecos posteriores simplemente se identifican con un tiempo de retardo mayor al primero.

Otra diferencia del radar con respecto al faro marino es que el radar emite ondas electromagnéticas en una sola frecuencia (o en una banda de frecuencias sumamente angosta) lo que evita interferencias con otras transmisiones de microondas. Al respecto, un hecho curioso es que cuando el radar apunta directamente al Sol, se observa una línea radial de ecos (falsos), debido a que el astro emite energía a todas las frecuencias, inclusive a la del radar de interés. El filtrado que el receptor y procesador realizan no elimina la aportación del Sol a dicha frecuencia y el radar interpreta estas emisiones solares como ecos.

El llamado haz del radar es el *pasillo* a lo largo del cual se propagan las ondas electromagnéticas de un pulso de radar. Este haz se va haciendo más amplio conforme aumenta la distancia al radar, es decir, la

energía total del pulso se distribuye en una zona cada vez mayor al aumentar la coordenada radial ( $r$ ). La densidad de la energía varía en forma directamente proporcional a  $1/r^2$ .

Puesto que los *blancos atmosféricos* reflejan una cantidad de energía proporcional a la que reciben y nuevamente la transmiten en dirección radial, la energía que finalmente capta la antena varía con una ley de  $(1/r^2)(1/r^2) = 1/r^4$ . Esto hace que, a pesar de las enormes cantidades de energía emitidas, se reciban ecos sumamente débiles. Por ejemplo, al duplicarse la distancia al radar, un mismo blanco produciría un eco 16 veces menor que en su posición original.

Si a lo antes mencionado añadimos el hecho de que los blancos de interés en la atmósfera son relativamente transparentes, es necesario que el receptor sea capaz de detectar pulsos que son únicamente del orden de  $10^{-9}$  de la potencia originalmente emitida. Esta es la razón por la que, en el contexto de radares y en el de muchos otros instrumentos electrónicos y de telecomunicaciones, es común el utilizar el concepto de decibelios.

Un decibelio, dB, no es estrictamente una unidad, sino una relación (adimensional) entre dos cantidades expresada logarítmicamente. Específicamente si  $A$  tiene una magnitud  $n$  veces la magnitud de  $B$ , se dice que entre ellas existen

$$10 \log_{10} (A/B) = 10 \log_{10} n \text{ decibelios}$$

Por ejemplo,  $A/B = n = 1,000,000$  corresponde a 60 dB mientras que el inverso  $B/A = 0.000001$  corresponde a -60 dB. Cuando la relación se refiere a reflectividad (proporcional a la potencia reflejada entre la potencia recibida) se acostumbra indicar como unidades dBZ (la Z es la letra usualmente asociada con reflectividad).

Es a través de esta relación logarítmica que los ingenieros en el campo no manejan números sumamente grandes o sumamente pequeños. La costumbre se ha difundido tan ampliamente que hoy en día es rutinario indicar, inclusive, potencias absolutas (en contraste con relaciones de potencias) en dB<sub>0</sub> a través del *truco* de hacerlas relativas a la potencia base de 1 mW. Desgraciadamente este tipo de notación no es común entre ingenieros civiles, hidráulicos o hidrólogos, por lo que se crea una cierta confusión intergremial.

### Productos clásicos del radar meteorológico

Se le llama producto de radar a un despliegue en pantalla o impresión que muestra las mediciones que el radar realiza. Los dos productos clásicos de un radar se

encuentran íntimamente relacionados con la capacidad de movimiento de la antena, esto es, giro en acimut ( $\theta$ ) y en ángulo de elevación ( $\phi$ ).

*Indicador de posición en planta, PPI*

El producto más común de radar meteorológico es el indicador de posición en planta, PPI (por sus siglas en inglés), que constituye la manifestación de las mediciones de un radar, visto desde arriba mientras gira en acimut, manteniendo fijo un cierto ángulo de elevación. Más formalmente, un PPI es una observación en un plano ( $r, \theta$ ) para un  $\phi = \text{constante}$ . En la ilustración 2 se muestra gráficamente el barrido PPI.

Es importante enfatizar que, debido a la curvatura de la Tierra, el PPI no representa una medición a una altura constante sobre el terreno, ni siquiera para  $\phi = 0$ . Los ecos que aparecen en pantalla en un PPI no corresponden a cortes de las tormentas presentes a cierto nivel atmosférico; de hecho (para  $\phi > 0$ ) los ecos observados son más altos conforme mayor es la distancia al radar ( $r$ ).

*Indicador en altura distancia, RHI*

El otro producto más común es el indicador en (el plano) altura distancia, RHI (por sus siglas en inglés), obtenido directamente al mantener fija la dirección en acimut de la antena y barrer verticalmente en el ángulo de elevación. El resultado es un corte vertical de la

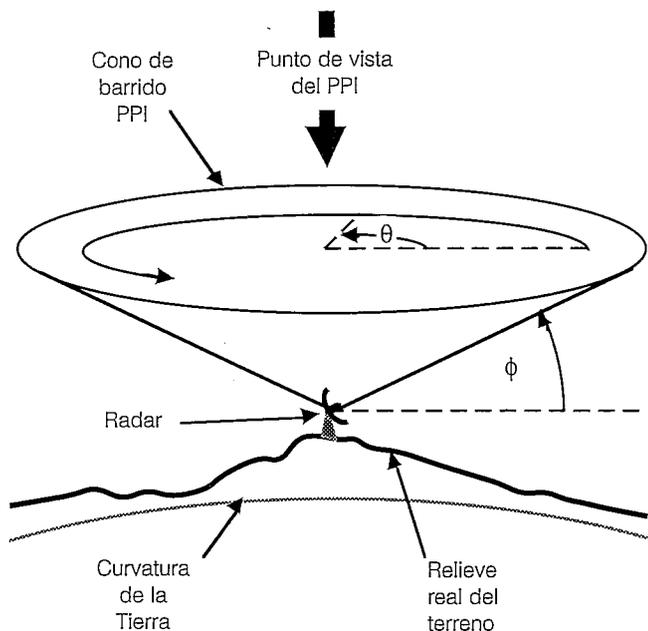
atmósfera en una dirección radial al radar. En la ilustración 3 se muestra el barrido RHI. Este producto es utilizado una vez que la posición en PPI de una tormenta de interés ha sido establecida con el propósito de explorar la estructura vertical de la misma. Por ejemplo, este mecanismo puede utilizarse para establecer (y reportar) la altura máxima de la lluvia, importante en la determinación de la intensidad de tormentas convectivas, es decir, aquellas producidas por el movimiento vertical ascendente de aire húmedo.

Es posible pensar en variaciones sobre estos productos, como podría ser un sector PPI, o sea un barrido a  $\phi = \text{constante}$  pero sólo para un intervalo específico de interés en  $\theta$ , digamos para seguir en detalle el movimiento y estructura en planta de un ciclón tropical.

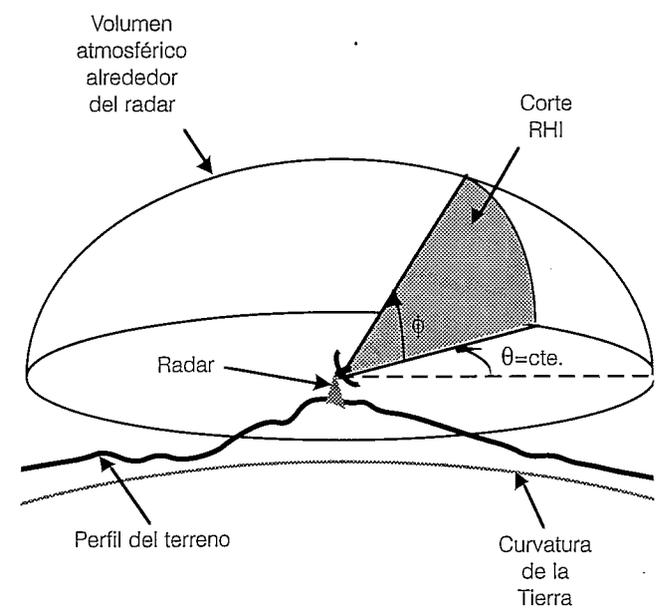
**Resolución de las mediciones con radar**

Las mediciones que un radar realiza en la atmósfera no son puntuales pues la reflectividad percibida se refiere al promedio en un cierto volumen de muestreo. Interpretar adecuadamente los productos requiere estar consciente de esta característica. La energía emitida por el radar no se propaga únicamente a lo largo del eje radial, sino que se distribuye en un haz cónico cuyo eje longitudinal es esta dirección radial, tal y como se muestra en la ilustración 4 en donde se aprecia la forma del volumen de muestreo. Sólo los ecos provenientes de este mismo haz cónico son los que la antena puede capturar.

2. Esquema de definición del PPI



3. Esquema de definición del RHI

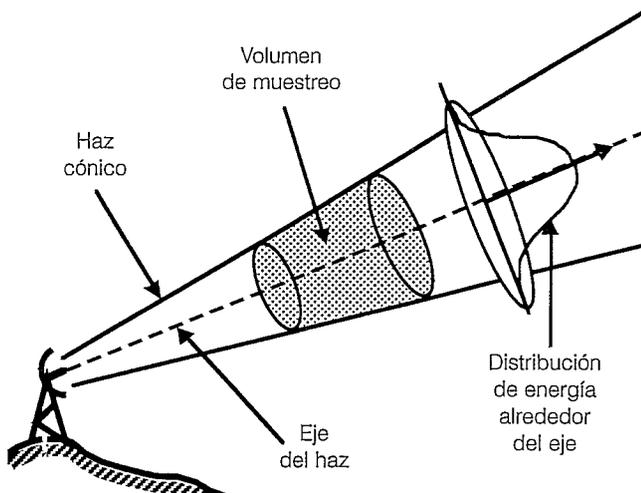


El ángulo de apertura ( $\Delta$ ) de un haz de radar meteorológico típico es del orden de  $1^\circ$ . En la ilustración 5 se muestra un haz de radar con tres blancos hipotéticos iguales dentro del mismo. Puesto que no existe ningún mecanismo para diferenciar el eco proveniente de cada uno de ellos, el radar no puede identificarlos separadamente. Obsérvese que el blanco al centro del haz recibirá una mayor cantidad de energía (de acuerdo a la distribución de la misma, indicada en la ilustración 4) y por lo tanto producirá un mayor eco, en relación a los dos en los bordes del haz. Sin embargo, el eco de los tres es recibido en forma mezclada. Esto implica que el volumen de muestreo del radar tiene una dimensión, perpendicular al eje del haz, que aumenta linealmente con la distancia al mismo (como  $r\Delta$ ).

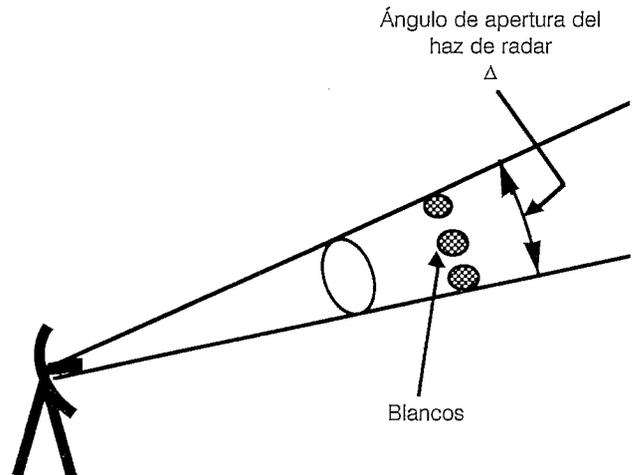
Aunque  $1^\circ$  puede parecer un ángulo muy reducido, dado el gran alcance nominal de los radares, esta apertura tiene importantes implicaciones. Por ejemplo, a 50km del radar, el volumen de muestreo tiene ya un diámetro de 873m, a 200km de 3,491m y a un alcance nominal máximo (digamos 450km) de 7,854m. Este último diámetro cubre casi totalmente la dimensión vertical de la atmósfera meteorológicamente activa (de unos 10km de espesor). Por otro lado, dos tormentas idénticas aparecerían diferentes en el despliegue del radar simplemente dependiendo de su distancia al mismo. La más lejana aparecerá con mucho menor detalle en cuanto a sus estructuras horizontal y vertical.

Existen razones prácticas por las que a un radar en operación no puede dotársele de un haz mucho más angosto que  $1^\circ$ , la principal es que requeriría de una antena de mayor tamaño con el consecuente incremento en los costos del pedestal, mecanismo de movimiento, tamaño del radomo y robustez de la estructura

4. Esquema del haz de propagación de energía



5. Esquema sobre resolución angular

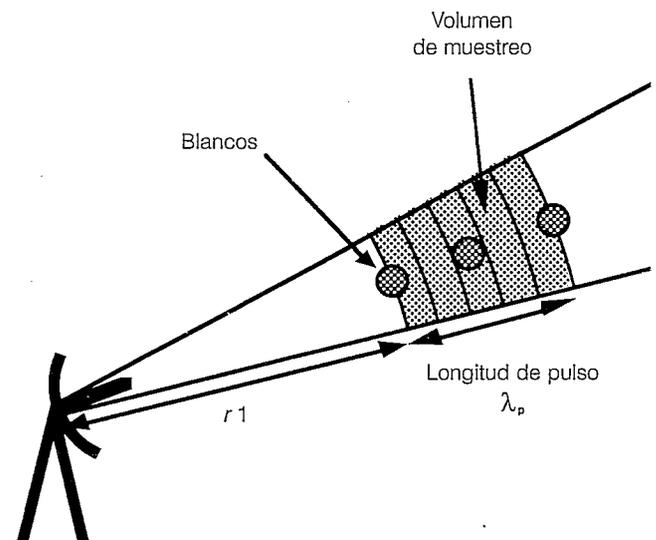


para poder soportar las fuerzas de viento a las que normalmente se ve sujeto.

El volumen de muestreo también tiene una dimensión finita a lo largo del eje radial y se encuentra asociada a la longitud del pulso de ondas electromagnéticas que el radar emite. Un pulso típico tiene del orden de 1,000 a 10,000 ondas individuales, cada una de ellas de aproximadamente 3 a 10 cm de longitud (dependiendo de la banda X, C o S).

Así pues se puede concluir que la longitud típica del pulso ( $\lambda_p$ ) es del orden de entre 30 y 1000 m. En los radares de gran alcance esta longitud se encuentra más bien cerca del límite superior. La ilustración 6 muestra esquemáticamente tres blancos iguales que se encuentran separados entre sí por  $1/2$  de la longi-

6. Esquema sobre resolución angular



tud del pulso. Intuitivamente se percibe que el radar empezará a recibir los ecos del segundo blanco, correspondientes al frente del pulso, exactamente al mismo tiempo que los ecos del primer blanco correspondientes a la cola del pulso, puesto que la diferencia de tiempo entre el frente y la cola es igual al tiempo necesario para que el frente recorra la distancia del primer al segundo blanco en ambos sentidos. Lo mismo sucede, obviamente, entre el segundo y el tercer blancos. Esto nos indica claramente que el radar es incapaz de diferenciar entre blancos que se encuentren separados entre sí por distancias menores a  $\lambda_p/2$ .

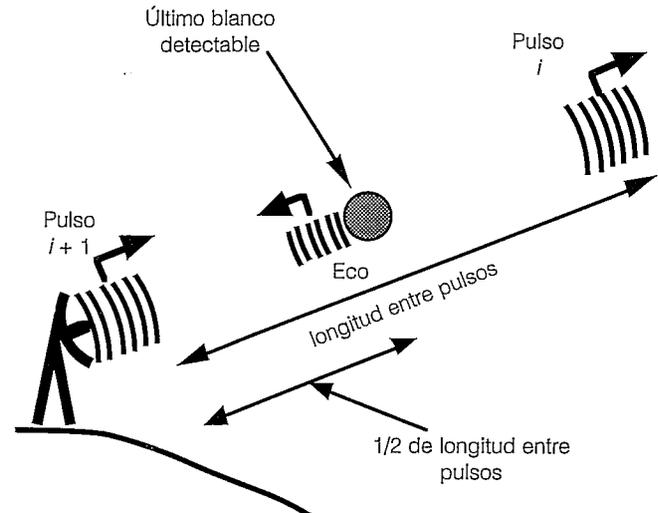
La resolución radial de las mediciones de radar (o alternativamente la longitud del volumen de muestreo) es pues de un medio de la longitud del pulso electromagnético y típicamente resulta de unos 500 m. Los números exactos varían dependiendo del diseño específico del radar del que se trate. Es importante puntualizar que esta resolución, en contraste con la resolución angular, es constante con la distancia al radar. En dirección radial, el radar define igualmente bien tormentas cercanas y tormentas lejanas.

Es muy importante diferenciar entre la resolución del instrumento (radar en este caso) y la resolución del medio de despliegue de sus resultados. Por ejemplo, aunque se observe un producto de radar en una pantalla donde cada uno de sus pixeles corresponda a un cuadrado de 1 km x 1 km, las mediciones en sí no podrán alcanzar dicha resolución excepto en la región muy cercana al radar (digamos  $r < 60$  km). Los valores mostrados por cada pixel serán en realidad representativos de valores promedio en un volumen de muestreo (casi) cilíndrico como el descrito centrado en dicho pixel.

### Límites de cobertura nominal

El radar envía radialmente sus pulsos electromagnéticos hacia el infinito. En principio, con un reflejo suficientemente intenso para rebasar el umbral de sensibilidad del receptor, podría detectar ecos a enormes distancias (más de 1000 km). Sin embargo, los ecos meteorológicos no son muy intensos y la variación de estos con  $1/r^4$  obliga a los diseñadores de radares a establecer alcances nominales entre los 400 y 500 km. Dicha decisión implica establecer intervalos de tiempo en los que el radar estará en *modo* de recepción entre la emisión de un pulso y el que le sigue. Así pues, de requerirse un alcance nominal de 450 km será necesario establecer un intervalo de escucha suficiente para que los pulsos viajen 900 km (de ida y de regreso al límite de monitoreo). Esto equivale a tres milisegundos.

### 7. Diagrama sobre alcance nominal de un radar



Si comparamos el intervalo de emisión ( $1\mu s$ ) concluimos que el radar se encuentra recibiendo el 99.97% del tiempo. La llamada frecuencia de repetición de pulsos, *FRP*, corresponde al número de pulsos emitidos por segundo, en nuestro ejemplo  $1/0.003001 = 333.22$  Hz, ilustración 7.

Los radares meteorológicos operativos de gran potencia tienen alcances nominales típicos de unos 450 km alrededor del radar. Sin embargo la detección a estas distancias únicamente es útil para localización y rastreo de tormentas, y aún en este caso sólo marginalmente, debido básicamente a la altura a la que se encuentra el haz (ver siguiente sección) y por el tamaño del volumen de muestreo a estas distancias. En general la evaluación cuantitativa de lluvia se realiza para radios de hasta unos 230 km y la medición Doppler (se tratará en la segunda parte) tan sólo a unos 120 km. Bajo condiciones económicas que lo permitieran, una densidad adecuada de radares sería de uno cada 180 kilómetros.

Un hecho poco difundido, y hasta cierto punto paradójico, es que el radar es completamente ciego a lo que sucede en la atmósfera inmediata a su alrededor. Así pues, la única zona que no se encuentra cubierta dentro del círculo de alcance nominal del radar es precisamente el punto donde éste se encuentra colocado. Existen básicamente tres razones para ello.

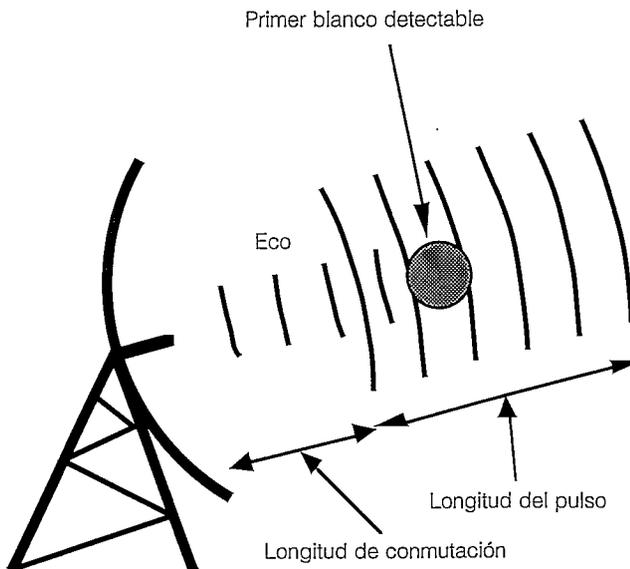
- Emisión y transmisión alternativas.

La razón más importante está asociada al hecho de que el radar no se encuentra en *modo* de recepción el 100% del tiempo, sino que conmuta entre emisión y transmisión, alternativamente. La antena no se encuentra conectada al receptor durante el tiempo

necesario para que un pulso completo sea emitido (sumado al tiempo necesario para conmutar a recepción) y, por lo tanto, ecos que serían recibidos en este lapso, no serán detectados, ilustración 8. Si, en orden de magnitud, consideramos este tiempo como entre 2 y 6  $\mu$ s, la zona de propagación en este lapso alrededor del radar será (a la velocidad de la luz) de unos 600 a 1800 m. Dado que el eco tiene que viajar tanto de ida como de regreso, la zona ciega alrededor del radar es de la mitad, o sea de unos 300 a 900 metros.

- **Visibilidad por debajo del nivel de radar.**  
La segunda razón para que existan límites inferiores de la cobertura nominal de un radar afecta únicamente a la *visibilidad* de la atmósfera a niveles atmosféricos que se encuentran por debajo del nivel del radar, caso muy común en México debido a su accidentada topografía, ilustración 9. Puesto que la antena de radar tiene un límite inferior en su rango de ángulos de elevación (usualmente igual o mayor a  $-2^\circ$ ) existe una zona cónica alrededor y bajo su nivel que no es registrada. Obsérvese que en general las tormentas con suficiente desarrollo vertical pueden ubicarse en planta.
- **Contaminación de lóbulos laterales.**  
La contaminación debido a reflexiones de los lóbulos laterales será tratada más adelante con mayor detalle. Baste por el momento mencionar que la zona contaminada, dependiendo de la localización del radar puede ser mucho mayor que la zona ciega

8. Esquema sobre límite inferior del alcance nominal de un radar (zona ciega)



antes descrita, abarcar varios kilómetros alrededor del radar, e imposibilitar la confianza en las mediciones muy cercanas al mismo.

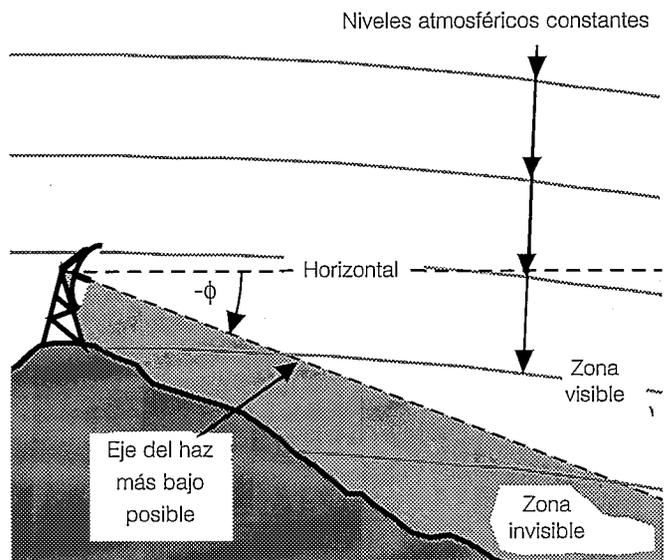
**Otros aspectos que influyen en la cobertura real**

La curvatura de la Tierra es un efecto que no hay que despreciar cuando se trata de alcances como el de los radares meteorológicos. Por ejemplo, a 450 km de distancia de un radar, la superficie terrestre (sin considerar la orografía) se encontraría a cerca de ¡16 km por debajo de su horizonte! (considerando la refracción de los haces en una atmósfera normal esta cantidad se reduce a unos 11 km). Esto tiene varias implicaciones importantes.

Por un lado, para radares colocados cerca o en el mismo nivel del mar, existe una gran zona de la atmósfera a la que no pueden observar, ilustración 10. La otra implicación importante es que, aún operando un radar con un ángulo de elevación nulo, el barrido del mismo será tal que medirá niveles atmosféricos más altos conforme aumenta la distancia al radar, ilustración 2. Esto representa un inconveniente, sobre todo desde el punto de vista hidrológico, puesto que el interés máximo radica en la evaluación de la lluvia efectivamente ocurrida sobre la superficie.

Si se mide a una altura muy elevada, se presenta una gran probabilidad de que el valor de lluvia detectado no sea igual al que alcanza el suelo y, en casos extremos, donde la totalidad de las gotas son evaporadas nuevamente al pasar por una zona de aire seco, puede indicar lluvia donde ésta no existe.

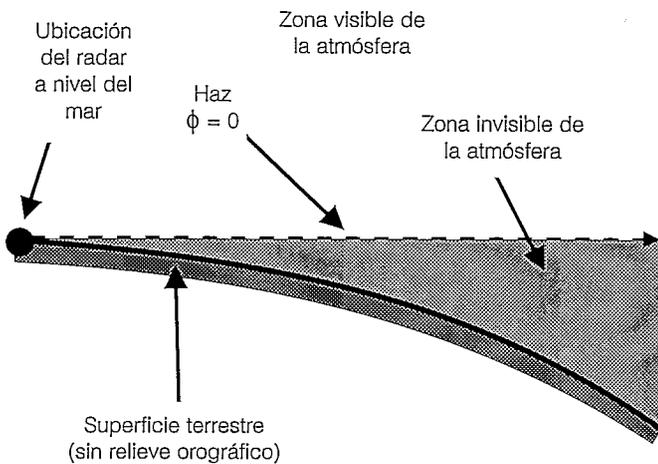
9. Esquema de no visibilidad de niveles atmosféricos inferiores al del radar



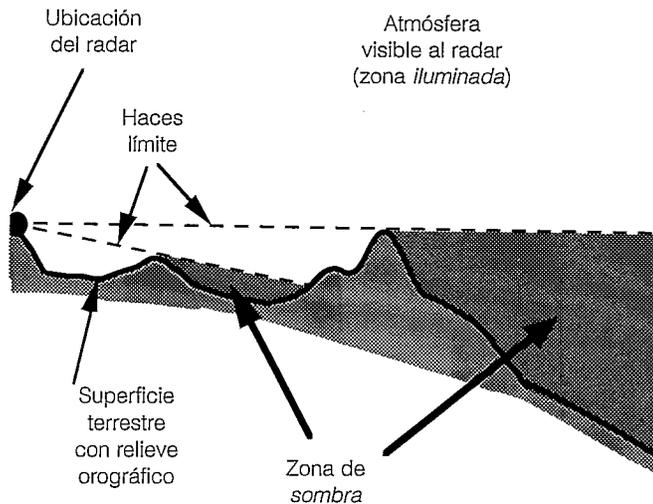
El relieve del terreno es otro factor que puede limitar severamente la cobertura real de un radar meteorológico, especialmente importante en países con topografía accidentada como México. El relieve topográfico, superpuesto a la curvatura de la Tierra, puede presentar importantes obstáculos al paso de la energía del radar, dejando amplias zonas de la atmósfera baja en la zona de sombra, ilustración 11.

El relieve del terreno es un factor importante en el proceso de ubicación de un radar meteorológico, ya que puede hacer decrecer sensiblemente el volumen atmosférico que cubre efectivamente. Resulta de gran importancia que el operador y los usuarios conozcan las zonas que se encuentran tras los obstáculos oro-

**10. Esquema sobre pérdida de cobertura atmosférica por curvatura de la Tierra**



**11. Obstáculos orográficos reduciendo la cobertura atmosférica**



gráficos invisibles al radar, con el fin de interpretar adecuadamente los ecos o la falta de ellos.

Sin embargo no debe considerarse a la orografía abrupta sólo como una limitante para la buena cobertura; de hecho es posible utilizarla con ventaja para aumentar la visibilidad del radar a bajos niveles y a grandes distancias del mismo, utilizando la curvatura de la Tierra y la capacidad de las antenas para apuntar ligeramente hacia abajo. Un ejemplo hipotético se muestra al comparar las ilustraciones 10 y 12.

**Penetración y atenuación**

La banda de un radar consiste en un pequeño rango de frecuencia (número de oscilaciones por segundo de las ondas electromagnéticas) dentro del cual opera. Los radares meteorológicos existen en tres variaciones:

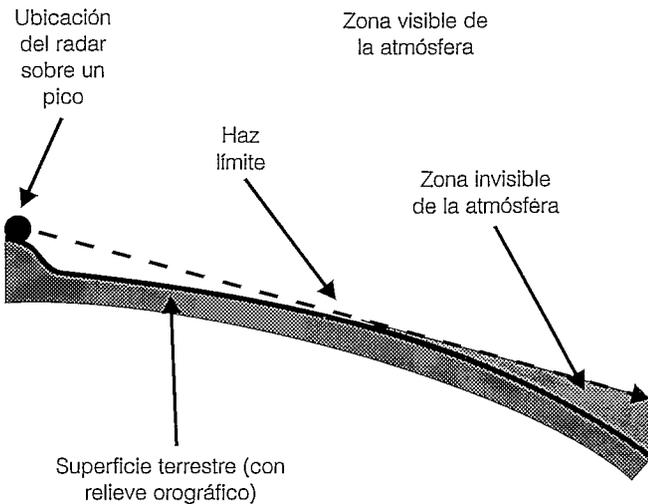
- Banda X (8 a 12 Ghz)
- Banda C (4 a 8 Ghz)
- Banda S (2 a 4 Ghz).

Cada radar es afinado para trabajar en una sola frecuencia dentro del rango, misma que minimiza la interferencia con otros instrumentos electromagnéticos a su alrededor. Dado que la celeridad de las ondas es constante (la celeridad de la luz) y que su propagación se da en una longitud de onda por cada periodo, cada frecuencia tiene asociada una cierta longitud de onda. Esto es, se puede hablar de la banda del radar en términos de la longitud de onda ( $\lambda$ ) a la que opera. En este caso, la longitud de onda de la banda X se encuentra cerca de 3 cm, la de la banda C cerca de 5.6 cm y la de la banda S cerca de diez centímetros.

Las tres bandas tienen distinta sensibilidad a blancos (gotas de agua) de diferentes tamaños, de tal manera que un radar banda X es capaz de detectar ecos producidos por pequeñas gotas de agua, inclusive de un tamaño tal que no necesariamente están precipitando sino que se encuentran suspendidas en la atmósfera (y todas aquellas mayores).

En el otro extremo, los blancos de zonas con las pequeñas gotas suspendidas son prácticamente transparentes para un haz de banda S, que sólo detecta gotas de tamaño mayor, ciertamente todas ellas ya de precipitación. Los radares banda C responden en forma óptima a gotas de tamaño intermedio. Pero si los radares banda X responden a todo tipo de gotas ¿Por qué considerar siquiera a los de banda C o S? El caso es que la respuesta óptima para radares meteorológicos depende de un balance adecuado entre la opacidad y la transparencia de los blancos para cada una de las bandas.

**12. Esquema sobre posible utilización de relieve para mejorar cobertura**



Resulta que la totalidad de la energía en un haz banda X es bloqueada por un tramo relativamente corto del mismo, ocupado por gotas de agua, sobre todo si son de tamaño precipitable. Esto implica que la penetración del haz a través de tormentas es muy baja, o en otras palabras, que el radar podrá detectar sólo a la primera tormenta en dirección radial, puesto que detrás de ella no existirá energía suficiente para detectar ningún blanco. Además, el radar banda X presenta una atenuación excesiva aún en una atmósfera sin tormentas, por lo que sus alcances nominales son en general muy pequeños (alrededor de 60 km).

Por el contrario, un radar banda S tiene excelente penetración a través de la atmósfera y de tormentas intensas, por lo que se le considera ideal para zonas tropicales con lluvias que presentan concentraciones muy elevadas de agua en gotas de tamaño apreciable, con el inconveniente de perder la posibilidad de detectar zonas con gestación de lluvia.

Puesto que el mayor interés operativo es el de detectar la precipitación pluvial, ¿Por qué no utilizar siempre radares de banda S? En este caso aparecen consideraciones prácticas que pueden aumentar considerablemente el costo de este equipo. Específicamente, para lograr un haz angosto ( $\Delta$  pequeño) con banda S se requiere una antena parabólica de grandes dimensiones, con el consiguiente incremento en costo del radomo, el pedestal y sus mecanismos de movimiento y la estructura para soportar las fuerzas de viento. En este contexto el radar banda X lleva la ventaja, por lo que es la banda preferida para radares móviles.

En términos generales, los radares banda C son un compromiso balanceado entre las ventajas y desven-

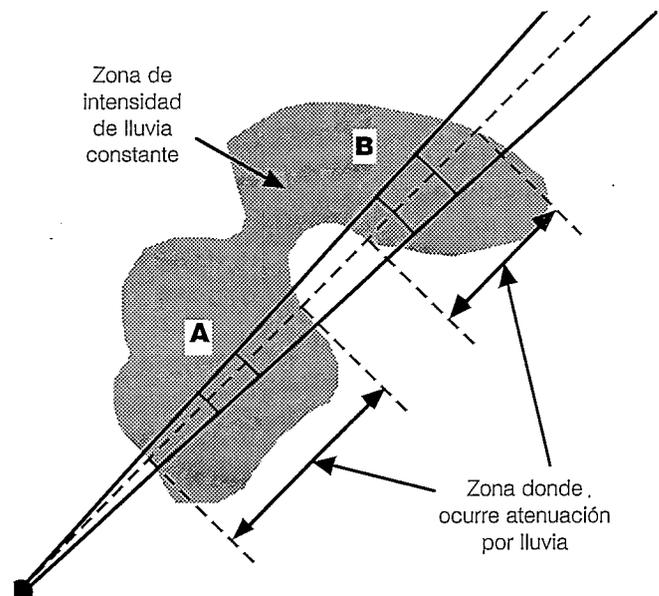
tajas ya descritas en cuanto a los de banda X y S; tienen una penetración adecuada para la mayor parte de los casos y requieren de una antena de tamaño razonablemente económico. Hoy en día la mayor parte de las unidades comerciales fabricadas son de banda C, considerándose los más adecuados para las condiciones de latitudes medias (lluvias con gotas pequeñas, larga duración y baja intensidad). Una excepción notable es el programa NEXRAD en los Estados Unidos de América que pretende establecer hasta 150 radares de banda S en su territorio.

**Mecanismos para eliminar efectos de atenuación**

La atenuación de la energía electromagnética propagándose a través de la atmósfera se da por la interferencia, al paso de las ondas, de los gases que la componen, principalmente el oxígeno y el vapor de agua, así como de los blancos semiopacos semitransparentes (como las zonas de precipitación pluvial) que encuentre en su recorrido.

La teoría necesaria para calcular la atenuación, conociendo la composición exacta de estos gases y blancos a lo largo de la trayectoria, está bien desarrollada. Sin embargo, es necesario recordar que el radar sólo mide los blancos (lluvia u otros) y no la concentración de oxígeno y vapor de agua. Es por esto que los cálculos correctivos, con respecto al efecto de los gases componentes, pueden realizarse únicamente para la suposición de una atmósfera normal y no para las condiciones específicas en el momento de la medición.

**13. Diagrama en planta de atenuación sobre un haz de radar**



En el caso de atenuación por lluvia, la falta de algoritmos que la corrijan llevarían a interpretar erróneamente la intensidad de lluvia de tormentas idénticas, excepto por que se encuentran a distancias distintas del radar. En el ejemplo de la ilustración 13 las condiciones de concentración y el tamaño de las gotas en los volúmenes de muestreo A y B son idénticos. Sin embargo la energía que recibe el volumen B es menor que aquella que arriba al volumen A, y por lo tanto la energía retrodispersada hacia el radar del volumen B será menor a la del volumen A. Más aún, la energía retrodispersada por el volumen B hacia el radar requiere transitar nuevamente por toda la trayectoria que la afecta por atenuación una segunda vez. Obviamente, de no considerarse esta atenuación, se desplegará erróneamente la reflectividad (e intensidad de lluvia) del volumen B como menor a la del volumen A.

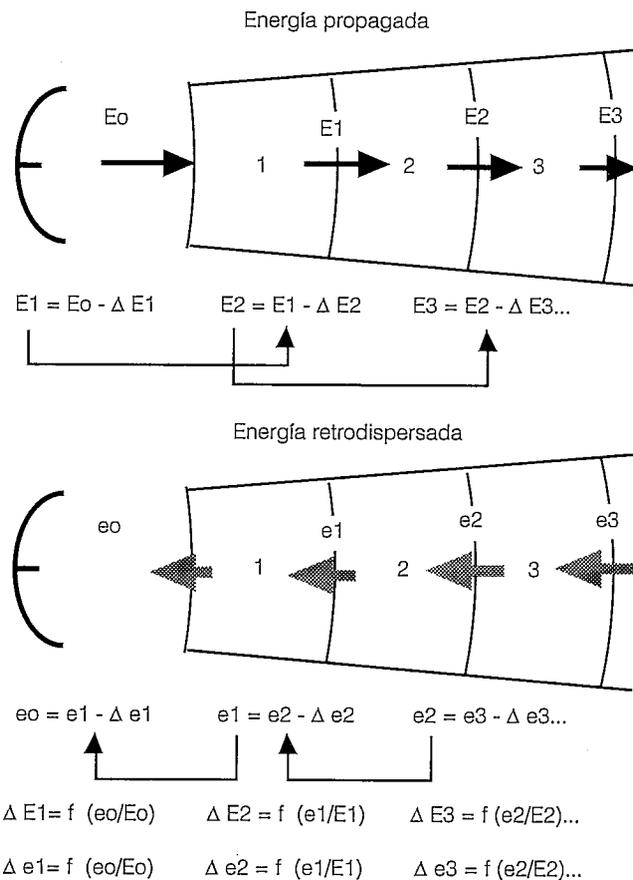
Implantar mecanismos de corrección de atenuación en los cálculos requiere de equipo de procesamiento digital, mismo que se analizará en la segunda parte de este trabajo. A continuación sólo se comenta sobre su fundamento conceptual, para lo que se utiliza la ilustración 14.

Si el radar puede almacenar (en memoria) los valores de reflectividad medidos en todos y cada uno de los volúmenes de muestreo, es posible calcular la energía que llega al volumen 2 a partir de considerar la atenuación sufrida por la señal a su paso por el volumen 1 y la atenuación que sufre la señal de regreso al volver a pasar por él. Con esto se puede calcular la reflectividad del volumen 2 en términos de la energía que realmente llegó a él (a diferencia de la emitida).

Con esta medición se puede calcular la energía que efectivamente recibe el volumen 3 (considerando la atenuación en el volumen 1 y 2). De esta manera, medir adecuadamente la reflectividad en el volumen  $i$  requiere de conocer la reflectividad en los volúmenes 1 hasta  $i-1$  y calcular la atenuación correspondiente al paso de la señal a través de cada uno de ellos. Las condiciones dentro del volumen de muestreo prácticamente no cambian durante el intervalo de medición puesto que el proceso (para todo el recorrido hasta el alcance nominal y de regreso) ocurre cientos de veces por cada segundo.

Es importante recordar que, sin importar la complejidad del algoritmo de corrección por atenuación, debido a tormentas muy intensas cerca del radar, las tormentas posteriores simplemente no aparecerán en pantalla si la energía que llega a las tormentas posteriores no es suficiente para que la señal reflejada arribe al radar con intensidad superior a la del umbral del receptor. Este es un efecto que puede ser importante al observar ciclones tropicales, puesto que para cono-

#### 14. Cálculo de la reflectividad en cada volumen de muestreo considerando atenuación



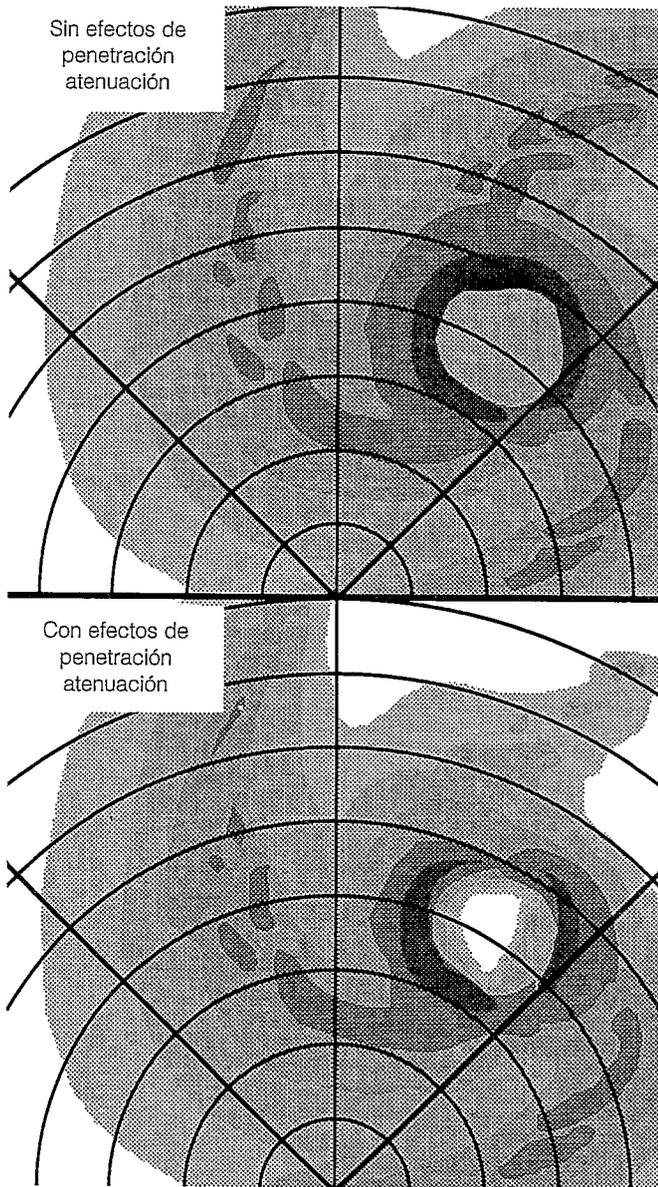
cer la parte posterior del ciclón es necesario que los haces pasen a través de una gran distancia de lluvias sumamente intensas.

La ilustración 15 muestra un caso hipotético en donde se aprecia en pantalla con y sin problemas de penetración y atenuación, un ciclón tropical. Con este ejemplo se comprende que los radares de banda S todavía muestren ventajas apreciables sobre los de banda C.

#### Ecos fijos y de blancos no meteorológicos

Es muy común que para barridos con ángulos de elevación bajos, el haz de un radar sea interceptado por algún obstáculo fijo sobre el terreno, generalmente parte del relieve topográfico. En estos casos, además de que la energía ya no se propaga más allá del escollo, el radar recibe un eco sumamente intenso, ilustración 16. Desde luego, constituye un grave error confundir un eco fijo con una tormenta que se apreciaría muy intensa.

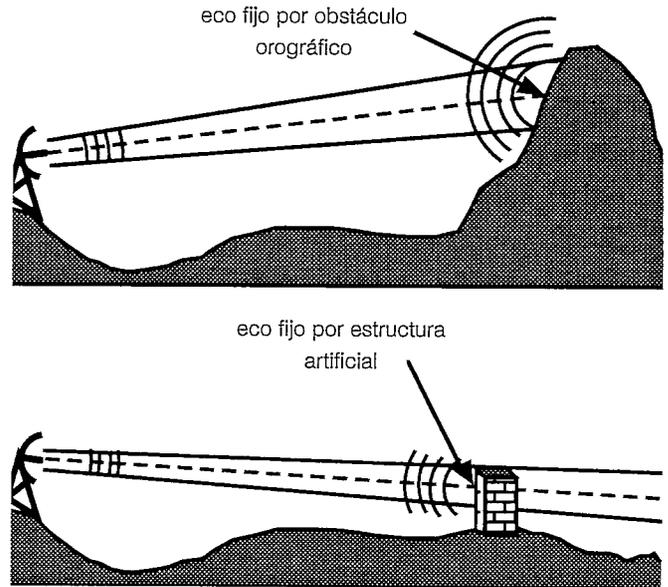
15. Comparación del despliegue en planta de un ciclón tropical con y sin efectos de penetración y atenuación



No obstante los equipos modernos tienen mecanismos para eliminar este tipo de ecos fijos (lo que se tratará en la segunda parte), es importante conocer la orografía alrededor de la ubicación del radar para interpretar adecuadamente productos extraños en apariencia. Aunque esto pueda parecer obvio, en combinación con efectos como la propagación anómala y los ecos de viaje múltiple (que se tratan más adelante), producen en ocasiones discusiones acaloradas entre expertos.

Como mínimo, es necesario que el operador o interpretador de los productos tenga a su alcance mapas

16. Dos ejemplos de ecos fijos o del terreno

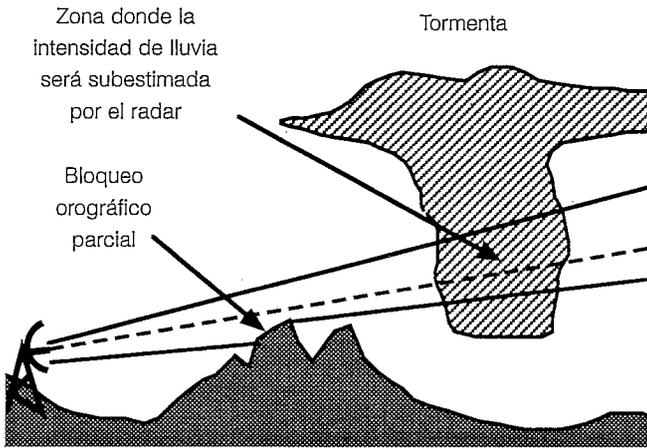


topográficos de la zona alrededor del radar, cuando menos hasta dos veces el alcance nominal en dirección radial. También es conveniente contar con un diagrama del ángulo de elevación en que se presentan bloqueos orográficos para los 360° en acimut. Se pueden lograr interpretaciones más completas utilizando mascarillas de bloqueos orográficos para los niveles atmosféricos constantes que pueden estar sujetos a ellos (para interpretar el producto CAPPI que será tratado en la segunda parte).

Un caso particular, se presenta cuando sólo una parte del haz del radar se ve obstruido por algún eco fijo. Además del contratiempo ya descrito y asociados con esta condición, cuando la obstrucción es total, se originan dos problemas de interpretación:

- Parte de la energía transmitida se propaga atrás del obstáculo y detecta tormentas más allá de él. Sin embargo, al cuantificar la intensidad de lluvia de dicha tormenta la medición automática del radar puede subestimar la verdadera intensidad, ya que la energía total reflejada se presume proviene de la totalidad del volumen de muestreo, cuando en realidad proviene de tan sólo una fracción. Esto implica que la zona que produjo el eco lo hace con una concentración mucho mayor de gotas de agua que la asumida por el radar, ilustración 17.
- Los blancos fijos puntuales a pesar de ser relativamente pequeños tienen tal reflectividad que pueden engañar al radar en cuanto a la posible intensidad

**17. Esquema que muestra condiciones de subestimación de lluvia por bloqueo parcial del haz de radar**



de lluvia en dicha zona. La mayor parte de ellos son estructuras hechas por el hombre (como láminas metálicas perpendiculares al haz del radar, edificios con vidrios reflejantes, etc.).

El caso de una estructura artificial se aprecia también en la ilustración 16. Cuando se trata de ecos intensos relativamente cercanos al radar, no se puede descartar que se trate de ecos de rebote en múltiples superficies artificiales y que de hecho el blanco observado en pantalla ni siquiera se encuentre sobre el acimut y ángulo de elevación indicado por el radar. La colocación de radares en o cerca de áreas urbanas (o que previsiblemente se urbanizarán durante la vida útil de radar), debe considerar la posibilidad de problemas de este tipo.

Existen algunos ecos atmosféricos no meteorológicos, como grandes concentraciones de insectos o de polvo, que en general no se confunden con tormentas intensas, pero pueden parecer lluvias ligeras.

La mejor forma de interpretar adecuadamente los ecos no meteorológicos es mediante el análisis de las características que los diferencian de los ecos meteorológicos (por ejemplo su extensión o estructura vertical) y realizar barridos que comprueben hipótesis planteadas. La experiencia de un operador en un radar específico es el mejor antídoto contra la mala interpretación. En los casos presentados en esta primera parte, se ha tratado de ecos que provienen de la dirección a la que apunta la antena. Pero existe también la posibilidad de que se presenten ecos que no provengan de dicha dirección. Esto se debe al efecto de lóbulos laterales, que pueden capturar ecos fijos cercanos al radar y ser interpretados como provenientes del haz principal. Este tema merece una sección especial.

**Ecoss de lóbulos laterales**

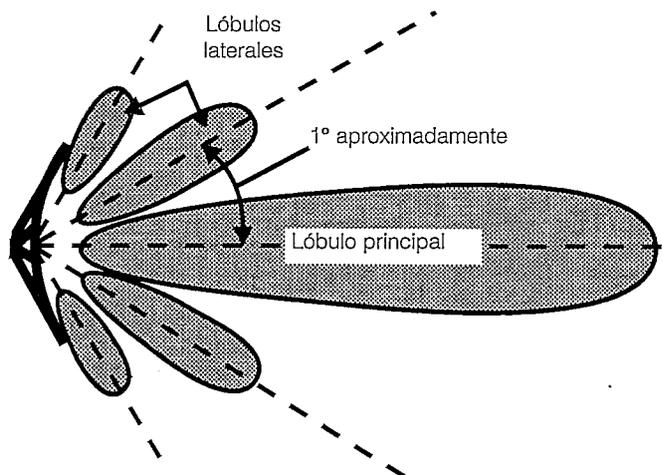
En caso de que existiera una antena parabólica perfecta esta emitiría su energía a través del haz con una distribución concentrada alrededor del eje del mismo. De igual manera, recogería ecos exclusivamente de blancos que se encontraran dentro del haz.

En la realidad las antenas parabólicas, aún la mejor construida, presentan los llamados lóbulos laterales, que son similares al lóbulo principal (que describe la distribución de energía alrededor del eje del haz) pero más pequeños y no se encuentran alineados con el eje principal de la antena, sino distribuidos alrededor del lóbulo principal. El decir que son más pequeños implica que la cantidad de energía que se fuga a través de ellos es de órdenes de magnitud menor a la energía emitida por el lóbulo principal.

En general los lóbulos laterales más grandes son aquellos vecinos del lóbulo principal, pero orientados en direcciones ligeramente divergentes del mismo. El ángulo específico depende de las características de la antena, pero es común que los lóbulos laterales más importantes se encuentren en un anillo de 1° aproximadamente alrededor del lóbulo principal. Entre más desalineados con el eje principal serán más reducidos de tamaño (una fracción más pequeña del total se fuga a través de ellos) e inclusive existe alguna fuga en dirección hacia atrás del plato parabólico (por su parte convexa). La ilustración 18 muestra el lóbulo principal y algunos de los lóbulos laterales.

Una característica importante es que estos lóbulos laterales no sólo intervienen en la emisión sino también en la recepción. Esto es, la energía fugada a través de los lóbulos laterales, al ser retrodispersada es captura-

**18. Corte bidimensional del patrón de emisión y recepción de una antena parabólica real (sólo esquemático)**



da nuevamente por la antena y conducida al receptor del radar. El problema radica esencialmente en que el radar no tiene ninguna forma de diferenciar los ecos que provienen del lóbulo principal o de los lóbulos laterales. Esto es, todo eco recibido de los lóbulos laterales será interpretado erróneamente como el eco de un blanco que se encontrara dentro del haz principal.

Aunque la cantidad de energía fugada por los lóbulos laterales es pequeña, estos usualmente inciden a corta distancia del radar con blancos muy reflejantes (como el terreno o estructuras artificiales vecinas al radar) produciendo reflectividades muy altas. La combinación desafortunada de estos factores hace que usualmente la zona directamente alrededor del radar, desde cientos de metros hasta en ocasiones decenas de kilómetros, se encuentre contaminada con ecos falsos que dificultan la interpretación de la información proveniente de ecos meteorológicos.

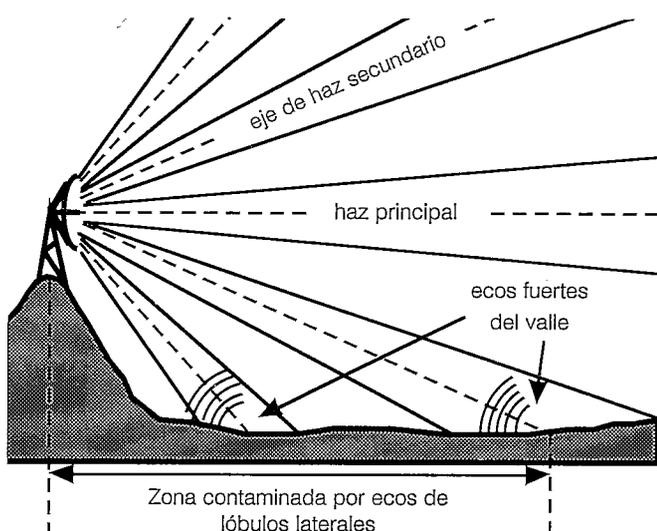
Desafortunadamente lo que parecería una solución ideal al problema, colocar faldas alrededor de la antena o de la estructura que sostiene al radar para interceptar los ecos de lóbulos laterales antes de alcanzar una distancia fuera de la zona ciega, no funciona ya que los lóbulos laterales emergen del eje de la antena a cientos de metros de la misma y no directamente desde ella.

Considerar la existencia de los lóbulos laterales es de suma importancia en los estudios de ubicación de radares meteorológicos. Aún cuando a gran escala una cierta ubicación pueda ofrecer una gran cobertura (por falta de obstáculos orográficos significativos o por un buen aprovechamiento de una cima para con-

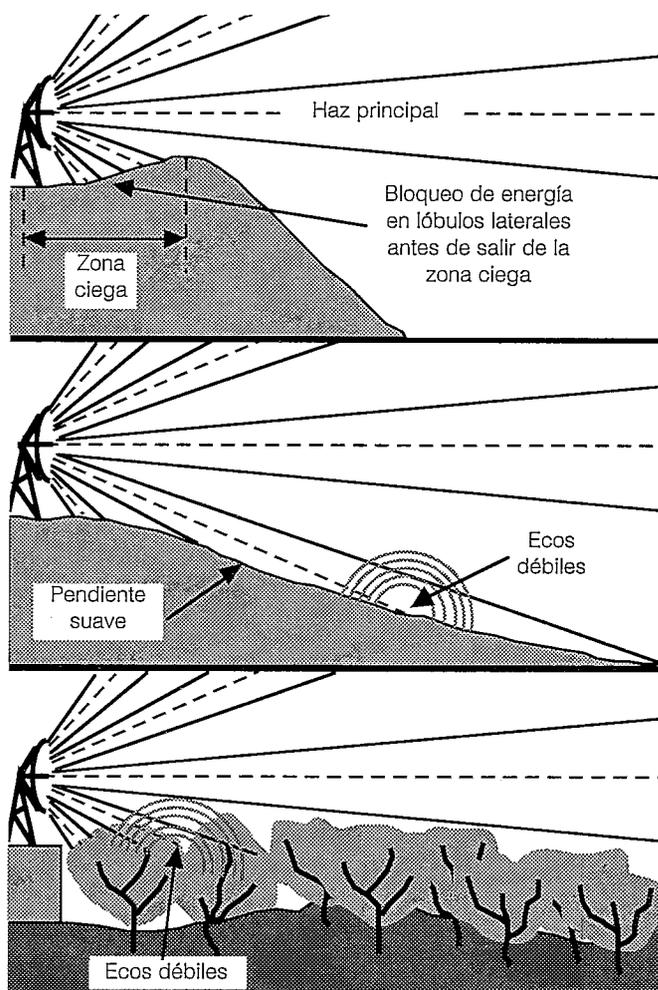
trarrestar la curvatura de la Tierra), la excesiva contaminación de la parte central de su cobertura por ecos de lóbulos laterales puede hacerlo inadecuado. Una ubicación particularmente desfavorable en este contexto es la cima de una montaña alta de punta aguda con extensos valles alrededor. La energía fugada por los lóbulos laterales incidirá sobre los valles a distancias de hasta decenas de kilómetros del radar y sus ecos pueden inutilizar una buena porción de su cobertura central, ilustración 19.

Por el contrario, una ubicación adecuada puede minimizar estos efectos. Una ubicación ideal sería la cima de una montaña con pendientes suaves y una plataforma plana (o ligeramente convexa) en su cima. En este caso, la energía de los lóbulos laterales incidirá a distancias relativamente cortas del radar, idealmente todavía dentro de la zona ciega del mismo, por lo que no tendrían efecto alguno.

19. Esquema de una ubicación desfavorable en cuanto a ecos de lóbulos laterales



20. Esquema de una ubicación favorable en cuanto a ecos de lóbulos laterales



Otra característica favorable es la existencia de vegetación densa y uniforme alrededor del radar o sobre las laderas de la montaña sobre la que se encuentre. Los ecos producidos por esta vegetación serán relativamente débiles y la energía se dispersará en múltiples direcciones, minimizando los efectos de contaminación por lóbulos laterales, ilustración 20.

Sin embargo, vale la pena observar que los diagramas en la ilustración 20 sólo son válidos para barridos con ángulos de elevación nulos o pequeños. Al elevar la antena para un barrido más alto, los lóbulos laterales ya no serán bloqueados por el terreno, por la vegetación o por ambos a corta distancia. Afortunadamente en estos casos, si las distancias a las que inciden los lóbulos laterales son grandes, la variación de  $1/r^4$  de la densidad de energía hace que estos ecos no rebasen el umbral de sensibilidad del receptor. Es imprescindible mantenerse alerta a la posible presencia de este efecto en productos de radar y, nuevamente, el conocimiento de la región y la experiencia son esenciales en su identificación.

### Ecoss de viajes múltiples

Ya se ha mencionado que los pulsos electromagnéticos emitidos por el radar viajan radialmente hacia el infinito; no existe ninguna barrera que impida su paso más allá del alcance nominal del radar. ¿Qué pasa si alguno de estos pulsos incide sobre un blanco más allá del alcance nominal? Al igual que en el caso de que los blancos se encuentren dentro de este alcance nominal, se presenta un cierto reflejo de energía hacia el radar, con la única diferencia de que éste se presentará en la antena no durante el intervalo de escucha inmediatamente posterior a la emisión del pulso del que proviene, sino durante el intervalo de emisión o recepción de algún pulso posterior.

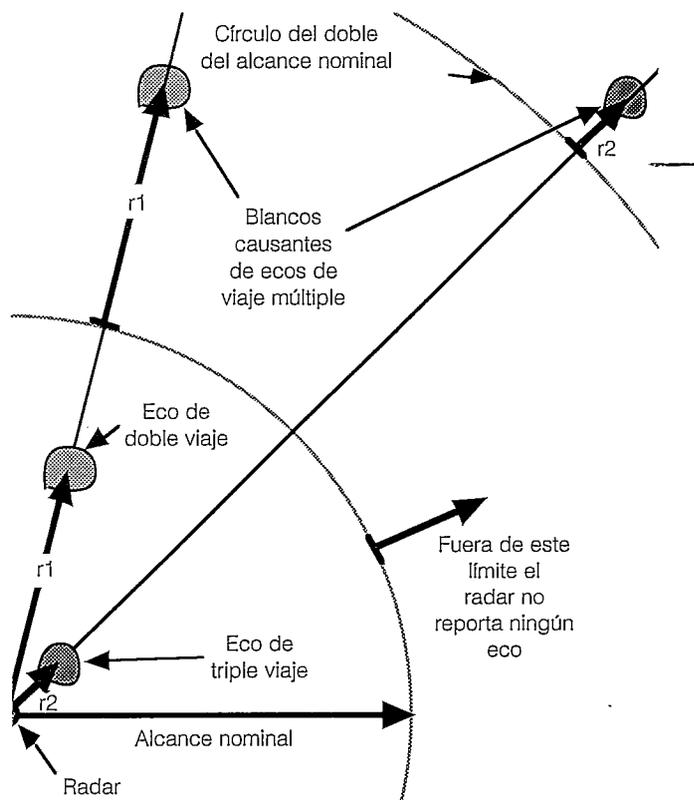
De recibir la señal durante un intervalo de emisión (o conmutación), el radar es incapaz de detectar dicho eco. Sin embargo, si llega durante un intervalo de recepción, el eco será detectado. El problema radica en que el procesamiento de la señal presupone que los ecos se encuentran dentro del alcance nominal y, no existiendo ningún mecanismo para diferenciar los ecos de viaje múltiple de los normales, el radar interpretará erróneamente que se trata de un eco del último pulso emitido. La implicación práctica es que algunos de los ecos de un producto de radar (dentro del radio de alcance nominal) pueden corresponder a blancos (ecos fijos o tormentas) que en realidad se encuentran fuera de él.

En general los ecos de viaje múltiple que deben considerarse en la interpretación de un producto, son

sólo los que corresponden a distancias de dos y como máximo tres veces el radio de alcance nominal. Debido a la dispersión de la energía (con  $1/r^4$ ) los ecos de mayores distancias simplemente estarán siempre por debajo del umbral de sensibilidad del receptor. Es por esta misma razón que la mayoría de las interferencias por ecos de viaje múltiple se refieren a blancos fijos, pues aún a grandes distancias producen ecos significativos. Así pues insistimos en que es muy importante conocer la topografía alrededor del radar, no sólo dentro del rango del alcance nominal, sino dos y tres veces más allá.

Pero ¿Cómo identificar la posibilidad de la presencia de ecos (falsos) de viaje múltiple? Si se sospecha que provienen de blancos fijos (porque no se mueven en un lapso razonable) será necesario considerar la presencia de obstáculos orográficos en la misma dirección radial, pero a distancias tales que expliquen su ubicación en la pantalla. La ilustración 21 explica dónde sería ubicado por un radar un eco de viaje múltiple. Cuando se sospecha de ecos de viaje múltiple producidos por blancos meteorológicos, la única alternativa es la de consultar otras fuentes de información complementarias (satélites o estaciones automáticas en superficie).

21. Esquema de ubicación de ecos falsos de viaje múltiple con respecto a las posiciones de los blancos que los producen

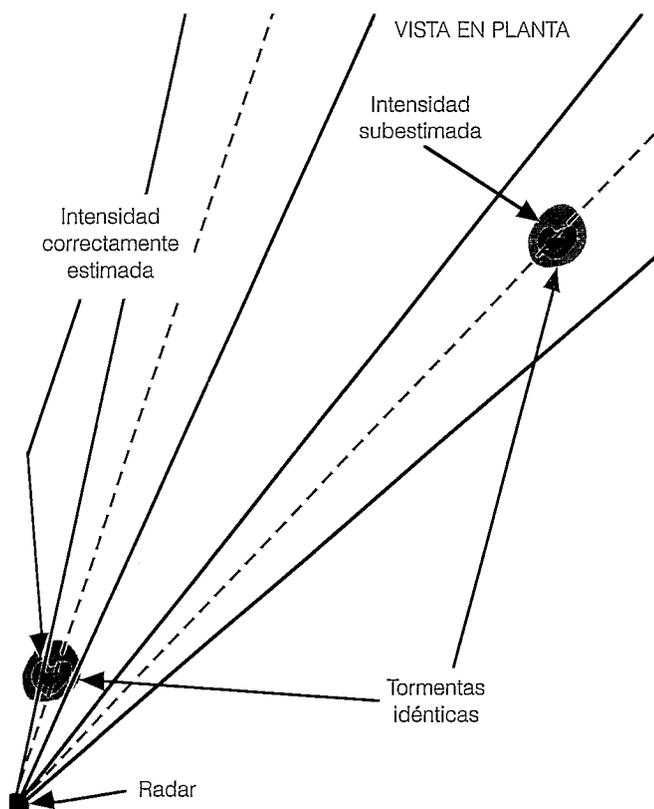


**Ocupación parcial del volumen de muestreo**

Debido a la característica divergente del haz de radar (ineludible bajo la tecnología actual) se pueden presentar problemas de interpretación cuantitativa (en cuanto a intensidad de lluvia) de la situación real cuando las tormentas detectadas cubren sólo parcialmente el volumen de muestreo del radar. Obviamente esto es más común conforme más alejada se encuentre la tormenta del radar pues a mayor distancia el tamaño del volumen de muestreo aumenta, ilustración 22. Aquí se muestran dos tormentas de características idénticas, excepto en cuanto a su distancia al radar. La más cercana cubre en su totalidad el volumen de muestreo mientras que la más alejada sólo lo hace parcialmente.

Puesto que el radar mide solamente la reflectividad promedio en el volumen de muestreo, existirá una subestimación de la intensidad de lluvia para la tormenta más alejada, ya que la energía total reflejada por la tormenta se interpretará como proveniente de la totalidad del volumen cuando en la realidad proviene sólo de la parte cubierta por la tormenta. Esto implica que el ra-

22. Diagrama ilustrativo del caso del problema de estimación de intensidad para tormentas que no cubren totalmente el volumen de muestreo



dar interpretará a la tormenta como más extensa de lo que realmente es pero de menor intensidad. En cambio la tormenta más cercana será correctamente estimada en cuanto a intensidad. Este problema no puede ser solucionado de ninguna forma simple y de hecho es compartido por cualquier instrumento con resolución variable.

El operario o usuario de los productos debe conocer la resolución efectiva del radar a diferentes distancias y que la interpretación que recibe a través del instrumento es de valores promedio en los volúmenes de muestreo. Por ejemplo, un operador observando una zona conocida, en la época del año de la que se trata, por la presencia predominante de tormentas convectivas de extensión relativamente pequeña, debe saber que a distancias del radar tales que el volumen de muestreo rebasa dicha extensión, las estimaciones de intensidad de lluvia que recibirá serán posiblemente deficitarias.

**Propagación anómala**

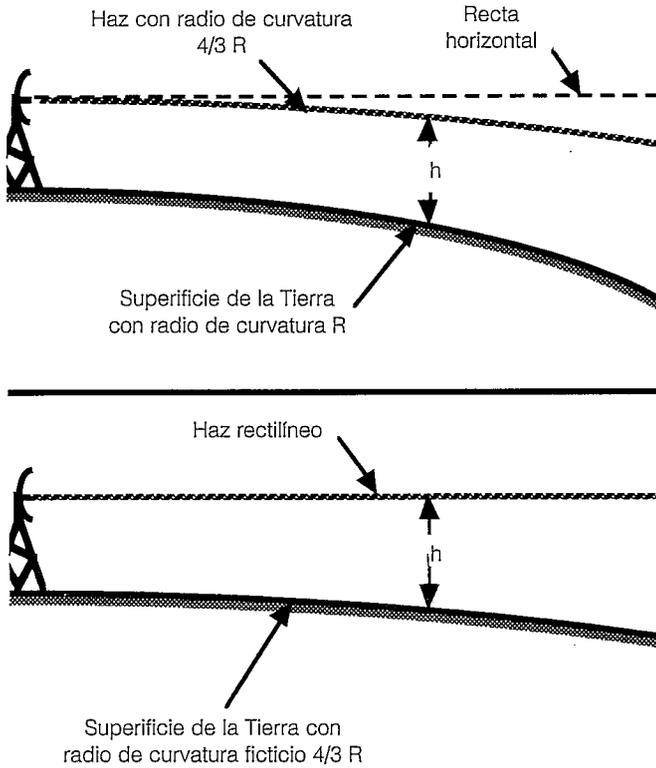
Los haces de radar no se propagan en forma rectilínea a través de la atmósfera. Los pulsos de ondas electromagnéticas, se encuentran sujetos al fenómeno de refracción debido a la heterogeneidad en la composición de la atmósfera (principalmente en cuanto a vapor de agua y oxígeno) y a que la velocidad de propagación varía ligeramente con la composición. Así, resulta que la trayectoria que siguen los pulsos es ligeramente curvilínea.

En una atmósfera normal, con una composición típica, los haces de radar, ligeramente curvos hacia abajo con una curvatura menor a la de la Tierra, al alejarse se separan de la superficie, pero no tan rápidamente como lo harían suponer todos los diagramas hasta ahora presentados, ilustración 23.

Sin embargo, los diagramas no contienen error grave bajo una adecuada interpretación. Dado que el radio de curvatura típico de los haces de radar en condiciones normales es de 4/3 el radio de curvatura de la Tierra, si se dibuja a la superficie de la Tierra con un radio de curvatura ficticio 1/3 mayor al real, en efecto se pueden dibujar los haces de radar como rectilíneos, ilustración 23. Conocer la propagación normal de los haces es importante, pero el despliegue y cálculos internos en el radar ya consideran esto intrínsecamente. Sin embargo, la correcta interpretación de los productos de radar debe considerar la posibilidad de que estos se encuentren afectados en alguna medida por propagación anómala.

La propagación anómala se presenta cuando la composición atmosférica se desvía significativamente

**23. Haz de radar curvo por efecto de refracción en una atmósfera normal y suposición geométrica simplificada para considerar a los haces como rectos**



de la normal, modificando la curvatura del haz de radar (hacia la superficie terrestre) e inclusive invirtiéndola en alguna parte de su recorrido, ilustración 24. Desgraciadamente el radar no mide la composición gaseosa de la atmósfera por lo que no tiene manera de contrarrestar o considerar la propagación anómala. El resultado final es que el volumen de muestreo real del radar puede encontrarse ligeramente más arriba o más abajo que la altura a la que los considera el radar. Solamente un operador experimentado en una ubicación específica (y que comprenda este fenómeno) puede identificar claramente la propagación anómala y sólo en caso de que se presenten ecos fijos de tierra en lugares distintos a los típicos, ilustración 24.

**El fenómeno de la banda brillante**

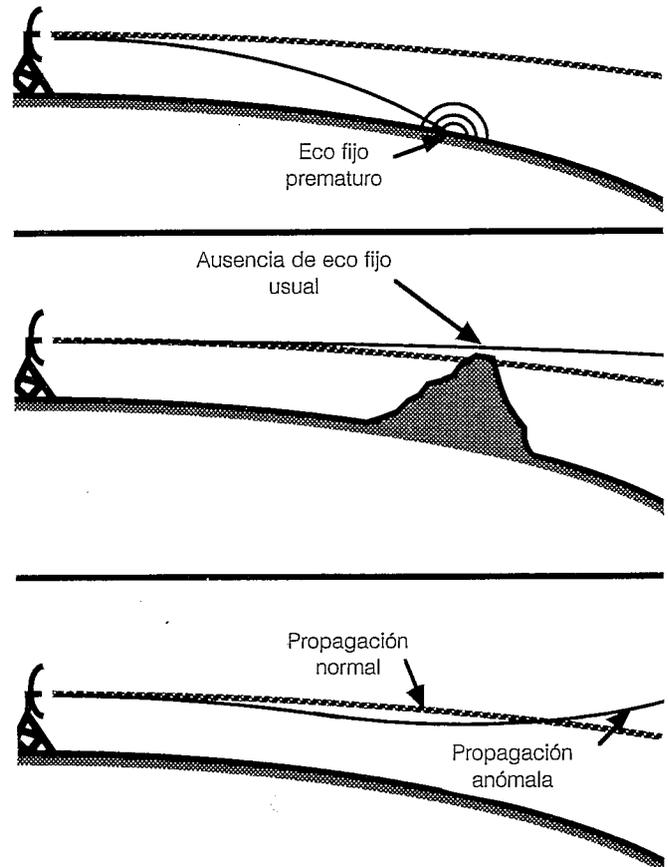
La atmósfera en su parte más baja (la tropósfera) presenta un gradiente vertical de temperatura de alrededor de  $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Esto implica que en las condiciones normales de la temperatura superficial en México, el nivel aproximado de congelación del agua se encontrará entre 1.5 y 4.5 km sobre la superficie, donde las

partículas de agua suspendidas en la atmósfera estarán en un estado semilíquido-semisólido.

La reflectividad del agua líquida es bastante mayor que la reflectividad del hielo por lo que, para partículas de igual tamaño, los ecos serán más intensos en el caso de agua que en el de hielo. Es común que los cristales de hielo se aglomeren en forma casi esférica hasta un tamaño bastante más grande que el de las gotas de lluvia con un alto grado de porosidad (el granizo común).

Cuando en una zona de precipitación pluvial los cúmulos de granizo en su descenso llegan a temperaturas por encima de  $0^{\circ}\text{C}$  los cristales en su superficie empiezan a licuarse produciendo momentáneamente grandes partículas de hielo cubiertas por una delgada capa de agua. Estas partículas aparecen al radar como enormes gotas de agua con una gran reflectividad. Por ello es común encontrar en los productos de radar, alrededor de la altura de congelación una delgada capa de una reflectividad mucho mayor que la inmediatamente abajo o sobre ella.

**24. Esquema con tres casos de propagación anómala de haces de radar (y como poder identificarla en base a ecos fijos)**



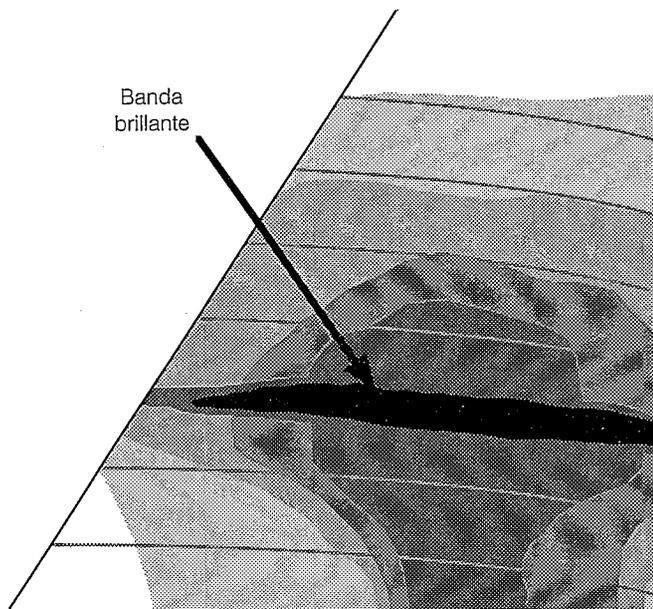
Debido a las características de variación de temperatura en la atmósfera (mucho más marcada en la vertical que en la horizontal) esta capa aparece como casi horizontal y es más fácilmente identificable en el producto RHI.

Las altas reflectividades, representadas por zonas de gran brillantez en los antiguos tubos de rayos catódicos monocromáticos, sugirieron que a este fenómeno se le denominara banda brillante. En la ilustración 25 se muestra cómo aparecería en un producto RHI. Es importante que el operador o usuario de productos de radar sepan que dicha banda no representa en realidad una zona de precipitación más intensa, sino una manifestación del fenómeno ya descrito.

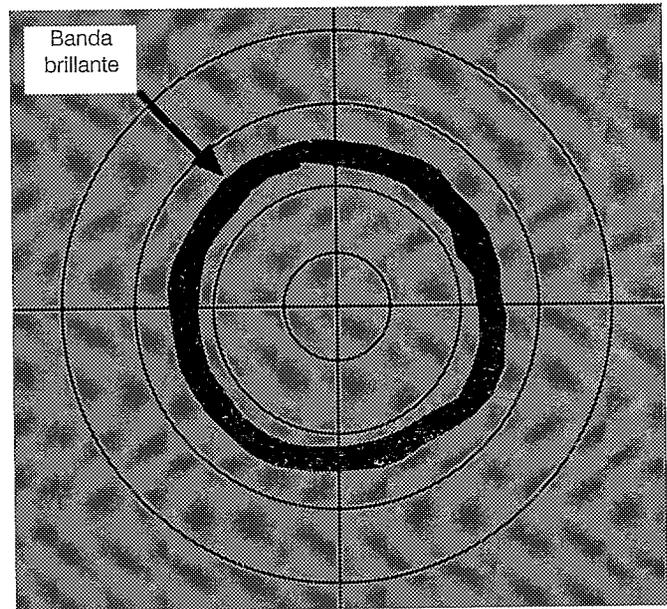
La banda brillante no sólo puede aparecer en productos RHI, sino en todos aquellos que incluyan el nivel atmosférico de congelación. Por ejemplo, en una zona de lluvia completamente uniforme en planta alrededor de un radar, la banda brillante aparecería como un anillo más brillante en el producto PPI, a la distancia a la que el haz del radar intercepta el nivel de congelación, ilustración 26.

En condiciones de lluvias más realistas el fenómeno se sospecha al encontrar porciones de un anillo brillante con centro en el radar y puede comprobarse en base a mediciones de perfil de temperatura (a través de radiosondeos por ejemplo) cuando la zona brillante efectivamente corresponde al nivel de congelación (tanto en RHI como PPI). Es común que la banda brillante se vea interrumpida dentro de celdas convecti-

25. Diagrama esquemático de un producto RHI que presenta el fenómeno de banda brillante



26. Esquema de un PPI afectado por el fenómeno de banda brillante en una situación ideal de lluvia completamente uniforme



vas que perturban significativamente la estratificación normal de temperaturas de la atmósfera.

#### Ubicación y rastreo del movimiento de tormentas

La política de operación más común en un radar tradicional, para cumplir con la primera función de este instrumento, consiste en un barrido PPI continuo a un ángulo de elevación pequeño ( $0.5$  a  $1^\circ$ ) para identificar en planta la posición de tormentas. Su ubicación exacta se presenta en pantalla en base al acimut y distancia para la que se detectó el eco.

El operador es auxiliado en esta labor con mapas base (poblaciones, carreteras, cuencas, etcétera) que se colocan sobre el dispositivo de despliegue. Es usual alternar barridos de PPI para varios rangos de distancia radial, digamos  $60$ ,  $120$ ,  $240$  y  $480$  km. Una vez identificada la posición de una tormenta o una región de tormentas, comúnmente se realizan barridos RHI para investigar su estructura vertical y evaluar cualitativamente su peligrosidad. El movimiento de las tormentas se observa en un radar tradicional mediante la comparación de las posiciones de núcleos de precipitación con los barridos consecutivos PPI. Para ello se efectuarán barridos frecuentes con el fin de asegurar la correspondencia entre dos núcleos en barridos consecutivos. Es también común que se estudie una zona específica, realizando barridos PPI limitados a un cierto sector en acimut.

## Evaluación cuantitativa de lluvias

Con base en un argumento de conservación de energía, considerando su viaje de ida y vuelta desde el radar hasta el blanco, se puede inferir que la cantidad que los radares dan como resultado de su medición,  $Z$  o reflectividad logarítmica, es una versión expresada en decibelios del factor de reflectividad del radar  $z$ , que corresponde a

$$z = \frac{P_r}{P_t} r^2 \left( \frac{1}{C_{rad}} \right) \left( \frac{1}{|KI|^2} \right)$$

donde:

- $P_t$ : potencia transmitida por el radar
- $P_r$ : potencia recibida por el radar
- $r$ : distancia del radar al blanco
- $C_{rad}$ : Factor que aglomera diversas características del radar (como ganancia de la antena, apertura del haz, longitud de onda, longitud del pulso, etcétera y algunas constantes numéricas); constante para un radar dado
- $|KI|$ : magnitud del índice complejo de refracción que depende fundamentalmente del material del blanco (agua o hielo en el caso que nos ocupa)

El factor de reflectividad del radar,  $z$ , es una variable definida como la sumatoria, sobre un volumen unitario, de la sexta potencia de los diámetros de todas las partículas retrodispersivas que se encuentran dentro de él:

$$z = \sum_i D_i^6$$

La teoría de retrodispersión de energía electromagnética se encuentra muy bien desarrollada por lo que, con base en las ecuaciones anteriores, de conocerse con exactitud la distribución de tamaños de las gotas de agua dentro del volumen de muestreo del radar, se podría obtener de la medición de reflectividad el número de gotas de cada tamaño y en consecuencia) la intensidad de lluvia en forma bastante precisa. Desgraciadamente, dicha distribución de tamaños de las gotas no es conocida para cada caso particular y se hace necesario recurrir a relaciones empíricas entre reflectividad ( $z$  en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ) e intensidad de lluvia ( $i$  en  $\text{mm}/\text{hora}$ ). Decenas de ellas han sido obtenidas para casos particulares siendo la expresión genérica más común

$$z = a i^b$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes empíricas; una de las relaciones particulares más utilizadas es la de Marshall-Palmer

$$z = 200 i^{1.6}$$

Estas expresiones son obtenidas en estudios experimentales donde se tienen mediciones de radar y evaluaciones independientes de la distribución de tamaños de gotas (o de intensidad de lluvia directamente) en forma simultánea. Aunque los equipos comerciales disponibles incluyen un cierto menú de estas relaciones  $z-i$ , el operario o usuario deben conocer las posibles diferencias en los procesos de lluvia entre las condiciones para las que fue obtenida la expresión en cuestión y las condiciones en las que se encuentra el radar.

Es importante puntualizar la dependencia de la reflectividad con la sexta potencia del diámetro de la gota, lo que hace que para densidades iguales de agua de lluvia en el volumen de muestreo, gotas más grandes producirían una medición de reflectividad mucho mayor que gotas más chicas. Es también importante recalcar que la magnitud del índice de refracción es dramáticamente mayor para agua líquida que para cristales de hielo. Esto introduce una complicación más en la obtención de relaciones empíricas  $z-i$ .

Hidrológicamente la intensidad de lluvia deseada es aquella que ocurre directamente sobre la superficie del terreno, pero ésta raramente puede ser medida. Las mediciones de lluvia con radar corresponden a volúmenes de muestreo a una cierta altura sobre el terreno. Este hecho puede producir que la lluvia efectivamente interceptada por el terreno pueda ser mayor o menor que la medida en altura.

El operador o usuario deben tener claro, además, que los despliegues tradicionales de productos de radar corresponden a cortes bidimensionales y que el flujo atmosférico puede llevar a las gotas de lluvia medidas en altura a caer en ubicaciones no directamente bajo el punto de medición. De todas formas, los productos hidrológicamente más útiles del radar serán aquellos que evalúan la intensidad de lluvia al nivel atmosférico más bajo posible.

## Operación típica de un radar tradicional

El panel de control de un radar tradicional consiste fundamentalmente en pantallas de despliegue de los productos PPI y RHI (por separado) así como de una pantalla de observación de la señal cruda (al estilo osciloscopio). Además, tiene una serie de perillas, botones

e indicadores que permiten al operador controlar el tipo y frecuencia de barrido, el alcance radial, el ángulo de elevación, activar los filtros analógicos de la señal, etcétera. La electrónica es del tipo analógico y en general el panel de control es de tamaño apreciable y requiere estar a una distancia relativamente corta del resto del equipo del radar.

Dado que la información se despliega conforme se va midiendo y no existe mecanismo alguno de almacenamiento temporal o permanente, sólo el operador puede observar directamente las mediciones. En ocasiones la pantalla de despliegue tiene capacidad de mostrar varios niveles de brillantez (usualmente no más de tres) por lo que la estructura de una tormenta puede ser observada en forma burda.

Es común que la pantalla pueda mostrar un solo nivel de brillantez y el operador tenga que recurrir a filtros para observar diferentes rangos de reflectividad en barridos consecutivos, uno solo a la vez. La información medida se almacena para archivo a través de calcas manuales de la información en pantalla sobre pliegos de papel translúcido preparados previamente con mapas de la región del radar en cuestión.

Como ya se ha mencionado el barrido tradicional es un PPI a un ángulo de elevación relativamente bajo, y la exploración ocasional de fenómenos de interés a través de barridos a otros ángulos de elevación o de barridos RHI.

Dado que las decisiones asociadas a emergencias hidrometeorológicas no se toman exclusivamente en la ubicación física del radar, es necesario transmitir la información a los centros de toma de decisión. Tradicionalmente esto se hacía a través de representar la situación observada en forma simplificada utilizando códigos estandarizados y transmitir el mensaje de viva voz a través de teléfono o radio. El mensaje recibido en los centros de toma de decisión podía ser decodificado y una imagen simplificada de la situación reconstruida en papel. En los últimos años se hizo posible el trans-

mitir directamente las calcas a través de facsímil vía teléfono.

## Conclusión

Los radares meteorológicos, aún en su versión tradicional, son instrumentos de monitoreo atmosférico de gran alcance que permiten la evaluación de intensidades de lluvia con una relativamente alta resolución, tanto en el tiempo como en el espacio. Se presenta una descripción de sus funciones y componentes, sus principios de funcionamiento y su forma tradicional de operación. Sin embargo, la correcta interpretación de sus mediciones debe considerar una serie de características y limitaciones entre las que destacan:

- Forma en que la atmósfera es *muestreada* para cada tipo de barrido.
- Resolución de las mediciones en dirección radial y tangencial.
- Alcance radial nominal y cobertura real.
- Penetración y atenuación del haz al viajar a través de la atmósfera.
- Posible presencia de ecos fijos terrestres y aéreos no meteorológicos.
- Contaminación introducida por la fuga de energía a través de lóbulos laterales.
- Manifestaciones de blancos meteorológicos con ocupación sólo parcial del volumen de muestreo.
- Posible presencia de propagación anómala del haz.
- Manifestaciones de la zona de temperatura cercana a la de congelación en la atmósfera.

Estos conceptos, presentes en todo radar meteorológico —tradicional y moderno— son explicados presentándose sus principales efectos y forma de identificarlos. Los aspectos modernos de los radares meteorológicos actuales serán tratados en la segunda parte de este trabajo.