

# Capítulo 15.

## Radar meteorológico

---

15.1 Tipos de Radar

15.2 Partes del radar

15.3 Cálculo de la altitud del haz

15.4 Problemas asociados al cubrimiento radar

15.5 Volumen de muestreo en un radar

15.6 Reflectividad

15.7 Interpretación de las imágenes radar

200 Los radares meteorológicos detectan agua precipitable<sup>36</sup>, calculan su posición y estiman su composición, pero no detectan formación de nubes. Las ventajas de los datos radar sobre los satélites meteorológicos son su alta resolución temporal (una imagen cada 5 minutos) y espacial (150 m x 1,7 km a 100 km de distancia del radar), la posibilidad de analizar una tormenta en el eje vertical y horizontal, y una representación más fidedigna del campo de precipitación.

Las ventajas del radar se incrementan cuando es utilizado como una red de cubrimiento nacional (figura 104). En la actualidad, Colombia cuenta con cinco radares meteorológicos de doble polarización (representados en color negro y rojo) y se contempla la adquisición de tres radares adicionales (azul intermitente). La cercanía de Colombia a Curazao le permite al departamento de la Guajira estar cubierto por el radar del país vecino (violeta).

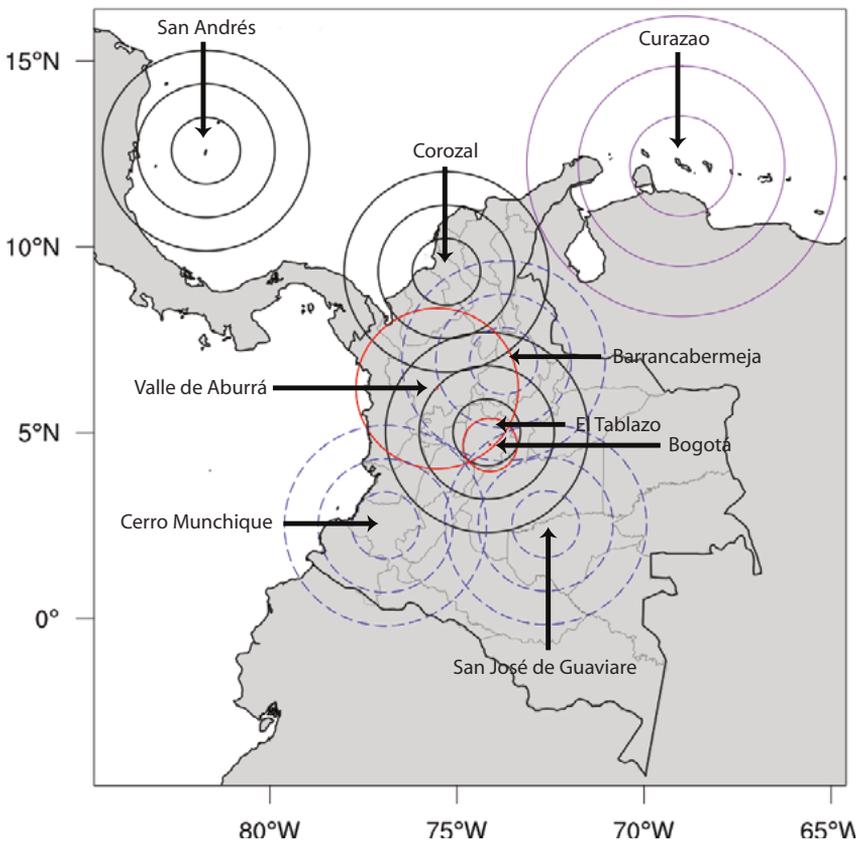


Figura 104. Ubicación de los radares meteorológicos en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

36 Cantidad de vapor de agua con potencial de condensarse y convertirse en precipitación.



No todos los radares son iguales, se diferencian según el tipo del radar, frecuencia (banda), ángulos de elevación, alcance y especificaciones propias del terreno donde fueron instalados. En el caso colombiano, estas características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 32. Especificaciones técnicas de los radares colombianos.

	El Tablazo	Corozal	San Andrés	Curazao	Valle de Aburrá	Bogotá
Ubicación	5,0118 N 74,2037 W	9,3308 N 75,2827 W	12,5883 N 81,7080 W	12,1784 N 68,9494 W	6,1908 N 75,5286 W	4,6751 N 74,1139 W
Elevación antena	3 544 m	146 m	33 m	88 m	2 813 m	2 570 m
Fecha de entrada en operación	FEB/2012	NOV/2012	NOV/2014	OCT/2015	ENE/2012	FEB/2016
Institución propietaria	UAEAC			MDC	SIATA	IDIGER
Alcance máximo	300 km			450 km	240 km	80 km
Tipo	Vaisala WRM200				EEC	
Ángulos de elevación	0°, 0,5°, 1°, 2°, 4,5°, 7°, 10°, 15°, 20° y 30°	0,5°, 1°, 2°, 3°, 5°, 7°, 10°, 15°, 20° y 30°	0,5°	0,5°, 1°, 2°, 4°	0,5°, 1°, 2°, 4° Barridos verticales	0°, 0,5°, 1,5°, 2,5°, 3,5°, 4,5°, 5°, 10°, 15° y 20°
Banda	C					X

Fuente: elaboración propia.

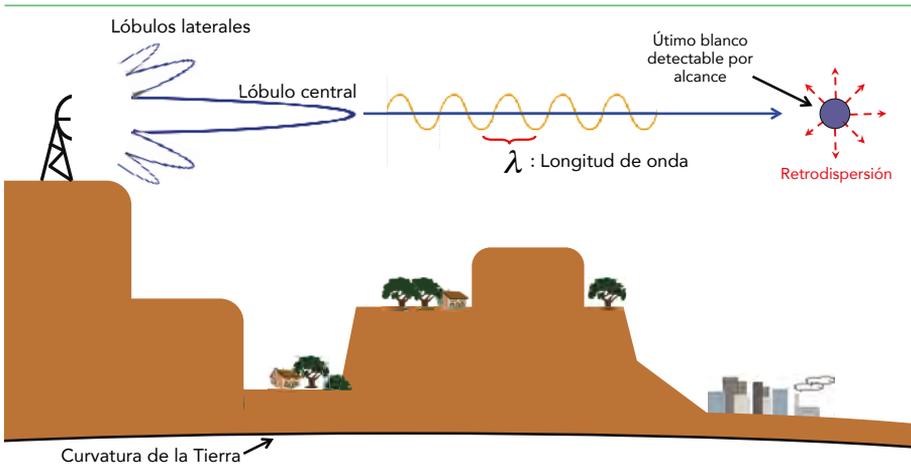
La información en línea proveniente de estos radares puede ser consultada en la página web de las instituciones que los administran según se relaciona:

- Consulta Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil (UAEAC)  
<http://190.27.249.248/radar/index/aoi/CRM/Reflectivity%20Base%200.5%20degree>.
- Consulta Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA)  
<http://www.siata.gov.co/newpage/index.php>.
- Consulta Departamento Meteorológico de Curazao (MDC)  
[http://www.meteo.cw/rad\\_still\\_ppi.php?Lang=Eng&St=TNCC&Sws=R11](http://www.meteo.cw/rad_still_ppi.php?Lang=Eng&St=TNCC&Sws=R11).
- Consulta Instituto Distrital de Gestión del Riesgos y Cambio Climático (IDIGER)  
<http://www.sire.gov.co/idiger>.

El término Radar proviene de *Radio Detection And Ranging*, en otras palabras: detectar y medir distancias por medio de ondas de radio. Los radares meteorológicos funcionan mediante la emisión de pulsos de energía electromagnética con diferentes longitudes de onda.

Por efecto de la difracción, esta energía se concentra principalmente en un lóbulo central y en lóbulos laterales de menor energía; cuando el haz choca contra las gotas de lluvia, se dispersa en todas las direcciones (figura 105), regresando una pequeña porción de la señal hasta el radar. Esta pequeña señal es analizada por el radar y decodificada en términos de localización e intensidad del fenómeno. A través del cambio de posición de las partículas en tiempo y en espacio, se deriva la dirección e intensidad del viento.





**Figura 105.** Distribución lobular de la energía emitida por el radar.  
**Fuente:** elaboración propia.

Los radares meteorológicos operan en tres bandas típicas (longitud de onda) del espectro electromagnético:

**Tabla 33.** Bandas típicas de los radares meteorológicos.

Banda	Longitud de onda central ( $\lambda$ )	Frecuencia	Características
X	3 cm	10 GHz	Poca penetración, antena pequeña, sensible a gotas muy pequeñas, alcance máximo limitado por atenuación <sup>37</sup> .
C	6 cm	6 GHz	Mediana penetración, antena mediana, sensible a gotas medianas.
S	12 cm	3 GHz	Buena penetración, antena grande, sensible solo a gotas grandes, menor pérdida de energía por atenuación.

**Fuente:** elaboración propia.

## 15.1 Tipos de radar

**Radar Doppler:** Mediante el análisis de las diferencias entre las frecuencias emitidas y recibidas, detecta la velocidad y dirección de las partículas en movimiento respecto al radar. Si la frecuencia disminuye o aumenta, el blanco se aleja o se acerca al radar. Este tipo de radares miden directamente la dirección radial del viento y detectan automáticamente fenómenos como el *wind shear* y las ráfagas de viento.

Este radar funciona bajo el principio de Christian J. Doppler (1853), quien descubrió que como la longitud de onda ( $\lambda$ ) no varía, la velocidad ( $v$ ) de un objeto en movimiento era directamente proporcional al corrimiento de la frecuencia ( $f$ ) causado por ese objeto. Esta relación se aplicaría directamente si el blanco siempre se moviera en la misma

<sup>37</sup> La atenuación es definida por Collier (1996) como la reducción de intensidad de la onda electromagnética a lo largo de su ruta.

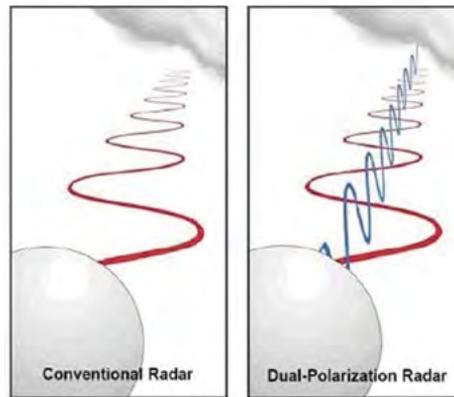


dirección del haz, pero como esto difícilmente se presenta, es necesario contemplar el ángulo ( $\varphi$ ) formado entre la velocidad real del blanco analizado y la velocidad radial (desde o hacia el radar), así:

$$f = \frac{2v}{\lambda} \cos(\varphi)$$

**Doble Polarización:** Este tipo de radar, además de detectar blancos y su velocidad radial, es capaz de identificar y clasificar el tipo de precipitación entre gotas, nieve y granizo; minimiza problemas de atenuación, problemas de bloqueo parcial del haz y obtiene mejores estimaciones cuantitativas de lluvias. 203

La doble polarización o doble orientación hace referencia a la capacidad del radar de alternar pulsos con orientación horizontal (campo eléctrico) y vertical (campo magnético), a diferencia del radar con polarización normal o sencilla, que solo le permite transmitir pulsos en orientación horizontal (figura 106).



**Figura 106.** Radar de doble polarización.  
Fuente: Tomado de MetEd (2016).

Esto es relevante, porque la mayoría de las partículas meteorológicas no son esféricas y por lo tanto retrodispersan mayor potencia bajo pulsos de polarización horizontal que bajo pulsos de polarización vertical. Estas diferencias, en el tipo de respuesta a la orientación del pulso, permiten conocer información adicional sobre el tamaño, tipo y estado (agua líquida o cristales de hielo) de las partículas analizadas. Las orientaciones requieren, cada una, su propia guía de onda, ambas llegando al foco de la antena.

## 15.2 Partes del radar

Los radares difieren en sus componentes según su uso y capacidad; sin embargo, las características y partes comunes pueden simplificarse en sus componentes básicos (figura 107).



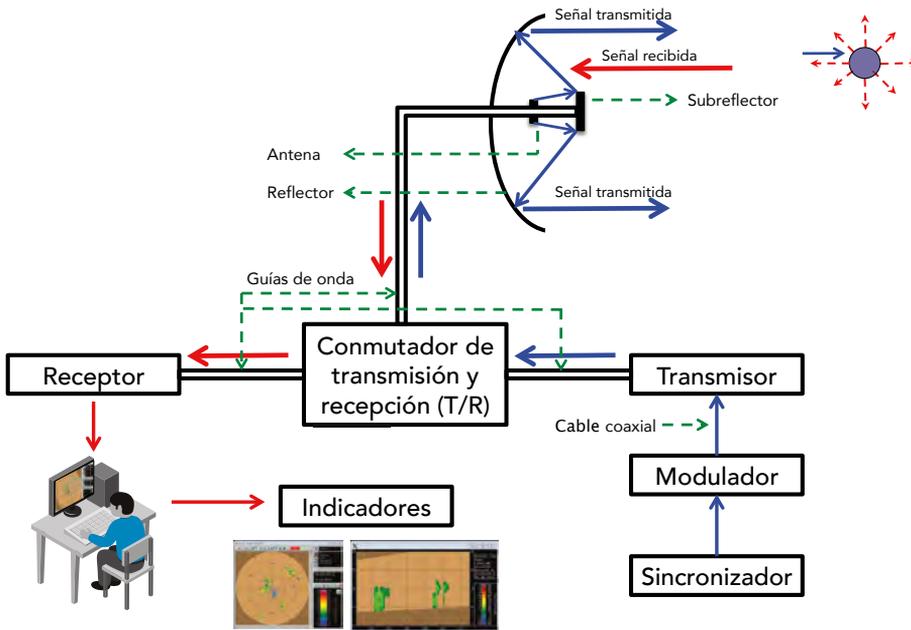


Figura 107. Esquema básico de un radar.  
Fuente: elaboración propia.

### 15.2.1 Transmisor

El transmisor genera la frecuencia de salida, desde la antena a la atmósfera. Se pueden encontrar de tres tipos:

Estado sólido	Pueden transmitir señales de hasta 50 W de potencia.
	Normalmente se combinan para alcanzar un nivel de potencia aceptable.
	Se han usado en radares a bordo de aeronaves.
Magnetrón	Tamaño pequeño y gran potencia, ideal para radares a bordo de aeronaves.
	Pueden transmitir señales de hasta 500 kW de potencia.
Klystron	No mantienen la misma frecuencia y estabilidad de fase, pero usan otros sistemas que recuerdan la frecuencia y fase de cada pulso.
	Son de gran tamaño y amplifican significativamente la señal emitida.
	Pueden transmitir señales de hasta 2 MW de potencia.
	Mejoran la medición de la velocidad radial toda vez que generan exactamente la misma frecuencia y fase inicial de un pulso a otro.

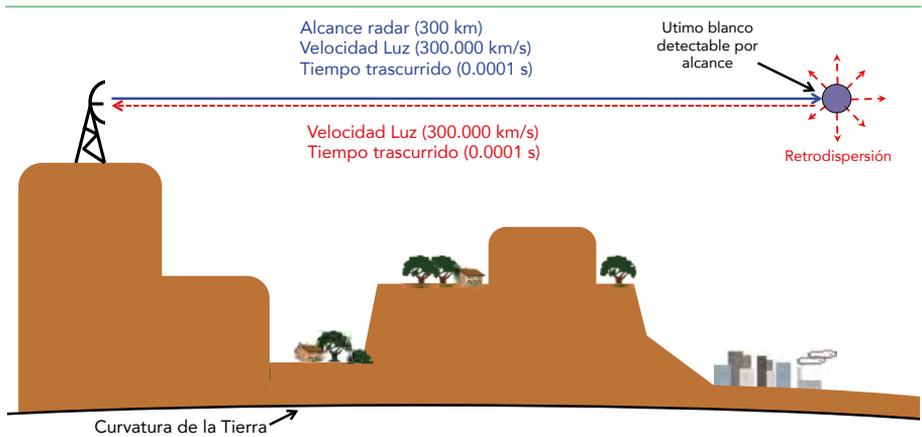
### 15.2.2 Modulador

Proporciona al transmisor la energía suficiente para garantizar su permanente funcionamiento, también lo controla conectándolo y desconectándolo, de tal manera que genera la amplitud y frecuencia de la onda transmitida; esto se conoce como PRF (*Pulse Repetition Frequency*), la cual se mide en pulsos electromagnéticos, ciclos por segundo o Hertz (1 Hz = 1 ciclo / s).



El alcance máximo (nominal<sup>38</sup>) de un radar se puede ajustar especificando la PRF. Se requiere una frecuencia de repetición de pulsos que le permita al primer pulso viajar dos veces el alcance máximo deseado del radar (trayectoria de ida y regreso), antes de emitir el siguiente pulso.

Por ejemplo, si se desea operar a un alcance de 300 km, se requieren 600 km entre pulsos consecutivos para que el haz pueda ser emitido y devolverse (figura 108). A la velocidad de la luz (30 000 km/s), se requieren de 0,002 segundos para hacer este recorrido, lo que equivaldría a 500 pulsos por segundo (1/0,002 s) o una PRF de 500 Hz. No se puede ajustar de forma independiente la PRF y el alcance máximo nominal del radar. Si se desea un alcance alto, la PRF debe ser baja; si la PRF es alta, se limita el alcance máximo nominal.



**Figura 108.** Alcance máximo de un radar y PRF.  
**Fuente:** elaboración propia.

De esta manera también puede conocerse la distancia a la que los blancos se encuentran del radar. Si, por ejemplo, el tiempo transcurrido entre la señal emitida y recibida es de 0,00012 s (t), el tiempo utilizado para impactar con el blanco debería ser la mitad, es decir 0,00006 s (t/2), considerando que este desplazamiento se realiza a la velocidad de la luz (c), la distancia (d) del blanco al radar sería de 18 km según la siguiente ecuación:

$$d = c \frac{t}{2}$$

$$d = 300\,000 \text{ km/s} \left( \frac{0,00012 \text{ s}}{2} \right)$$

$$d = 18 \text{ km}$$

### 15.2.3 Guías de onda

Son las conductoras entre el transmisor, el receptor y la antena, usadas para transmitir altas frecuencias y evitar la pérdida de energía que producirían cables comunes o cables

38 Nominal es un valor teórico e ideal; sin embargo esto está asociado a un valor no necesariamente real.



coaxiales (usados comúnmente en radiofrecuencias). Su forma rectangular transmite el campo eléctrico en la parte más ancha y el campo magnético en la más angosta.

## 15.2.4 Antena

206 Es un dispositivo direccional encargado de enviar la señal del radar a la atmósfera, enfocando la energía en una dirección específica que le permite detectar blancos puntuales. Está compuesta por el reflector y el subreflector, los cuales se encargan de aumentar la potencia. Cuanto más grande sea el reflector, más exactitud presentará el radar y más estrecho será el haz de la antena.

Las características de las antenas varían y se diseñan según la longitud de onda enviada por el transmisor. A medida que la longitud de onda aumenta, se requiere una antena con mayor diámetro del reflector, el cual oscila entre 30 cm a 9 m. Las antenas también presentan diferente ganancia, definida como el cociente entre la cantidad de energía irradiada en la dirección de la antena y la que irradiaría una antena isotrópica<sup>39</sup> alimentada por el mismo transmisor; este factor se indica en decibelios (dBi<sup>40</sup>), lo que denota una relación directa con la antena isotrópica. Para alcanzar el máximo de potencia y por lo tanto, una mayor ganancia, se utiliza 1° máximo de ancho de haz.

## 15.2.5 Conmutador (T/R)

Teniendo en cuenta que la antena es usada de forma intermitente con potencias muy distintas, que van desde  $10^{-14}$  W por parte del receptor hasta  $2 \times 10^6$  W en el caso del transmisor, el conmutador es el encargado de regular el uso de la antena por estos dos componentes, de tal manera que el receptor no se vea afectado por las altas potencias emitidas por el transmisor. La energía del haz en su recorrido de ida y regreso se afecta según la distancia radial ( $r$ ), de la forma  $(1/r^2)$   $(1/r^2) = (1/r^4)$ , consecuentemente la energía devuelta por un blanco disminuye de forma inversa con la cuarta potencia de la distancia. Esto hace que, a pesar de las enormes cantidades de energía emitidas, se reciban ecos sumamente débiles (Rosengaus, 1995).

## 15.2.6 Receptor

Este dispositivo detecta y amplifica las señales recibidas por la antena, envía la información a un detector de fase, el cual compara la fase de la señal transmitida con la fase de la señal recibida y determina la diferencia en términos de desplazamiento de fase. Como las diferencias de señal pueden llegar a ser muy amplias, se usan receptores logarítmicos, los cuales producen una salida proporcional al logaritmo de la potencia de entrada, conservando un rango desde 0 a 80 dB.

## 15.2.7 Indicadores

Un indicador es la forma de representar los datos radar, de tal forma que sean entendibles ante la percepción humana. Los más comunes son el indicador horizontal (PPI) y el indicador vertical (RHI).

<sup>39</sup> Se considera que una antena es isotrópica cuando transmite igual intensidad de energía en todas las direcciones.

<sup>40</sup> Decibelios medidos utilizando una antena isotrópica como referencia.



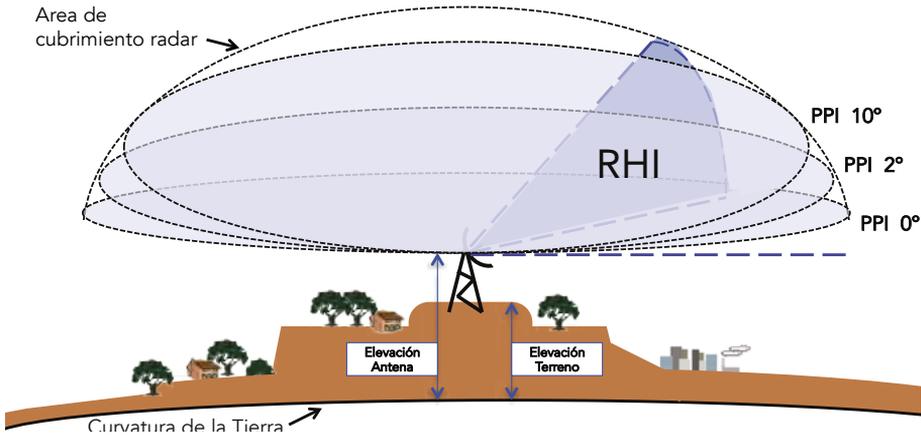
- PPI (Plan Position Indicator).** Este indicador muestra, por lo general, los blancos detectados por el haz del radar con el ángulo de elevación más cercano a la superficie terrestre, es muy intuitivo para el observador y mediante la integración de anillos de rango (o de distancia), de mapas geopolíticos y contornos del terreno, facilita la ubicación exacta del blanco. La figura 109, por ejemplo, son PPI del radar de Corozal del día 31 de julio de 2015 a las 19:40 Z, se muestran a la izquierda los datos tomados por el radar y visualizados en el software básico, en la imagen central se le agregan características especiales que ayudan a detectar la posición exacta del blanco meteorológico y a la derecha se hace un acercamiento a los puntos de interés y se sobreponen rutas aeronáuticas y mapas hídricos.



**Figura 109.** Diferentes tipos de PPI del radar de Corozal.  
**Fuente:** elaboración propia.

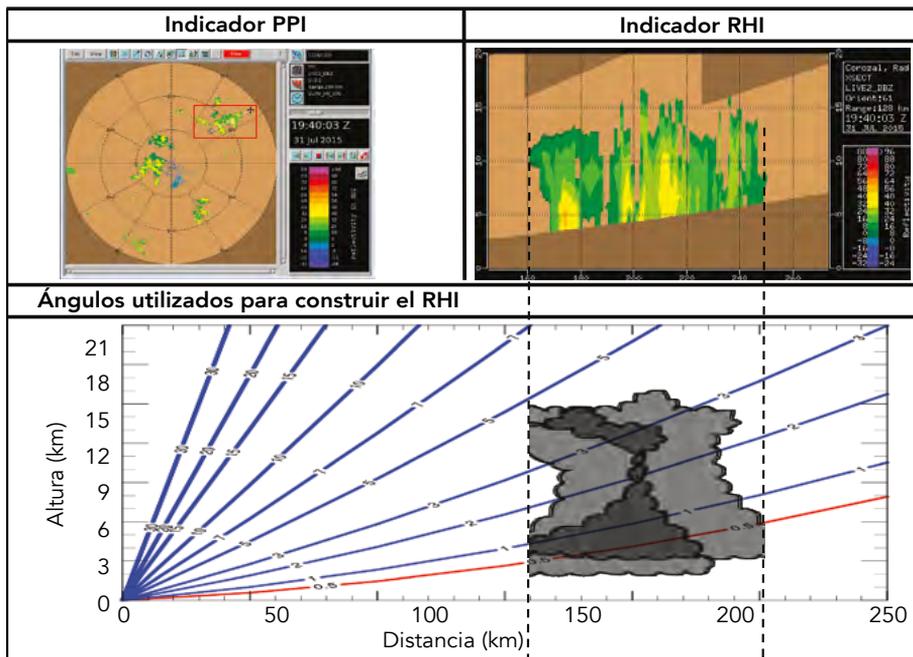
El PPI representa exclusivamente la información individual de cada uno de los ángulos del radar, donde el ángulo es utilizado operativamente con la exploración más baja. Para el caso del radar de El Tablazo, se utiliza el ángulo de  $0^\circ$  y los radares de Corozal y San Andrés utilizan el ángulo de  $0,5^\circ$  para este indicador. Cuando el haz está cerca al radar, puede detectar agua muy cercana a la superficie, pero pierde su utilidad a medida que el haz se aleja del radar; por ejemplo, a 300 km de distancia, el radar detecta agua sólo por encima de 8 km de altura. Este fenómeno es explicado más adelante en el cálculo de la altitud del haz.

- RHI (Range Height Indicator).** Muestra la altura del blanco combinada con la distancia, sobre y desde el radar. Este indicador debe estar acompañado de un PPI para entender la ubicación del blanco y es vital para conocer la estructura interna de una tormenta y las altitudes de vuelo que están afectando el fenómeno (figura 110).



**Figura 110.** Operación de un radar usando el indicador RHI.  
**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 111 se simula el comportamiento de una tormenta ubicada entre 160 y 250 km al NE del radar de Corozaal (eje x) y que compromete alturas desde 3 a 15 km (eje y). Seguramente por debajo de los 3 km hasta la superficie también hay precipitación asociada a la tormenta, pero la altitud del haz más bajo (0,5°) no permite observar por debajo de su recorrido.



**Figura 111.** RHI de una tormenta detectada por el radar de Corozaal.  
**Fuente:** elaboración propia.



# 15.3 Cálculo de la altitud del haz

La trayectoria del haz y su altitud se ven afectados por dos factores primordiales, la refracción y la curvatura de la tierra, siendo esta última influenciada a su vez por la presión atmosférica y la temperatura. Para lograr una aproximación del comportamiento del haz puede considerarse que los rayos del radar se desplazan en línea recta (en realidad tienen una trayectoria curva) con respecto a la Tierra y aplicar el índice de refracción estándar, de tal manera que la altura del haz (H) está dada por la ecuación:

$$H = \sqrt{r^2 + (kR)^2 + 2rkR\sin\varnothing} - kR + h$$

Donde:

r = distancia desde el radar hacia los puntos de cobertura.

k = constante que simula un radio terrestre que el haz pueda recorrer de forma paralela (4/3).

R = radio de la Tierra (6 374 km).

∅ = ángulo utilizado por la antena del radar.

h = altura de la antena del radar.

Para interpretar correctamente cómo afecta la altitud del haz una medida de reflectividad, se deben realizar los siguientes pasos:

**Primero:** Conocer la distancia vertical entre el radar y el punto que se está analizando. En este caso, se toma como ejemplo el radar de El Tablazo y las mediciones de reflectividad sobre el *Airport Reference Point* (ARP) del aeropuerto El Dorado en Bogotá.

- Elevación del radar El Tablazo: 3 544 m
- Elevación del ARP en El Dorado: 2 547 m
- Diferencia entre las dos elevaciones: 997 m

**Segundo:** Calcular la distancia horizontal entre el radar y el punto que se está analizando.

- Distancia entre El Tablazo y ARP: 35 km

**Tercero:** Calcular la altura del haz como si el radar estuviera al nivel medio del mar (h = 0), o utilizar la figura 112 para cálculos rápidos.

$$H = \sqrt{35^2 + \left(\frac{4}{3}(6\,374)\right)^2} + 2 * 35 * \frac{4}{3} * 6\,374 * \sin 0^\circ - \frac{4}{3} * 6\,374 + 0$$

$$H = 72 \text{ m}$$

**Cuarto:** Calcular la distancia vertical total entre el haz y el punto analizado (en este caso el ARP).



$$\text{Distancia Total} = 997 \text{ m} + 72 \text{ m} = 1\,069 \text{ m}$$

El resultado anterior significa que el radar de El Tablazo no podrá detectar precipitación en el ARP por debajo de una altura cercana a los 1 069 m; sin olvidar que este cálculo es realizado sobre el eje central del haz. Esta deficiencia se conoce como la zona invisible al radar, la cual se ve incrementada a medida que el haz se aleja del radar.

210

La figura 112 representa gráficamente el comportamiento del haz del radar, a la izquierda se muestra el cálculo básico de la altura del haz y a la derecha, la lógica que debería aplicarse para entender cómo la altura del haz afecta las mediciones de precipitación realizadas sobre Bogotá.

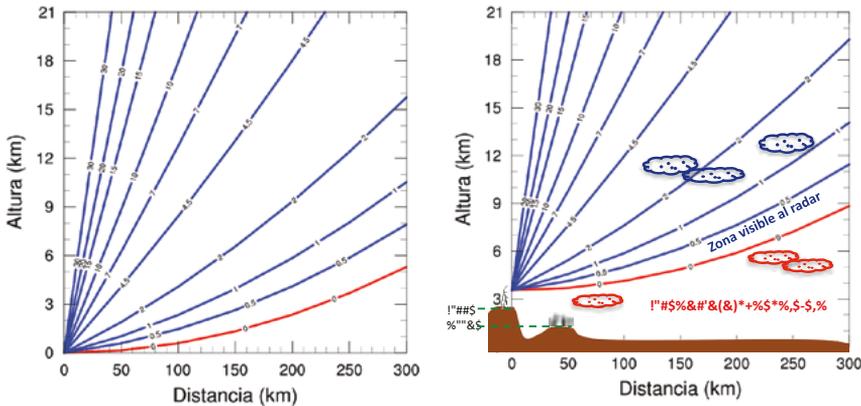


Figura 112. Altura del haz teórico y práctico del radar de El Tablazo.  
Fuente: elaboración propia.

Como se ha podido observar, los ángulos de elevación del radar de El Tablazo no presentan una distribución equidistante entre sí, lo cual podría afectar los resultados obtenidos por los indicadores. Para evitar este inconveniente, se debe regular la distribución vertical de los ángulos de elevación, una buena opción se presenta en la figura 113.

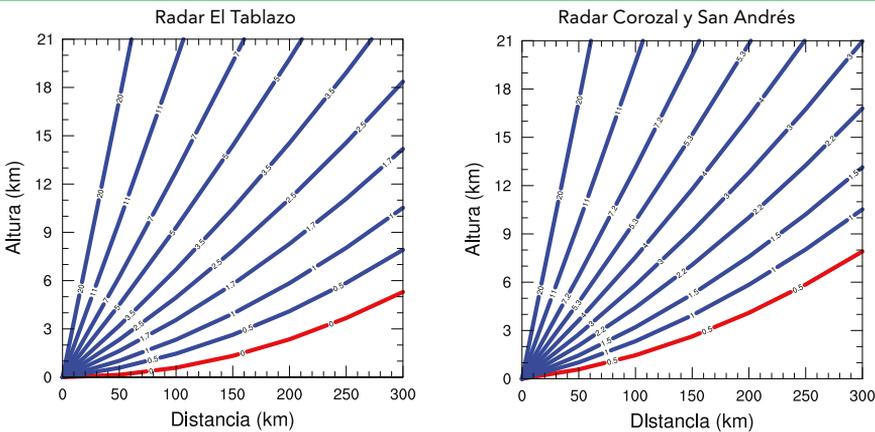
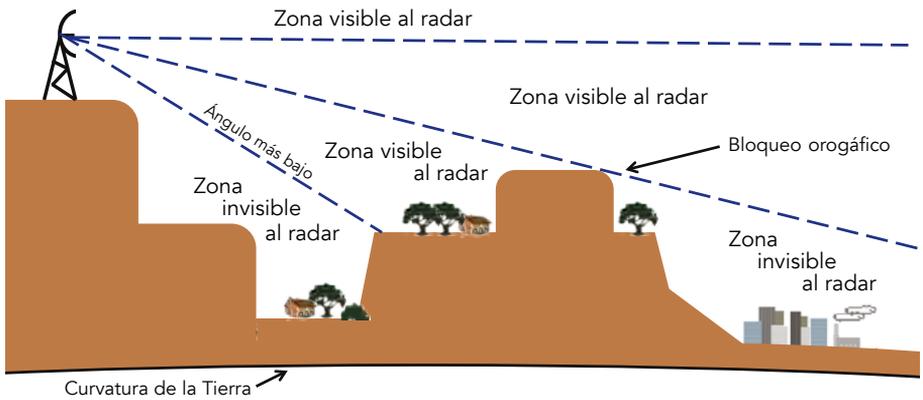


Figura 113. Correcta distribución de los ángulos radar en los radares colombianos.  
Fuente: elaboración propia.



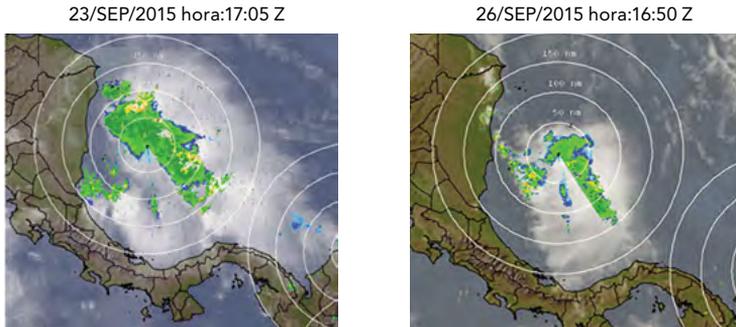
# 15.4 Problemas asociados al cubrimiento radar

Muchos de los problemas asociados a un radar tienen que ver con la ubicación y configuración del radar. Puede decirse que una de las zonas más afectada por la falta de cobertura radar es precisamente donde está instalado. Además, no todos los radares tienen una cobertura real, la mayoría son seriamente afectados por lo que se conoce como bloqueo orográfico. Esquemáticamente, estos dos tipos de afectación son representados mediante la figura 114.



**Figura 114.** Zonas invisibles por cercanía al radar y bloqueo orográfico.  
**Fuente:** elaboración propia.

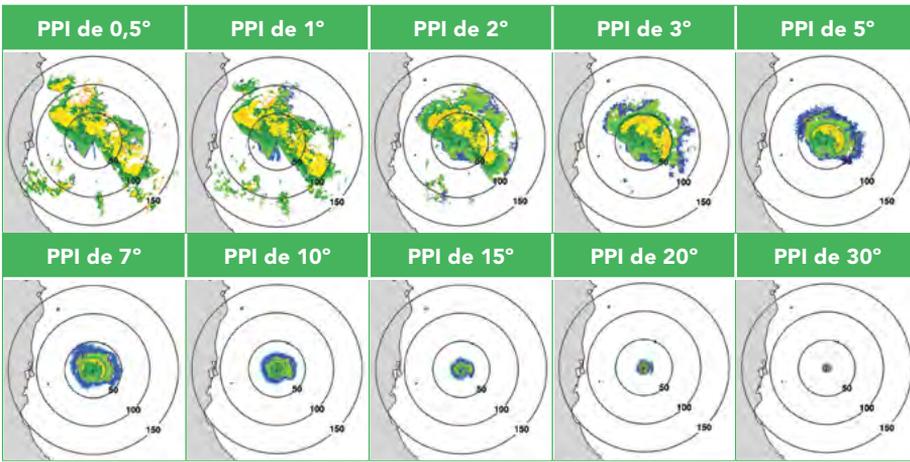
Los bloqueos orográficos son fácilmente detectables en un PPI. En Colombia, el radar más afectado por este tipo de problemas es el radar de San Andrés. La figura 115 muestra dos casos de estudio con el PPI de 0,5° superpuesto sobre una imagen satelital en el canal infrarrojo.



**Figura 115.** Bloqueo orográfico radar de San Andrés.  
**Fuente:** Tomado de UAEAC (s.f.).

Contrastando las imágenes satelitales con la información presentada por el radar, se observa claramente cómo el radar de San Andrés no logra detectar la totalidad de la tormenta en el sector Sur, al encontrarse obstruida la señal por dos montañas cercanas al radar. Para entender cómo los distintos PPI pueden visualizar el fenómeno, se grafica cada uno de ellos de forma individual utilizando el caso del 23 de septiembre de 2015 (figura 116).

212



**Figura 116.** PPI captados por el radar de San Andrés el 23/SEP/15 a las 17:05 Z.  
**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar en el PPI de 0,5°, la cobertura radar en el sur de la isla está ampliamente afectada por dos cerros que causan grandes bloqueos orográficos. El primer cerro que causa interferencia tiene una elevación de 82 m y está ubicado en las coordenadas N 12 31 03 y W 81 43 28, el segundo cerro tiene una elevación de 55 m y se encuentra en las coordenadas N 12 34 30 y W 81 42 39.

Consecuentemente, a medida que el ángulo de elevación es más alto, este supera el bloqueo orográfico y logra detectar la presencia de agua en la atmósfera. Como en el caso del PPI de 1°, que, aunque logra ver un poco más las tormentas al sur de San Andrés, está ampliamente afectado por la relación distancia–altura del haz.

Para entender la manera en la que el radar procesa los datos provenientes de la detección de blancos meteorológicos, es necesario hablar de la resolución del radar.

## 15.5 Volumen de muestreo en un radar

Debido al desplazamiento y apertura del haz, se crean diferentes volúmenes de muestreo, los cuales dependen de la longitud del pulso y de la resolución angular. A continuación



se indica una forma simple de realizar este cálculo, el procedimiento complejo donde se le agregan otras variables puede ser consultado en Rinehart (2007).

Para calcular el largo del volumen de muestreo, el cual está asociado a la longitud de un pulso de radar (ondas electromagnéticas del radar), se asume que cada pulso dura 1  $\mu$ s (microsegundo) y, por lo tanto, avanzaría 300 m a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s). Como la longitud radial del volumen de muestreo corresponde a  $\frac{1}{2}$  la longitud del pulso, la longitud radial estaría en el orden de 150 m (15 000 cm), y en esta se pueden encontrar 2 500 ondas individuales de 6 cm cada una para el caso de un radar banda C.

213

El cálculo de la resolución angular, la cual se va ampliando con la distancia al radar, está condicionado por la distancia desde el radar al pulso que se está propagando ( $r$ ), y por la apertura del haz en la horizontal ( $\theta$ ) y en la vertical ( $\phi$ ). Asumiendo que el haz es simétricamente circular ( $\theta = \phi$ ), y del orden de un grado ( $1^\circ$ ), se calcula la apertura del haz en radianes. Los grados y los radianes son dos sistemas diferentes para medir ángulos, así que es necesario realizar una previa transformación aplicando:

$$360^\circ = 2 \pi \text{ radianes}$$

$$360^\circ = 2 (3,1416) \text{ radianes}$$

$$360^\circ = 6,22836 \text{ radianes}$$

$$1^\circ = 0,0174532925 \text{ radianes}$$

El volumen ( $V$ ) de muestreo para un pulso podría calcularse por la fórmula:

$$V = h (\text{area})$$

$$V = h (\pi r_i^2); \quad r_i = r(\theta/2)$$

$$V = h \left( \pi \frac{r\theta}{2} \right)^2$$

De acuerdo con lo anterior, se puede calcular el volumen de muestreo para una distancia radial de 50 km, así:

$$V = 0,15 \text{ km} (3,1416) \left( \frac{50 \text{ km} (0,01745)}{2} \right)^2$$

$$V = 0,09 \text{ km}^3$$

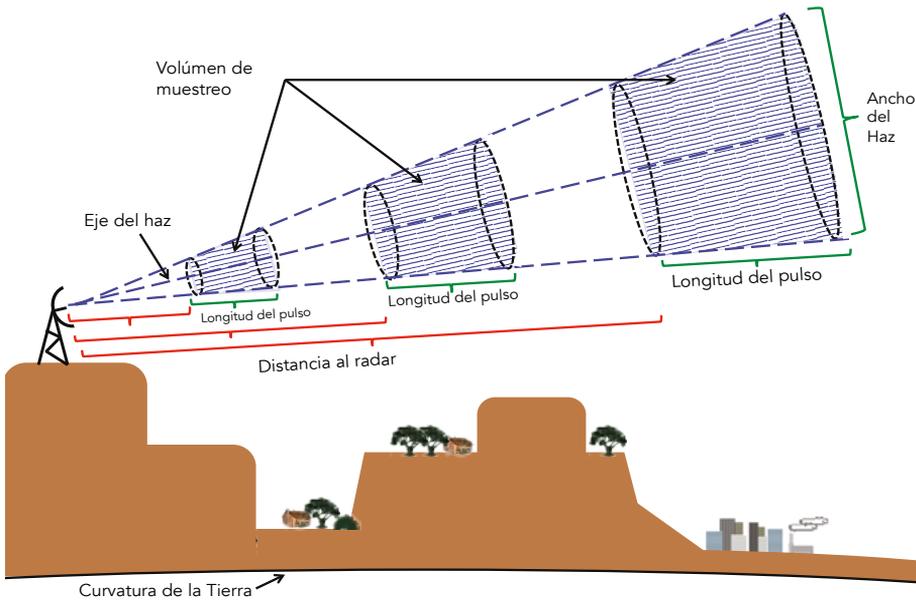
El volumen de muestreo se incrementa a medida que el haz se aleja del radar, permitiendo construir la tabla 34.

**Tabla 34.** Volumen de muestreo respecto a la distancia radial.

Distancia radial ( $r$ )	Volumen ( $V$ )
50 km	0,09 km <sup>3</sup>
100 km	0,36 km <sup>3</sup>
150 km	0,81 km <sup>3</sup>
200 km	1,43 km <sup>3</sup>
250 km	2,24 km <sup>3</sup>
300 km	3,23 km <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.





**Figura 117.** Longitud y ancho del haz de un radar.

**Fuente:** elaboración propia.

La figura 117 esquematiza el volumen de muestreo realizado por un radar y su relación con la longitud de pulso y ancho del haz.

De acuerdo con lo anterior, se puede inferir que la información proporcionada por el radar resulta de un promedio en el volumen de muestreo que, típicamente, tiene un tamaño constante en la dirección radial  $r$ , de un par de cientos de metros a mil metros, y un tamaño variable y creciente linealmente creciente con  $r$  (Rosengaus ,1999). Esta diferencia de volúmenes medidas por un solo pulso de radar, hace que la resolución sea mucho menor en distancias más grandes y por lo tanto se presenta una pérdida de resolución con la distancia radial.

## 15.6 Reflectividad

Es una medida del promedio de la energía reflejada por cada blanco hacia el radar en el volumen de muestreo, la cual depende de la forma, tamaño, parámetros físicos e intensidad del hidrometeoro.

Debido a la influencia de las grandes partículas en el valor de reflectividad calculado, esta medida se estima como la suma de la sexta potencia de los diámetros ( $D$ ) de todos los blancos ( $N$ ) que dispersan energía en la unidad de volumen muestreada ( $V$ ). Teniendo en cuenta que el tamaño de las gotas se expresa en milímetros y el volumen en metros cúbicos, el factor de reflectividad ( $z_e$ ) del radar se formula en  $mm^6/m^3$ .

$$z_e = \frac{\sum_{i=1}^N N_i D_i^6}{V}$$



Según Rinehart (2007), la reflectividad es un parámetro meteorológico asociado a cada tormenta, está determinado por la cantidad y tamaño de las partículas presentes en el volumen muestreado, y puede variar desde 0,001 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> (niebla) hasta 36 000 000 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> (fuertes tormentas de granizo).

Para facilitar la lectura, optimizar las comparaciones y reducir la extensa brecha entre los valores mínimos y máximos de reflectividad, se usa la escala logarítmica.

Rinehart (2007) definió el factor logarítmico de reflectividad como:

215

$$Z = 10 \log \frac{z_e}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3}$$

Donde:

Z = Reflectividad en decibelios (dBZ)

$z_e$  = Reflectividad en  $\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3}$

La nueva escala (logarítmica) permite reducir el rango de valores de reflectividad, de tal manera que 0,001 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> equivaldrían a -30 dBZ y 36 000 000 mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> a 76,5 dBZ.

Se han realizado estudios que pretenden definir la relación existente entre la reflectividad lineal (z) medida en mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup> y precipitación (R); sin embargo, los resultados varían según el tiempo y el lugar. Una de las relaciones más utilizadas es la de Marshall et al. (1947).

$$z_e = 200R^{1,6}$$

Reemplazando la ecuación de Marshall Palmer en  $Z = 10 \log \frac{z_e}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3}$ , se obtiene una relación entre la reflectividad logarítmica (Z) en dBZ<sup>41</sup> y precipitación:

$$Z_r = 10 \log 200R^{1,6}$$

Teniendo en cuenta que muchos algoritmos presentan la información solamente en dBZ, sería de utilidad estimar la intensidad de lluvia en mm/h.

$$Z = 10 \log 200R^{1,6}$$

$$Z = 10[\log 200 + \log R^{1,6}]$$

$$Z = 10[\log 200 + 1,6 \log R]$$

$$Z = 10 \log 200 + 16 \log R$$

$$Z - 10 \log 200 = 16 \log R$$

$$\frac{Z - 10 \log 200}{16} = \log R$$

$$10 \left( \frac{Z - 10 \log 200}{16} \right) = R$$

41 dBZ es la unidad logarítmica de la reflectividad.



Lo que permite, de esta manera, construir una tabla guía para interpretar el equivalente de 01, 1, 10, 100 mm/h en dBZ y, de forma inversa, conocer el equivalente de 10, 20, 30, 40, 50, 60 dBZ en mm/h.

R (mm/h)	0,1	0,2	0,6	1,0	3	10	12	49	100	205
z (1mm <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> )	5	10	100	200	1 000	7 962	10 000	100 000	316 979	1 000 000
Z (dBZ)	7	10	20	23	30	39	40	50	55	60

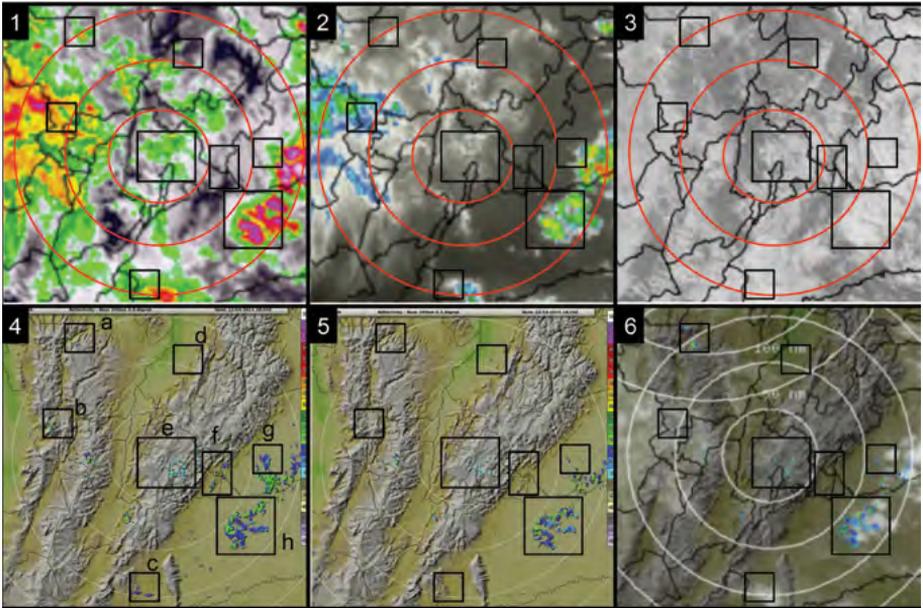
## 15.7 Interpretación de las imágenes radar

Para realizar un estudio de las nubes, precipitación y fenómenos que puedan afectar las aproximaciones de los aeródromos, siempre será necesario recurrir a la mayor cantidad de datos disponibles, siendo la información radar una herramienta fundamental para la toma de decisiones.

A continuación, se realiza un análisis básico de la información que puede ser obtenida usando imágenes satelitales, el indicador PPI y la gráfica de refracción estándar. la figura 118 reúne toda la información disponible dividida de la siguiente manera:

- Cuadrícula 1: Imagen satelital infrarroja. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 2: Imagen satelital vapor de agua. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 3: Imagen satelital visual. 14/NOV/15, 18:15 z
- Cuadrícula 4: PPI de 0° radar El Tablazo. 14/NOV/15, 18:25 z
- Cuadrícula 5: PPI de 0,5° radar El Tablazo. 14/NOV/15, 18:25 z
- Cuadrícula 6: Compuesto radares más IR. 14/NOV/15, 18:25 z





**Figura 118.** Identificación de tipo de nube y características usando imágenes satelitales y radar.  
**Fuente:** elaboración propia.

El producto compuesto está detectando más agua en el mismo sitio, esto se debe a que el radar de Corozal está interactuando en esa zona con el radar de El Tablazo, y el resultado final es calculado por un algoritmo que interactúa con los datos recibidos por los dos radares.

**Tabla 35.** Sector a.

Sector a			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	145 Nm (268 km)	145 Nm (268 km)	Detecta TCU
Altura del haz:	4 km	6,5 km	Altura: 0 - > 15 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	7 544 m (24 740 ft)	10 044 m (32 972 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 24 740 ft	Tormenta no supera los 32 972 ft	Tormenta en proceso de formación

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 36.** Sector b.

Sector b			
	PPI de 0°: Detecta	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – > 21 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 21 470 ft	Tormenta no supera los 28 031 ft	Color y contornos en WV: Tormenta en proceso de disipación

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 37.** Sector c.

Sector c			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	145 Nm (268 km)	145 Nm (268 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	4 km	6,5 km	Altura: 0 – > 21 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	7 544 m (21 470 ft)	10 044 m (32 972 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta alcanza los 24 740 ft, más intensa que sector a	Tormenta no supera los 32 972 ft	Color y contornos en WV: Fuerte desarrollo entre 2 y 6 km

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 38.** Sector d.

Sector d			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	110 Nm (203 km)	110 Nm (203 km)	Detecta Sc
Altura del haz:	2,5 km	4,5 km	Altura: 0 – 6 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 044 m (19 829 ft)	8 044 m (26 391 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
		Ruido, no es propicia la formación de agua	VIS, IR y WV permiten observar los Sc

Fuente: elaboración propia.



Tabla 39. Sector e.

Sector e			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	70 Nm (130 km)	70 Nm (130 km)	Detecta Sc
Altura del haz:	1 km	2 km	Altura: 0 – 6 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	4544 m (14908 ft)	5 544 m (18 189 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Pequeñas tormentas en formación	Tormenta no supera los 18 189 ft	VIS e IR permiten observar los Sc

Fuente: elaboración propia.

Tabla 40. Sector f.

Sector f			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb hacia el Este
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – 12 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	Señal débil	
	Tormenta fuerte	Tormenta inferior a 28 031 ft	IR fuerte presencia de Sc, y desarrollo vertical hacia el Este

Fuente: elaboración propia.

Tabla 41. Sector g.

Sector g			
	PPI de 0°	PPI de 0,5°	Imágenes satelitales
Distancia al radar:	120 Nm (222 km)	120 Nm (222 km)	Detecta Cb
Altura del haz:	3 km	5 km	Altura: 0 – > 40 000 ft
Elevación del radar:	3 544 m	3 544 m	
Altitud de detección:	6 544 m (21 470 ft)	8 544 m (28 031 ft)	
	Detecta agua	No detecta agua	
	Tormenta fuerte	Tormenta fuerte superior a 28 031 ft	Fuerte señal en todas las imágenes

Fuente: elaboración propia.



