

INTRODUCCIÓN A LOS RADARES METEOROLÓGICOS

**Curso: APLICACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DE
LOS RADARES METEOROLÓGICOS
13 al 24 Nov 2023 | La Antigua (Guatemala)**

Ing. Carlos Millán Arancibia
cmillan@senamhi.gob.pe

Estructura de la presentación

1. Introducción al radar ¿Qué ve un radar meteorológico?
2. Reflectividad
3. Tipos de radares meteorológicos
4. Ecuación del radar
5. Radares de doble polarización
6. Variables polarimétricas

¿Qué es un radar?

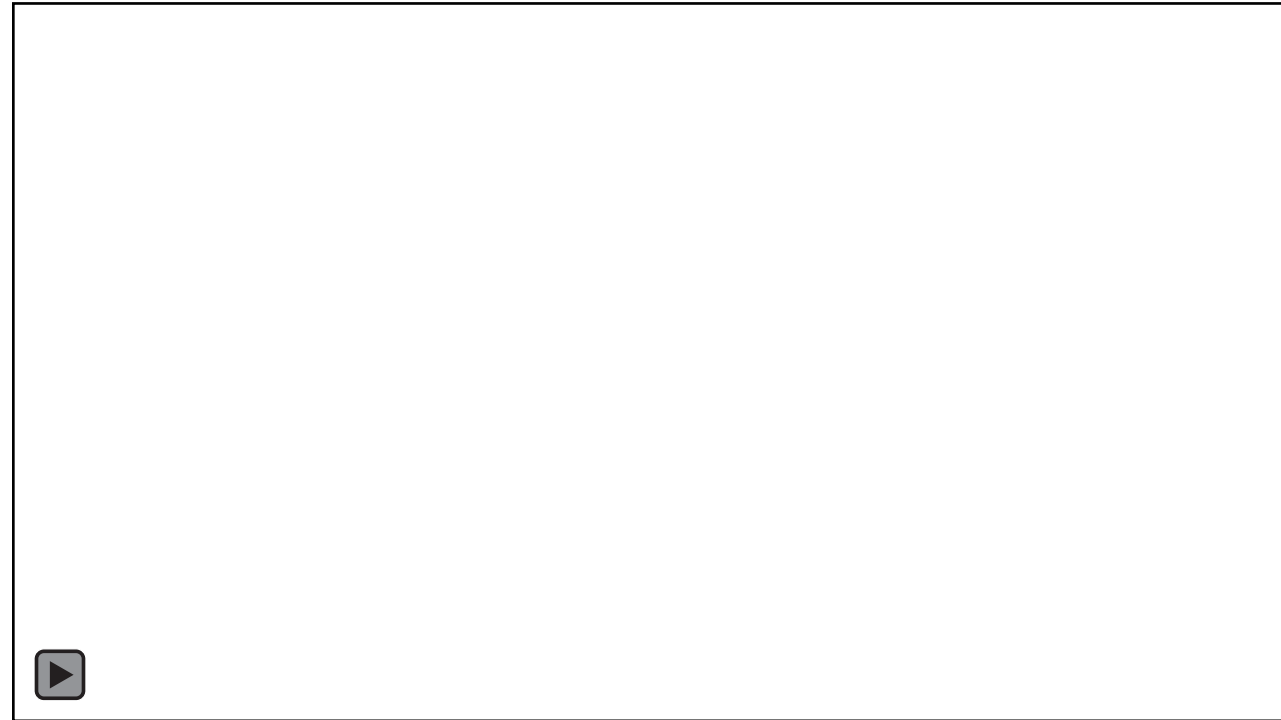
Sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista

Permite estimar la distancia a que se encuentran proyectando sobre ellos **ondas electromagnéticas.**)

La palabra *RADAR* corresponde a las iniciales de “**Radio Detection and Ranging**”

Utilizado por las fuerzas aliadas durante la II Guerra Mundial (fijar equipos y posiciones, además de detectar)

Los radares meteorológicos (**bandas X, C y S**) están diseñados para detectar “partículas del tamaño de gotitas de precipitación, en la atmósfera”.

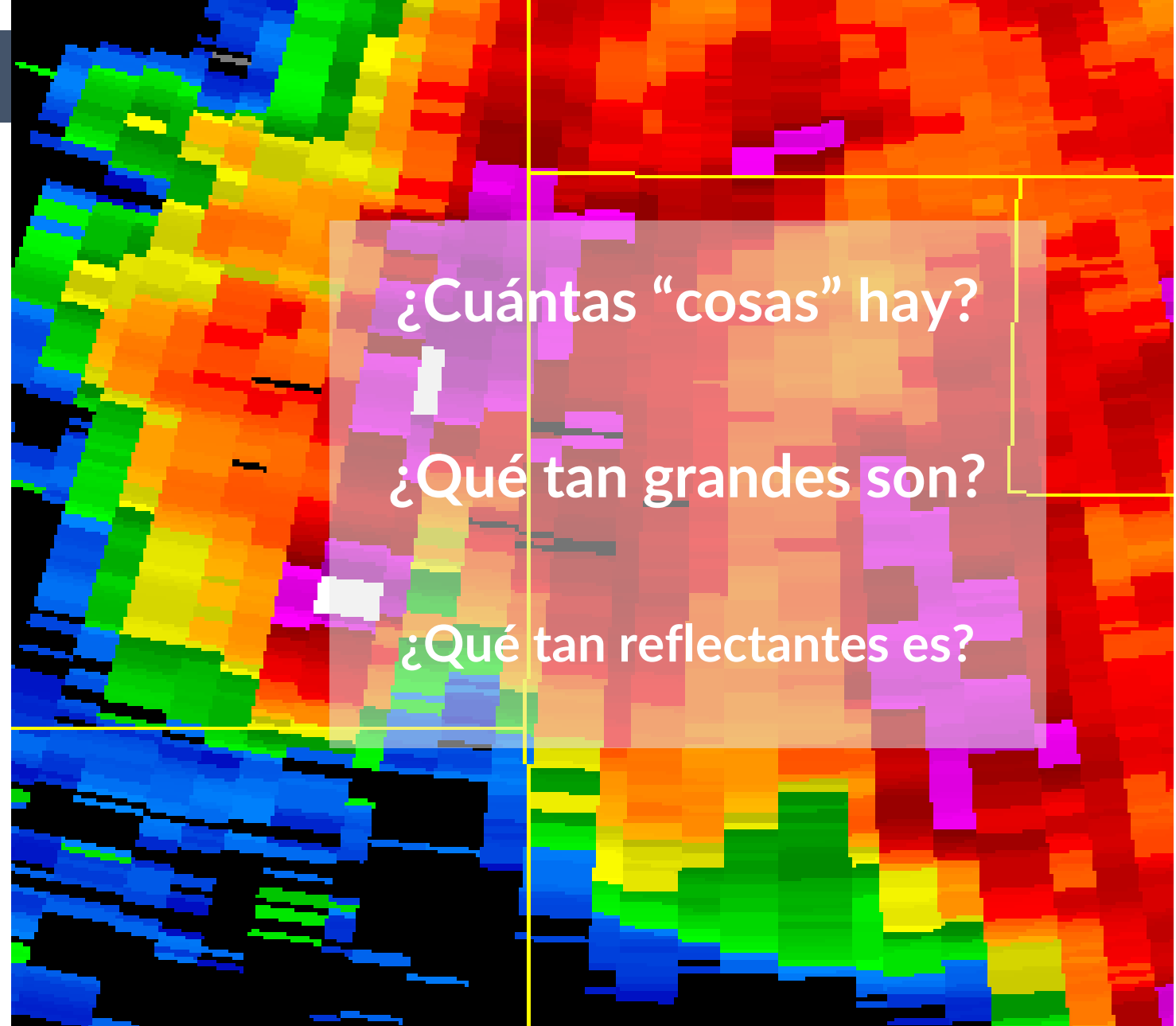


Reflectividad

Registro: fracción de la potencia emitida devuelta (eco del blanco)

La potencia es proporcional al factor de reflectividad Z

Relación Z y la intensidad de lluvia mediante distintas ecuaciones empíricas (más famosa es la ecuación de Marshal y Palmer, 1948)



-20 -0+ 20 40 60

Reflectividad

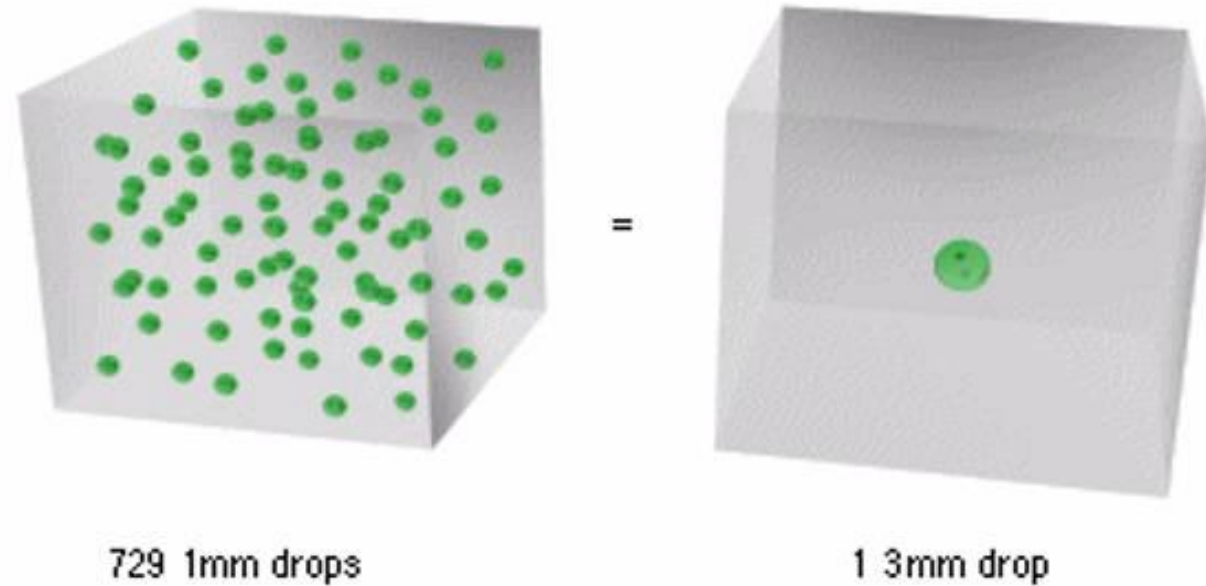
La reflectividad o eficiencia de devolver esa energía depende de (¡¡y por este orden!!):

- El **tamaño** (diámetro) de las partículas, (D^6)
- **Concentración** de partículas de precipitación, $N(D)$
- El **estado** de la precipitación (K): líquida (gotitas de agua), sólida (granizo seco, nieve)
- **Forma**: redondeada, obloide, plana

$$Z = \sum_v D^6 = \int N(D) D^6 dD$$

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

Sample Volumes with Equivalent Reflectivity Values



Reflectividades equivalentes

729 gotas de 1 mm y 1 gota de 3 mm

$$Z_{1\text{gota}3\text{mm}} = 3^6 = 729 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}$$

$$Z_{729\text{gotas}1\text{mm}} = 729 \cdot 1^6 = 729 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}$$

$$Z_{46700\text{gotas}0.5\text{mm}} = 46700 \cdot 0.5^6 = 729 \text{ mm}^6 \text{m}^{-3}$$

Esa reflectividad en dBZ sería 10. $\text{Log } 729 = 29 \text{ dBZ}$

Reflectividad e Intensidad de Precipitación

Marshall y Pallmer (1948)

donde Λ : depende tan sólo de la intensidad de precipitación R

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D}$$

Existe una relación entre la Intensidad de Precipitación R[mm/hora] y la Reflectividad Z[mm⁶/m³] que es de la forma

$$Z = a R^b$$

a y b son constantes que se determinan experimentalmente.

Relación empírica más utilizada es la relación de Marshall-Palmer $Z=200 R^{1.6}$

Habrà una relación Z/R empleada según cada tipo de precipitación.

	Llovizna	Lluvia	Chubasco
a	50	200	800
b	1,6	1,6	1,6

Ejemplos de valores de a, b (AEMET)

Tipos de radares

1.- RADAR DE BANDA S:

- Frecuencia: 2-4 GHz.
- Longitud de onda: 8-15 cm.
- Localización de blancos con precisión en amplios rangos de distancia (0 – 240 km).

-Ventajas: bastante buena resolución angular, bajo nivel de ruido y sufren muy poca atenuación.

-Desventajas: para conseguir sus mejores prestaciones necesitan radomos y reflectores de grandes dimensiones. Precio elevado.



Radars de banda S del Marshall Radar Observatory (MRO), en Montreal, Canadá, con un disco de unos 10 m de diámetro

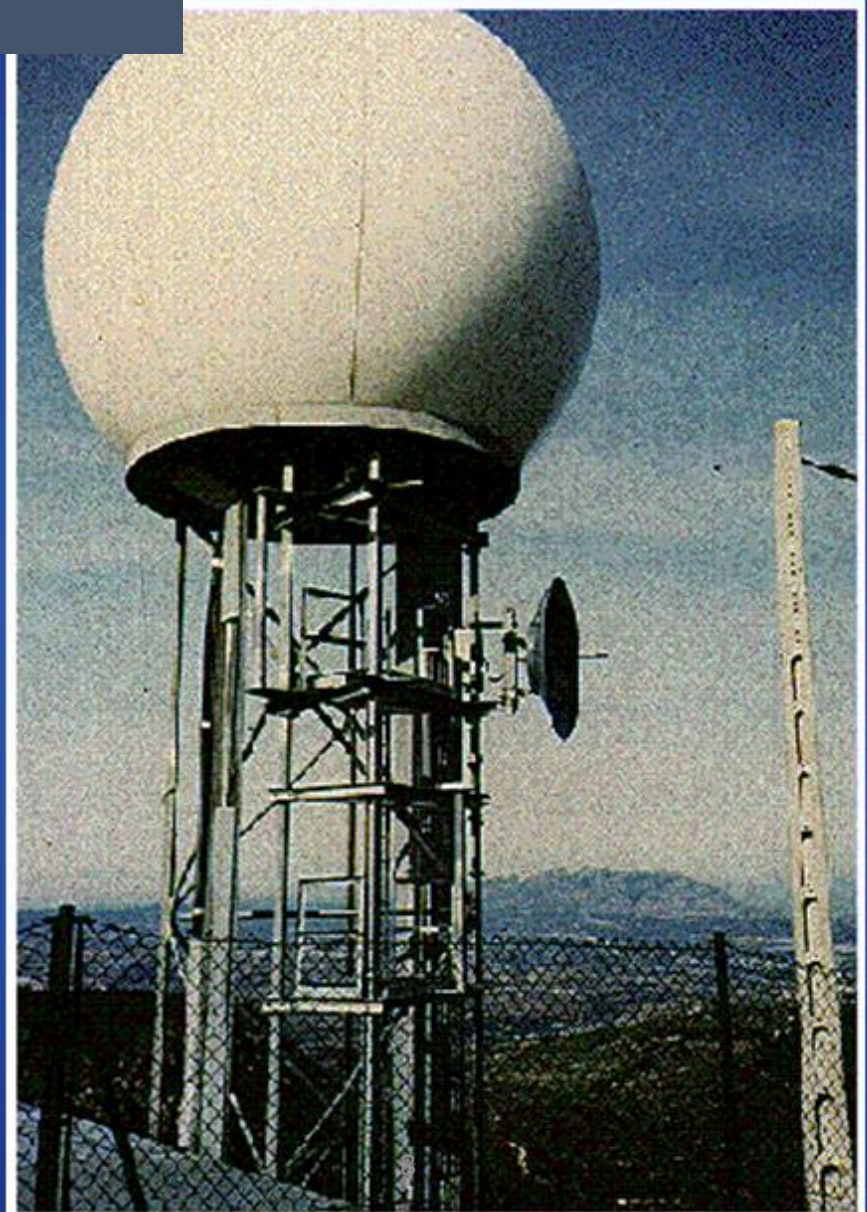


Vista interior del radar de banda S del NSSL donde es posible observar el radomo y el reflector (o disco) de unos 9 m de diámetro

Tipos de radares

2.- RADAR DE BANDA C:

- Frecuencia: 4-8 GHz.
- Longitud de onda: 4-8 cm.
- Muy útil en rangos intermedios (0-120 km).
- **Ventajas:** buena resolución angular, pequeño tamaño del disco (portabilidad). Precio.
- **Desventajas:** Mayor atenuación que la banda S.



Tipos de radares

3.- RADAR DE BANDA X:

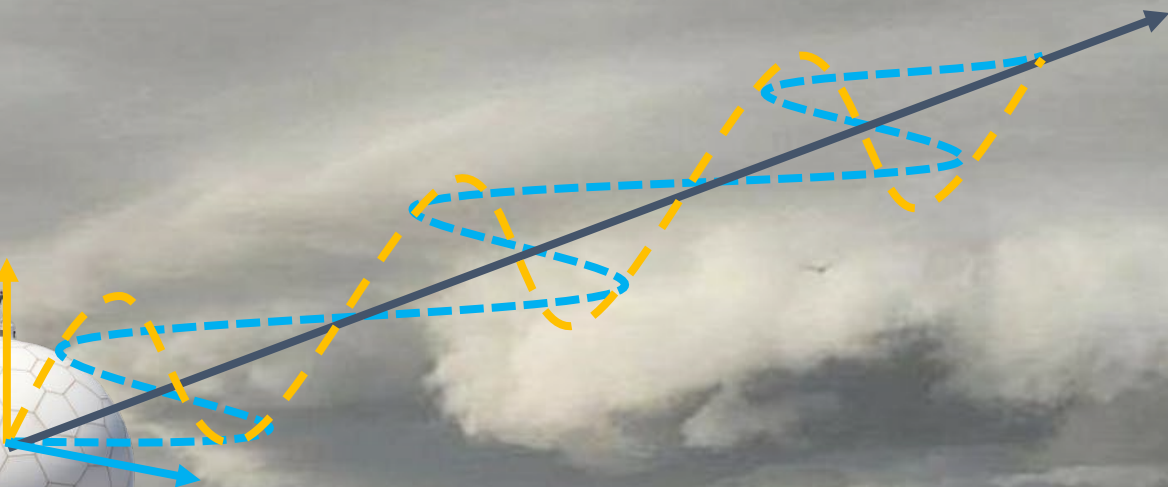
- Frecuencia: 8-12,5 GHz.
- Longitud de onda: 2,5-4 cm.
- Muy útiles sólo a corta distancia (< 60 km).
- Ventajas: Haces estrechos y muy buena resolución, detección de partículas pequeñas, investigación. Tamaño, precio.
- Desventajas: atenuación muy alta.

4.- RADAR DE BANDA K:

- Frecuencia: 12,5-40 GHz.
- Longitud de onda: 2,5-0,8 cm.
- El resto, id. Banda X.



¿Cómo funciona un radar de doble polarización?



Reflectividad (Z)

Velocidad (V)

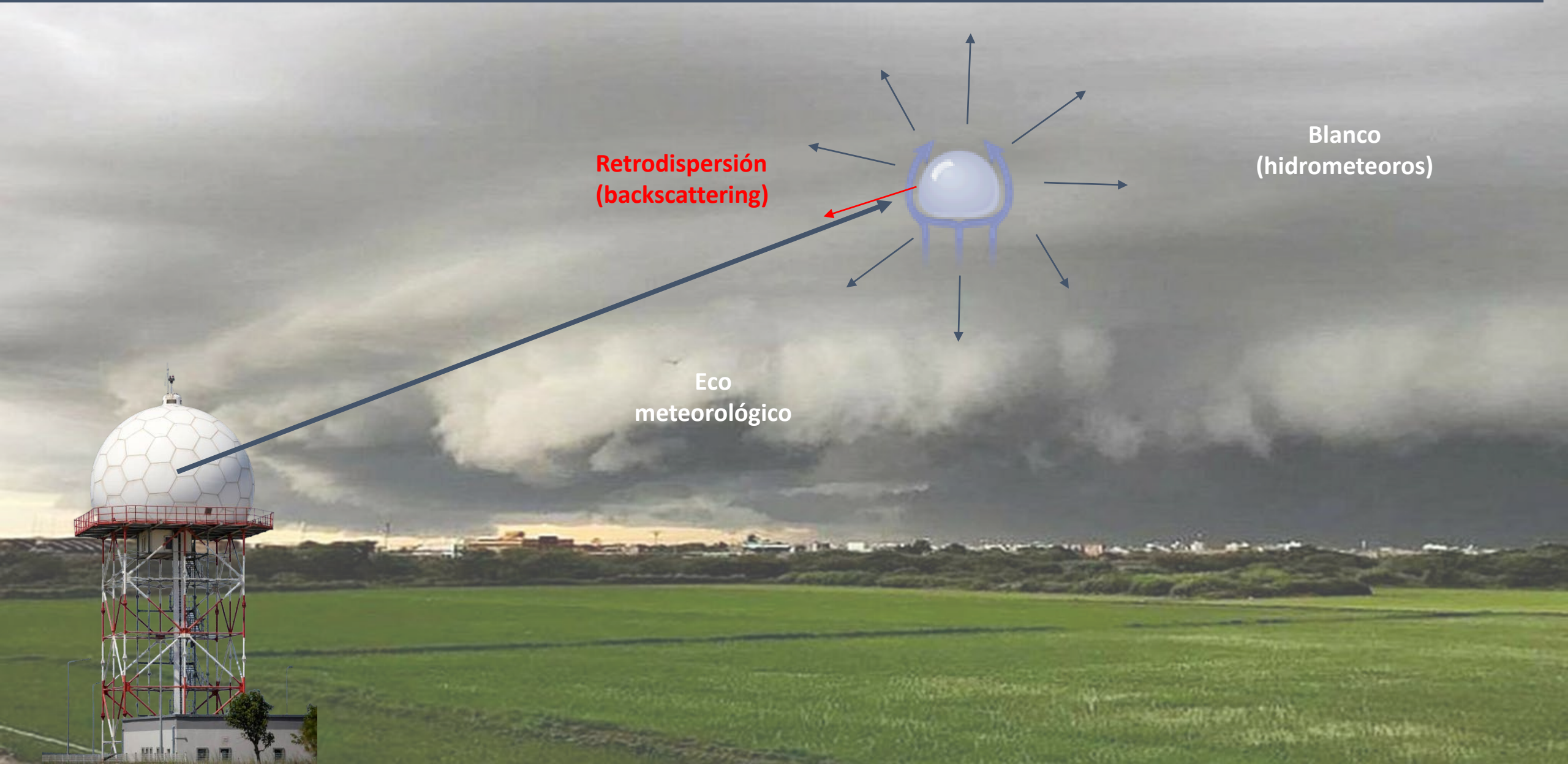
Ancho de espectro o Turbulencia (SW o W)

Reflectividad diferencial (Z_{DR})

Coefficiente de correlación (CC)

Fase Diferencial Específica (K_{DP})

¿Cómo funciona un radar?



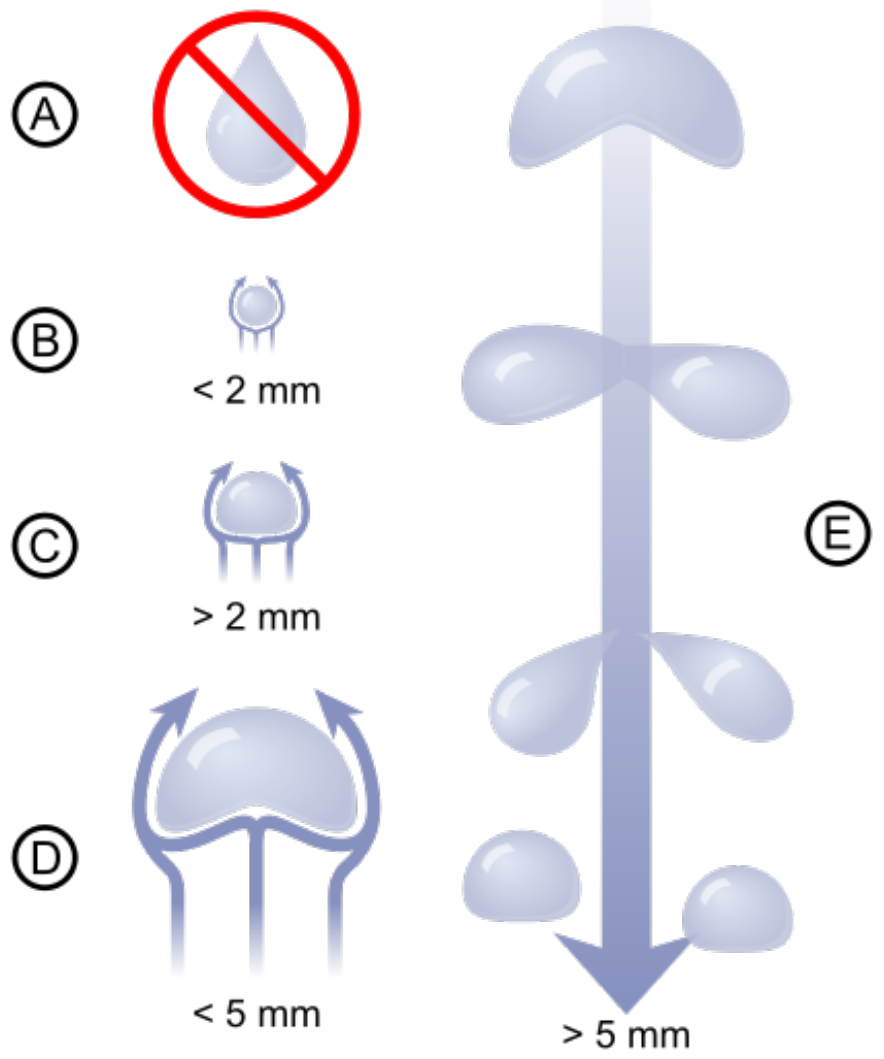
Retrodispersión
(backscattering)

Eco
meteorológico

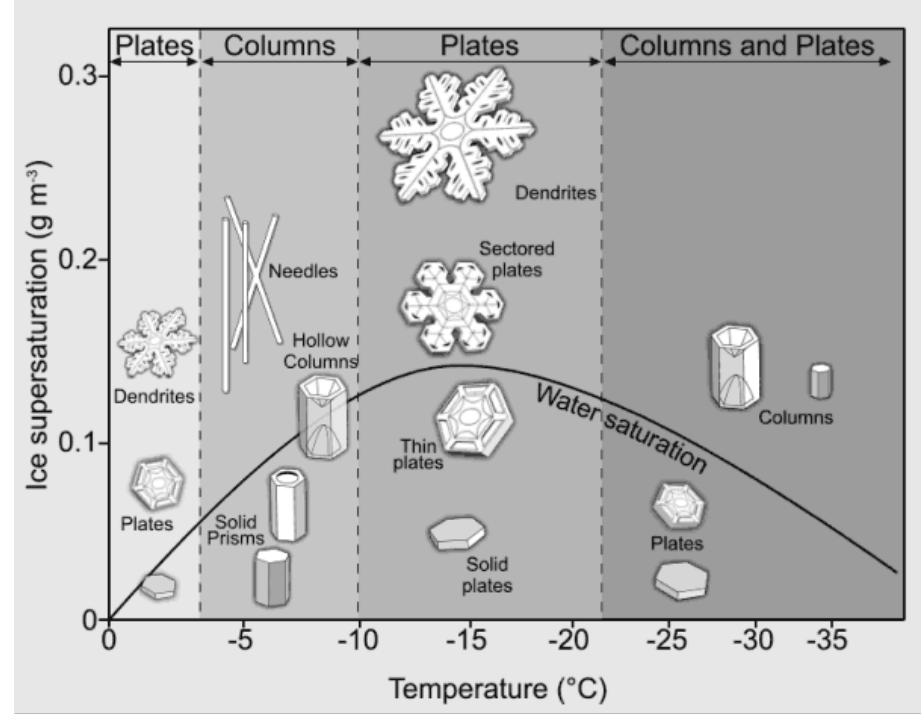
Blanco
(hidrometeoros)

Por qué importa la polarización (IV)

Gotas de lluvia



Cristales de hielo



Granizo

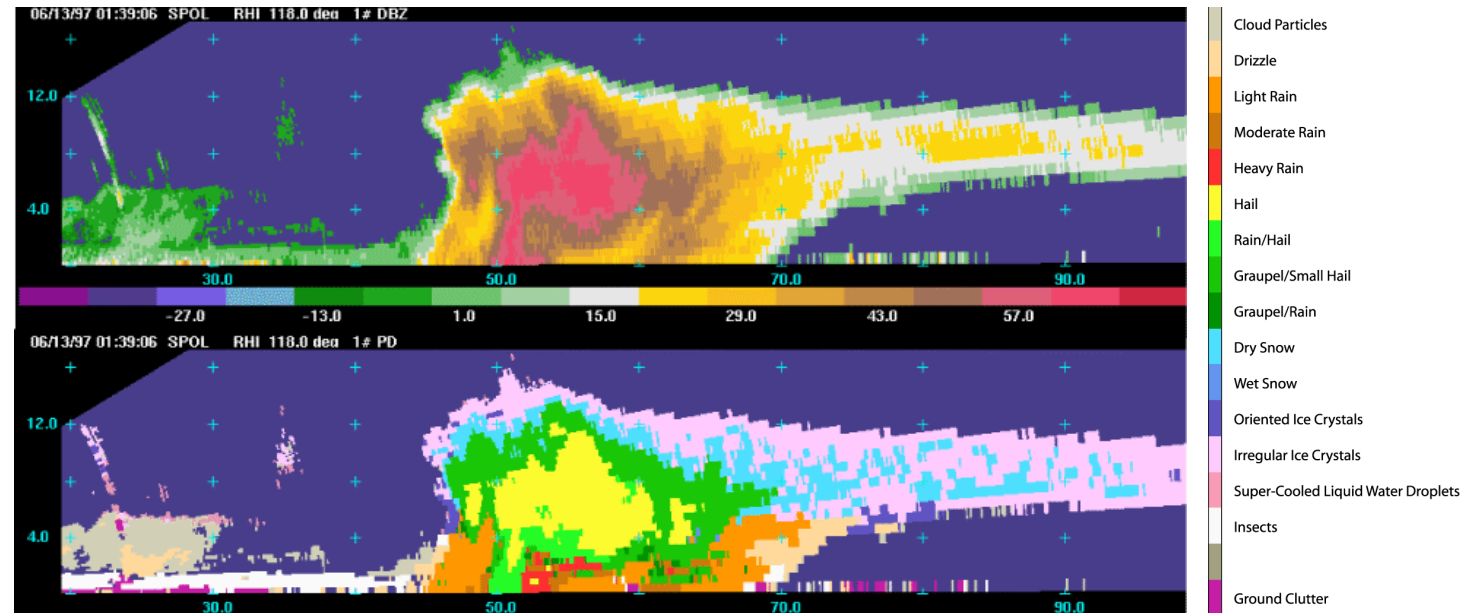


Resumen

Los radares polarimétricos proveen información adicional sobre la forma de los hidrometeoros.

Esto permite, junto con las variables ya conocidas (Z_H , V y SW):

- Identificar ecos no meteorológicos
- Clasificar en forma más precisa los hidrometeoros observados
- Estimar mejor la precipitación



Variables polarimétricas (observables polarimétricos)

1

Reflectividad Diferencial

Z_{DR}

2

Coeficiente de Correlación Copolar

ρ_{HV}

3

Diferencial de Fase

ϕ_{DP}

4

Diferencial de Fase Específico

K_{DP}

Variables polarimétricas


Reflectividad Diferencial - Z_{DR}

Reflectividad diferencial


La primera variable polarimétrica es la relación entre reflectividad Z_{HH} medida en polarización horizontal desde un pulso de transmisión polarizado horizontalmente y reflectividad Z_{VV} medida en polarización vertical desde pulso de transmisión polarizado verticalmente.

Definimos entonces la reflectividad diferencial Z_{DR} como


$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right)$$

Partículas "prolate" 

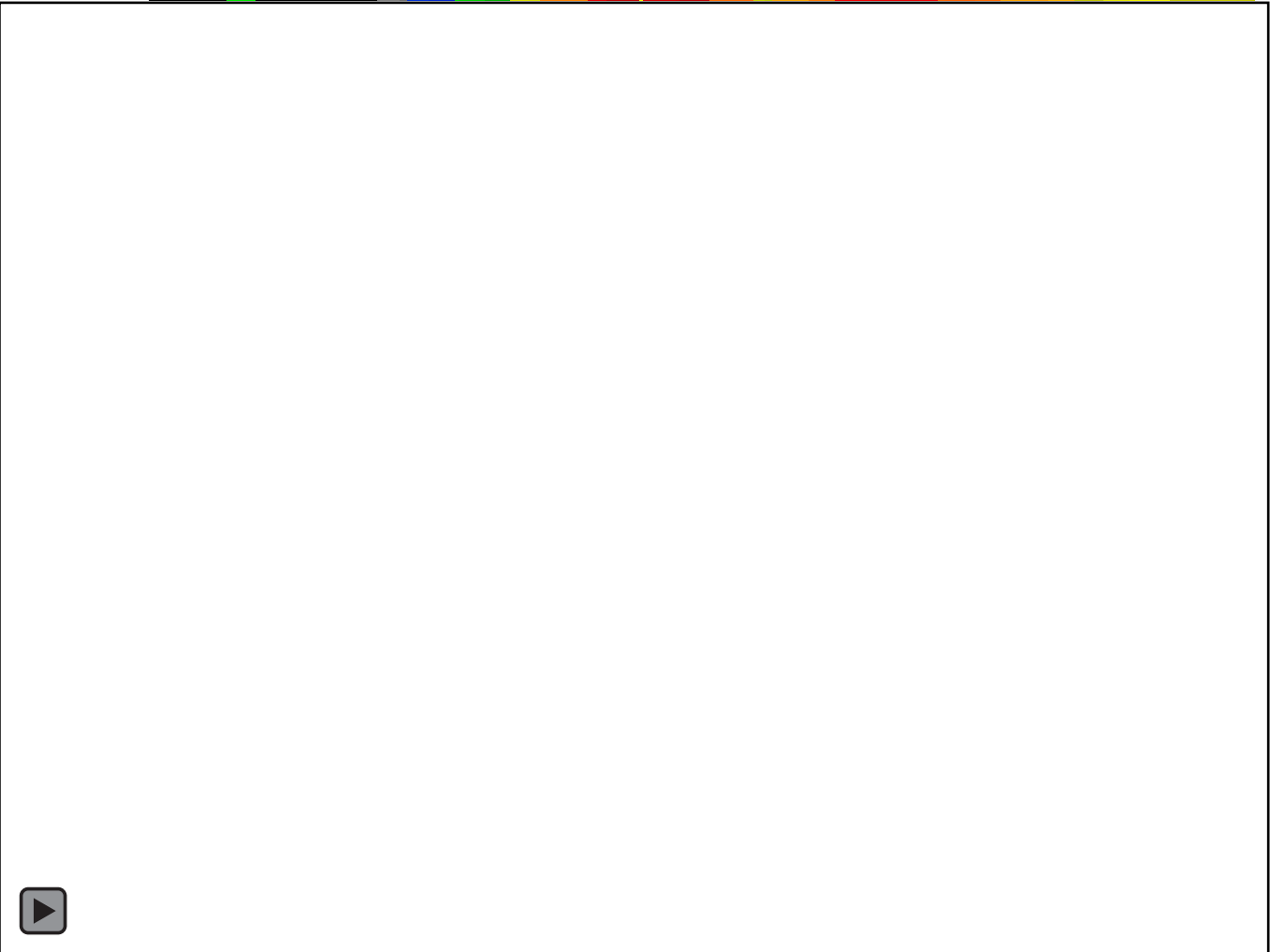
$Z_{HH} < Z_{VV} \Rightarrow Z_{DR} < 0 \text{ dB}$

Partículas esféricas 

$Z_{HH} = Z_{VV} \Rightarrow Z_{DR} = 0 \text{ dB}$

Partículas "oblate" 

$Z_{HH} > Z_{VV} \Rightarrow Z_{DR} > 0 \text{ dB}$

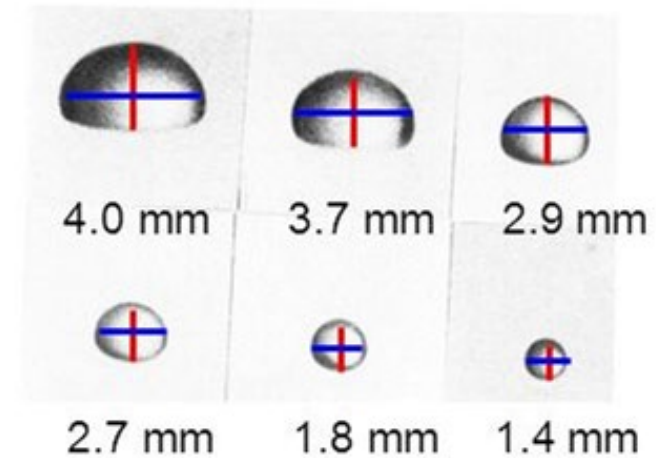


Reflectividad diferencial *(cont.)*

Gotas de agua líquida

- La forma varia entre esféricas (gotas pequeñas) y obloides (gotas grandes)
- Las gotas caen con su eje mayor horizontal

$$Z_{DR} = 0 \text{ a } +5 \text{ dB}$$



(Pruppacher and Klett, 1997)

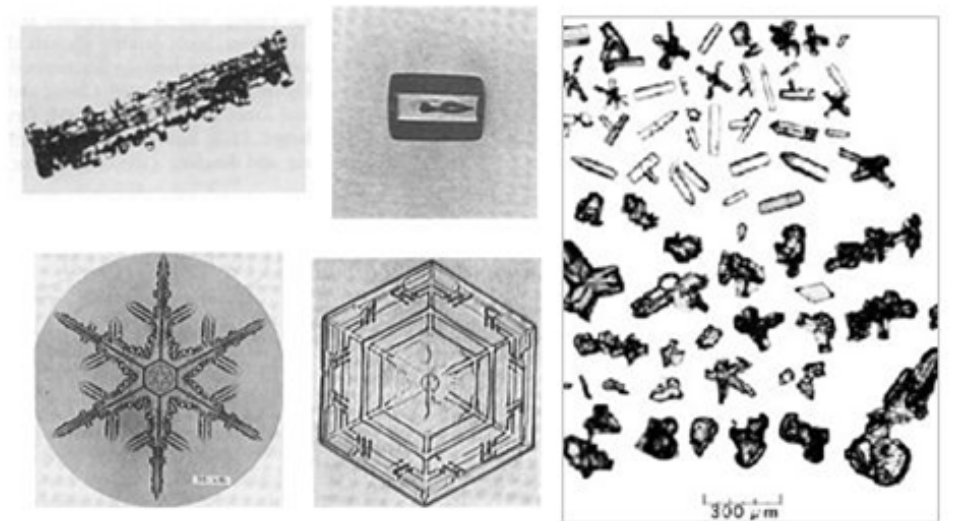
Cristales de hielo

- Formas muy variables
- Típicamente caen con su eje mayor horizontal

$$Z_{DR} = +2 \text{ a } +4 \text{ dB (columnas)}$$

$$Z_{DR} = +3 \text{ a } +6 \text{ dB (dendritas/platos)}$$

$$Z_{DR} = 0 \text{ a } +1 \text{ dB (agregados)}$$

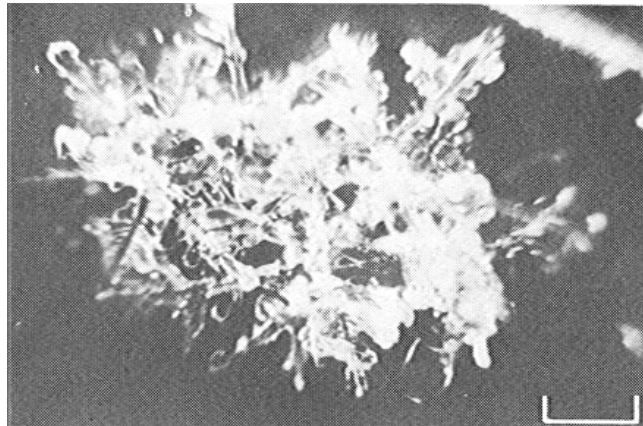
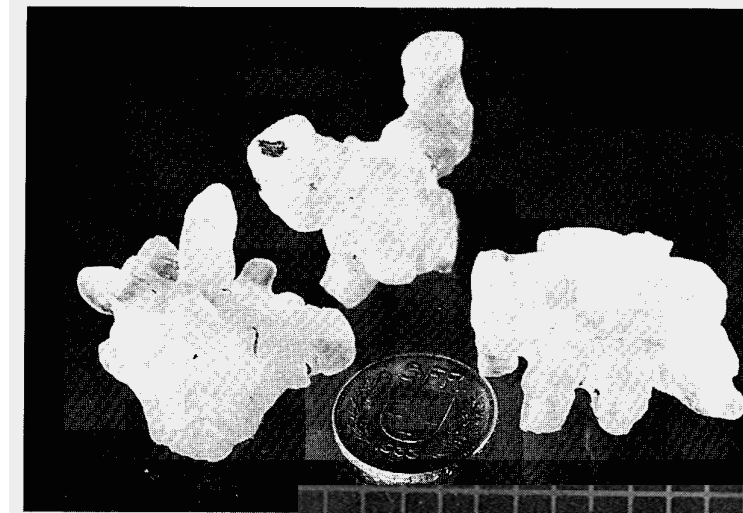


Reflectividad diferencial *(cont.)*

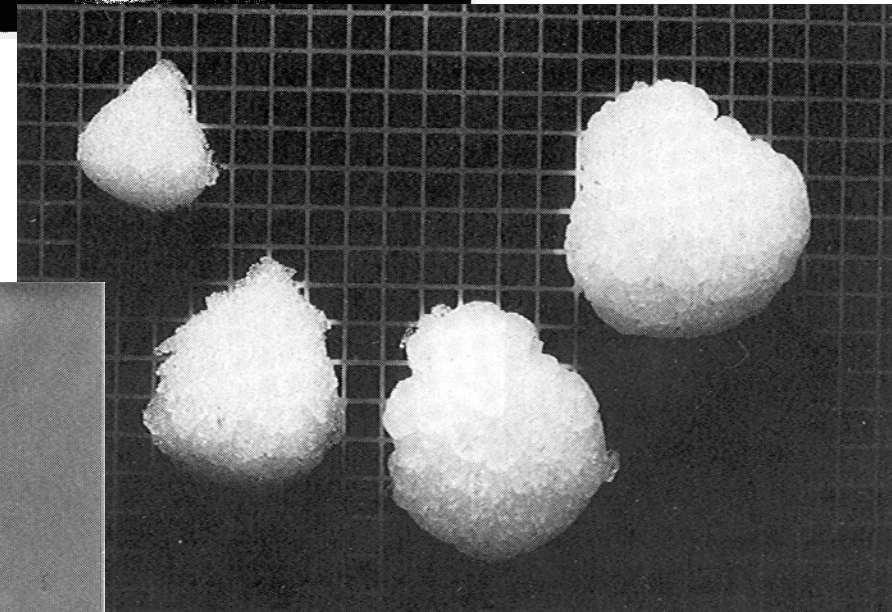
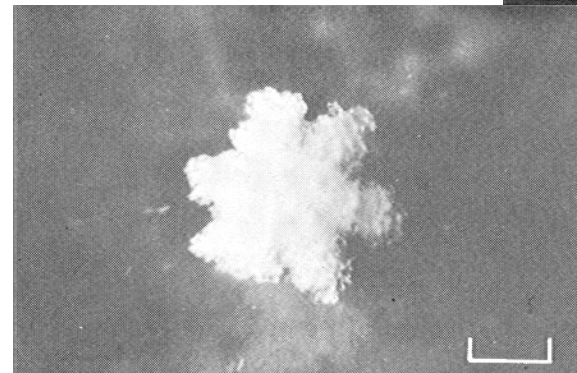
Granizo $Z_{DR} = -1 \text{ a } +0.5 \text{ dB}$

Graupel $Z_{DR} = -0.5 \text{ a } +1 \text{ dB}$

Nieve $Z_{DR} = 0 \text{ a } 1 \text{ dB}$



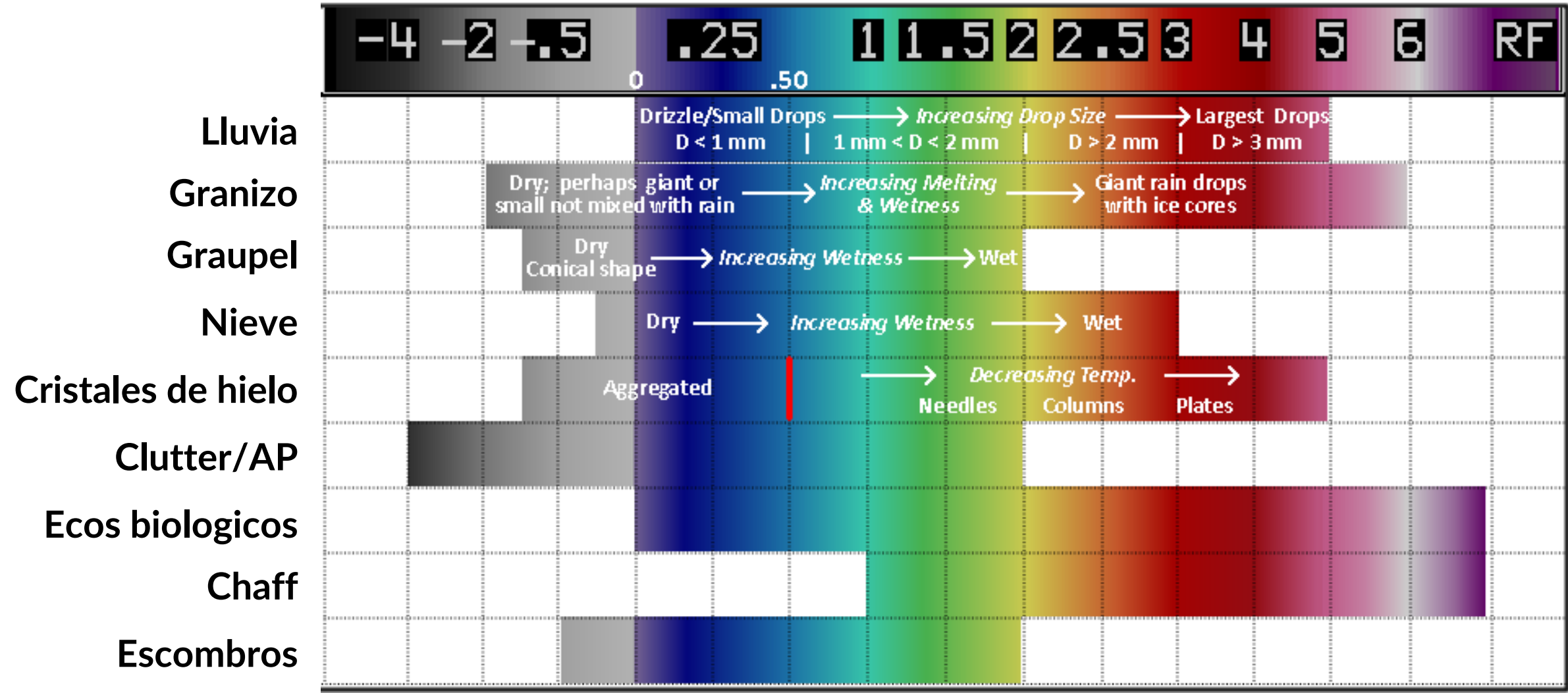
(Hobbs, 1974)



(Pruppacher and Klett, 1997)

Reflectividad diferencial (cont.)

Tabla con valores típicos de Z_{DR} (dB) para diferentes tipos de blancos



Fuente: WDTB E-learning

Reflectividad diferencial *(cont.)*

¿Que permite detectar Z_{DR} ?

1. Tamaño medio de las gotas de agua ($Z_{DR} \uparrow$, tamaño medio de las gotas \uparrow)
1. Granizo ($Z_{DR} \sim 0$ dB o negativo en regiones con **valores altos de Z_H**)
1. Regiones con gotas grandes o hielo que comienza a fundirse ($Z_{DR} \sim +3$ a $+6$ dB)

Variables polarimétricas

Coeficiente de correlación copolar - ρ_{HV}

Coeficiente de correlación copolar

$$\rho_{HV} = \frac{\langle |S^{VV} S^{HH*}| \rangle}{\sqrt{\langle |S^{HH}|^2 \rangle \langle |S^{VV}|^2 \rangle}}$$

Es la correlación entre las señales de retorno copolar HH y VV.

El rango de valores va de 0 (sin correlación entre las dos señales) y 1 (correlación perfecta).

Si los blancos tienen formas idénticas, los patrones de interferencia constructiva y destructiva que dan lugar a la señal de radar fluctuante serán idénticos en ambas polarizaciones. La única diferencia es un cambio fraccional en la intensidad del eco que se mide por Z_{DR} .

Si los blancos tienen formas variadas, las series de tiempo de los retornos en la polarización horizontal y vertical van a diferir: por ejemplo, una configuración del blanco que resultaría en una cancelación perfecta de la señal en una polarización no lo hará en la otra polarización

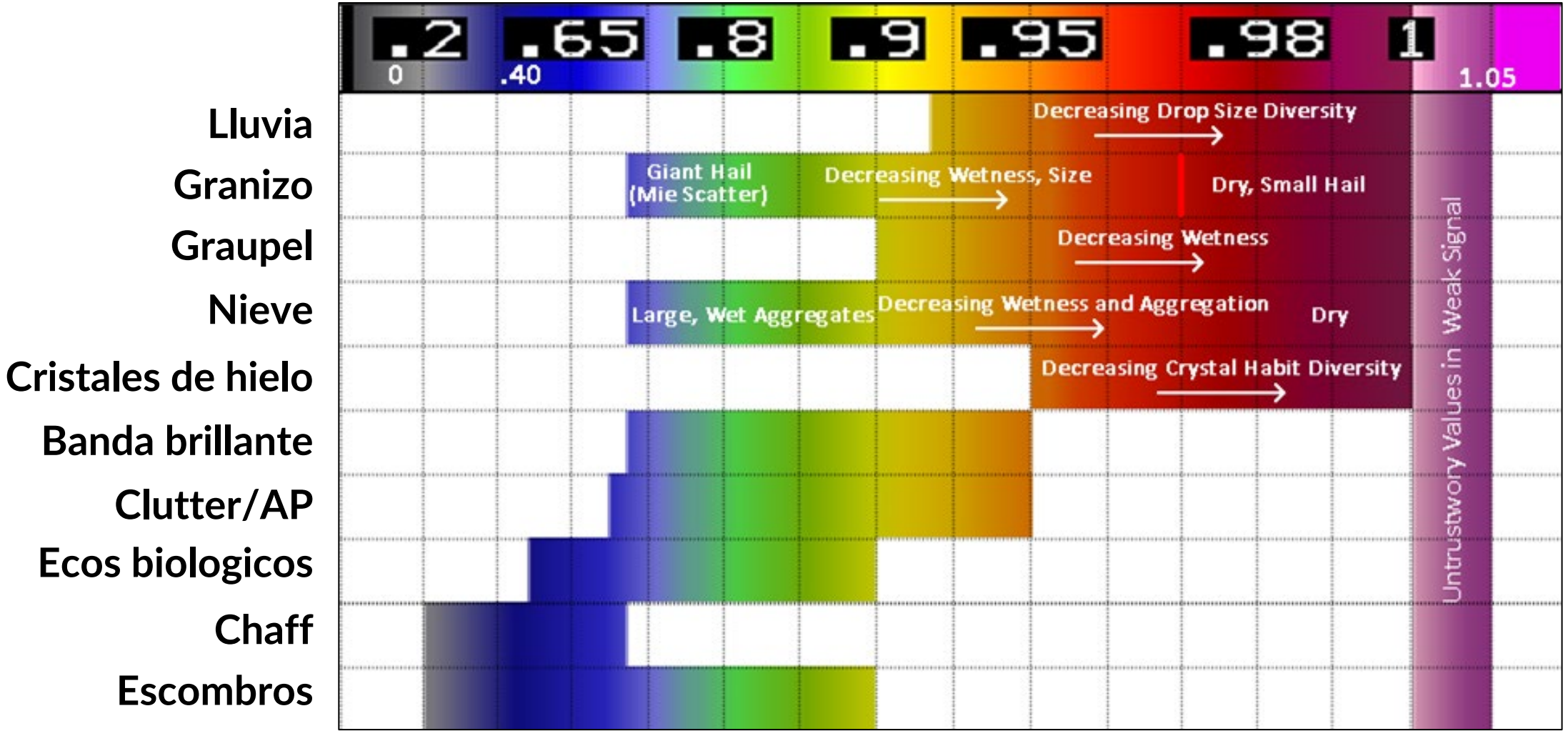
El coeficiente ρ_{HV} es una buena medida de la uniformidad de las formas de los blancos dentro del volumen de muestreo.

Coeficiente de correlación copolar (cont.)

<p><u>Ecoss no meteorológicos</u> (pajaros, insectos, etc.)</p>	<p><u>Ecoss meteorológicos no uniformes</u> (granizo, nieve que se funde)</p>	<p><u>Meteorológicos uniformes</u> (lluvia, nieve)</p>
		
<p>Las formas son complejas y variables con lo cual la dispersión horizontal y vertical pueden comportarse de manera diferente.</p>	<p>Formas complejas y variables, en este caso también la dispersión horizontal y vertical puede comportarse en forma diferente.</p>	<p>En estos casos las formas son más simples, las componentes horizontal y vertical de la potencia dispersada varían de manera muy similar.</p>
<p>Correlación baja ($\rho_{HV} < 0.9$)</p>	<p>Correlación moderada ($0.85 < \rho_{HV} < 0.95$)</p>	<p>Correlación alta ($\rho_{HV} > 0.97$)</p>

Coeficiente de correlación copolar (cont.)

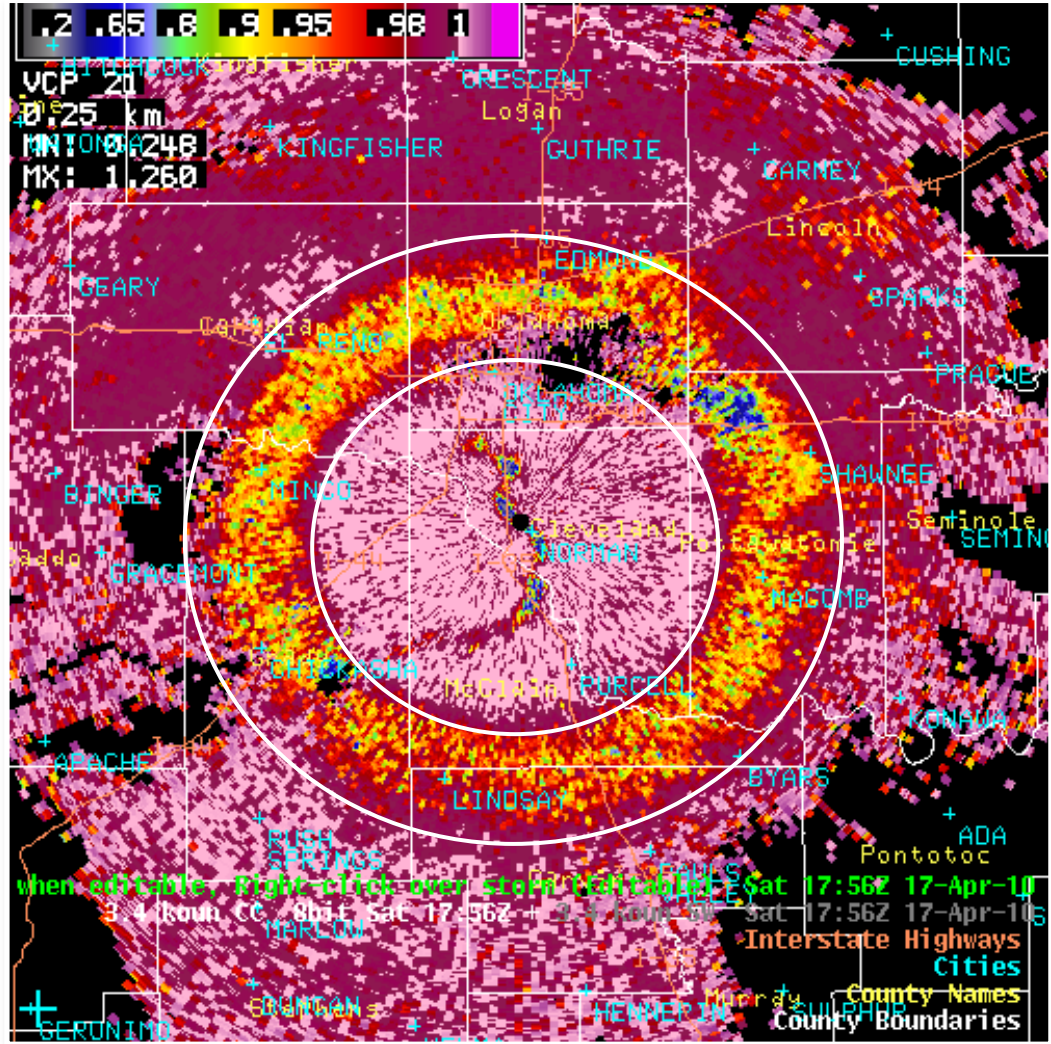
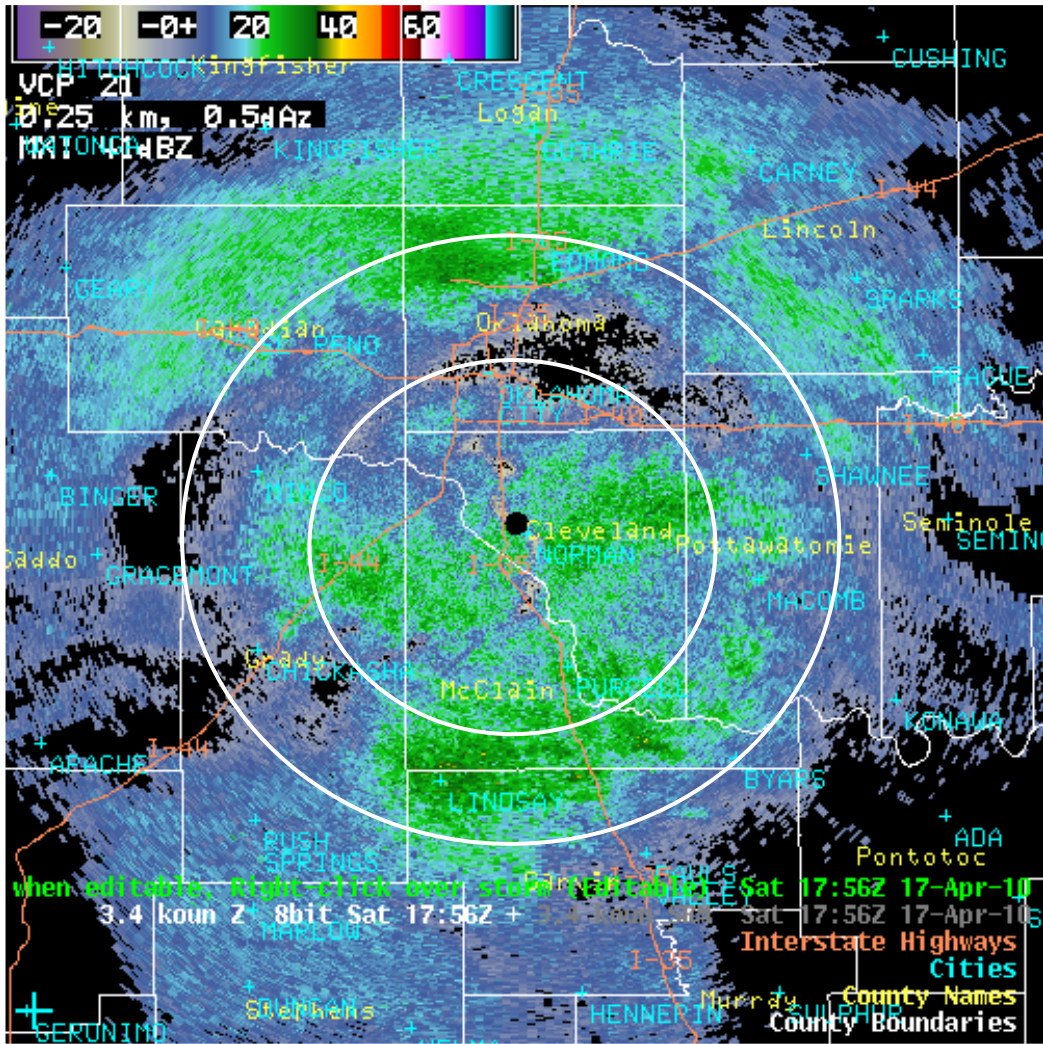
Tabla con valores típicos para diferentes tipos de blancos



Coeficiente de correlación copolar (cont.)

Ejemplo identificación de la banda brillante

La banda brillante no está siempre presente en la reflectividad o a veces no se distingue fácilmente. En esos casos, el coeficiente de correlación puede permitir identificar la posición del nivel de fusión como un nivel de mínimo coeficiente de correlación.

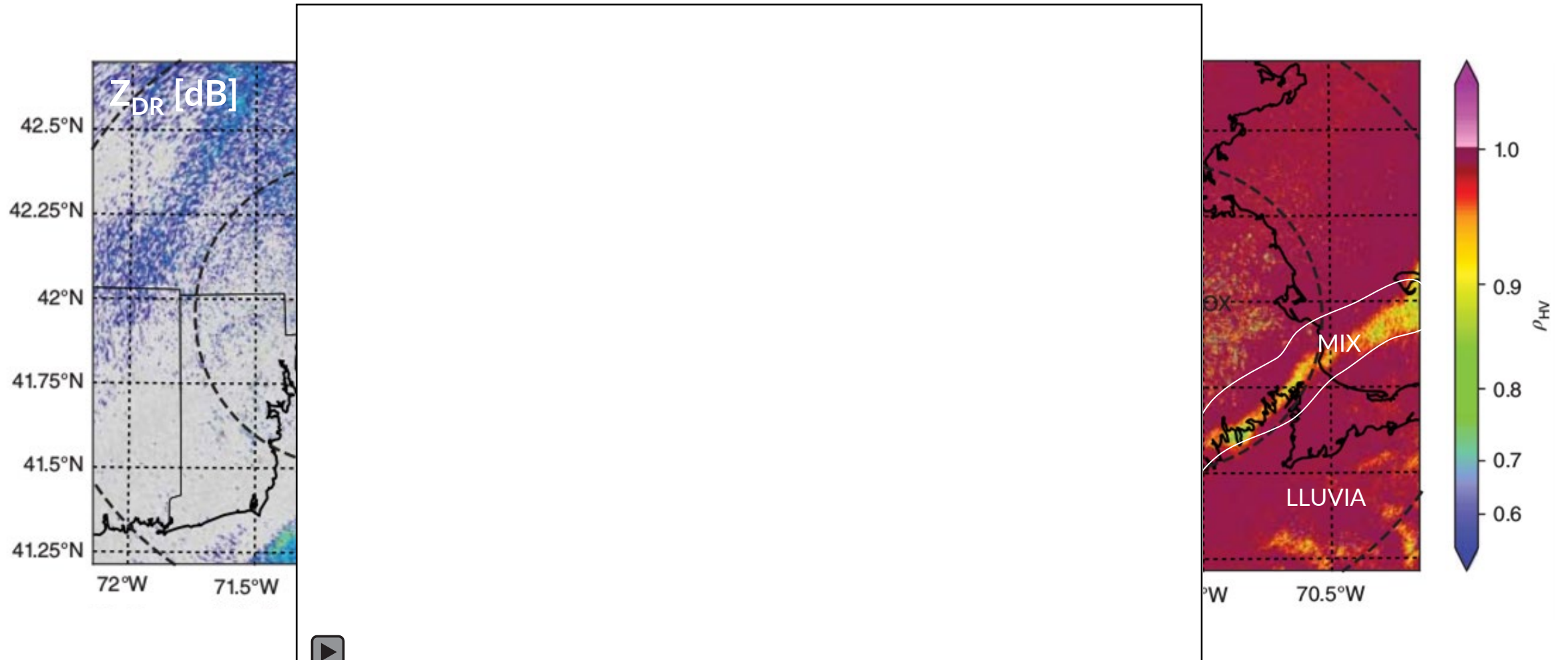


Coeficiente de correlación copolar (cont.)

Ejemplo de cómo ρ_{HV} es útil para identificar regiones con mezcla de hidrometeoros: transición entre lluvia y nieve

Radar KBOX NEXRAD (Boston, Massachusetts) - PPI@0.5° 5 Feb 2016 13:15 UTC

Ciclón en la costa este con una clara transición de lluvia y nieve que se extiende con orientación SW-NE a través de Cape Cod



Variables polarimétricas

Diferencial de Fase Específico - K_{DP}

Diferencial de Fase Específica

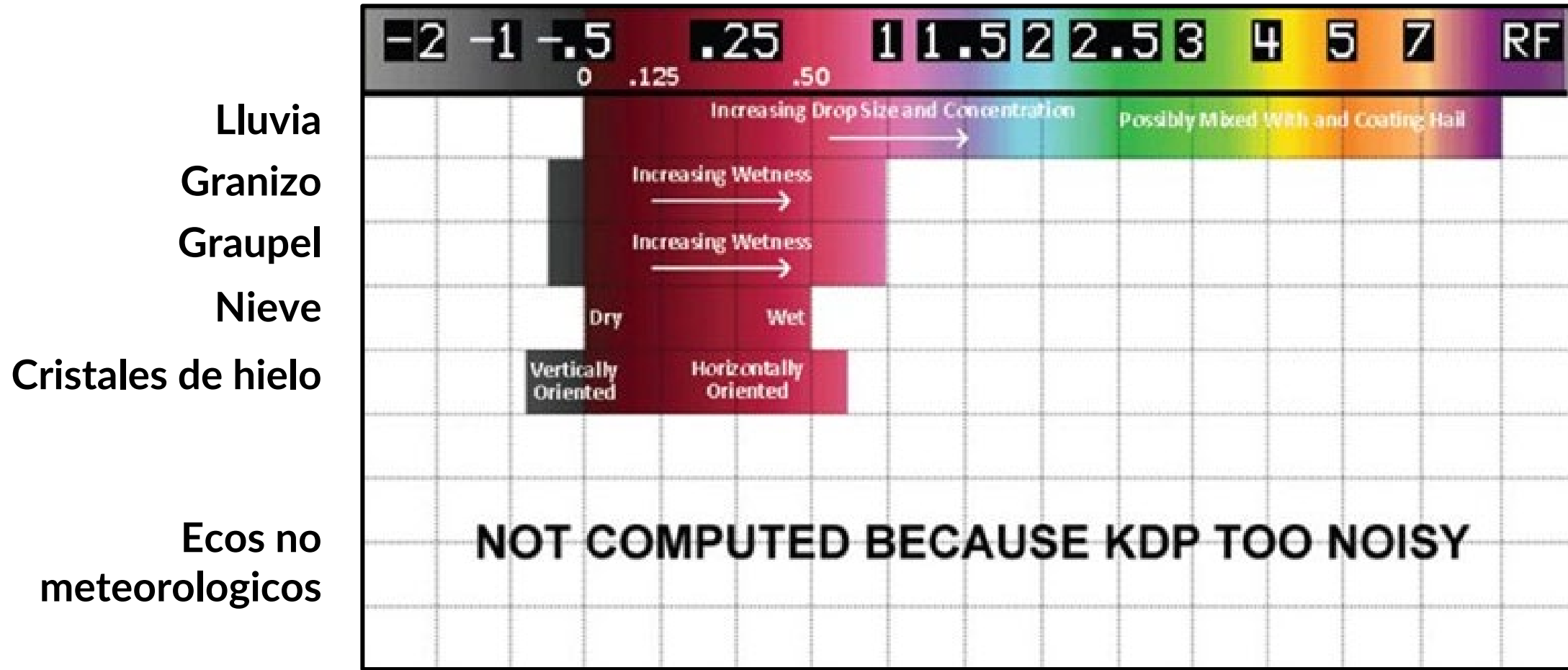
Permite determinar en qué lugares la diferencia de fase entre la onda polarizada verticalmente y horizontalmente está cambiando. A diferencia de la diferencia de fase, **el KDP detecta los lugares donde la fase está cambiando** como respuesta a las propiedades microfísicas de la nube.

Definition	Possible Range of Values	Units	Abbreviated Name
The range derivative of the differential phase shift between the horizontal and vertical pulse phases	-2 to 7	Degrees per Kilometer (deg/km)	KDP

$$KDP = \frac{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)}$$

Diferencial de Fase Específica

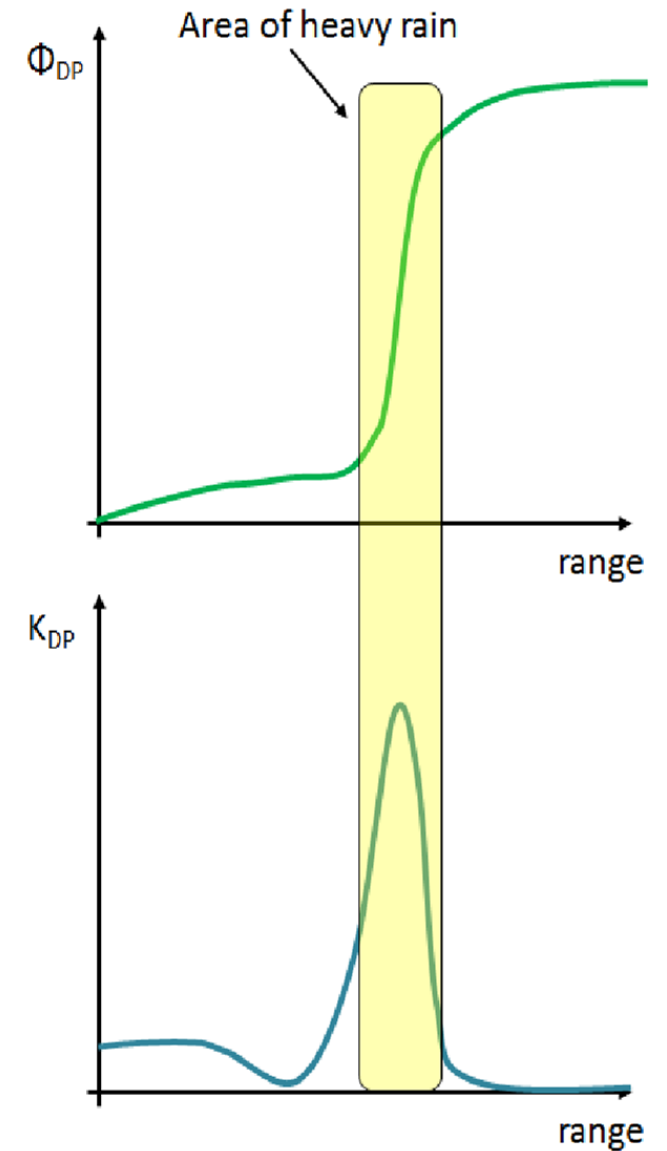
Tabla con valores típicos para diferentes tipos de blancos



Diferencial de fase específica K_{DP}

#3

- Proporciona información sobre la deformación y concentración de gotas.
- Es particularmente útil para estimar tasas de precipitación.
- A diferencia de la reflectividad diferencial (Z_{DR}), K_{DP} depende tanto de la concentración como del tamaño de las gotas. Por eso brinda información complementaria a la que se obtiene a partir de la reflectividad diferencial y de la reflectividad.
- Una ventaja crucial del K_{DP} sobre todas las cantidades basadas en reflectividad es que **no se ve afectado por la atenuación**. Por ese motivo se lo utiliza también como una manera de corregir la atenuación de la reflectividad.

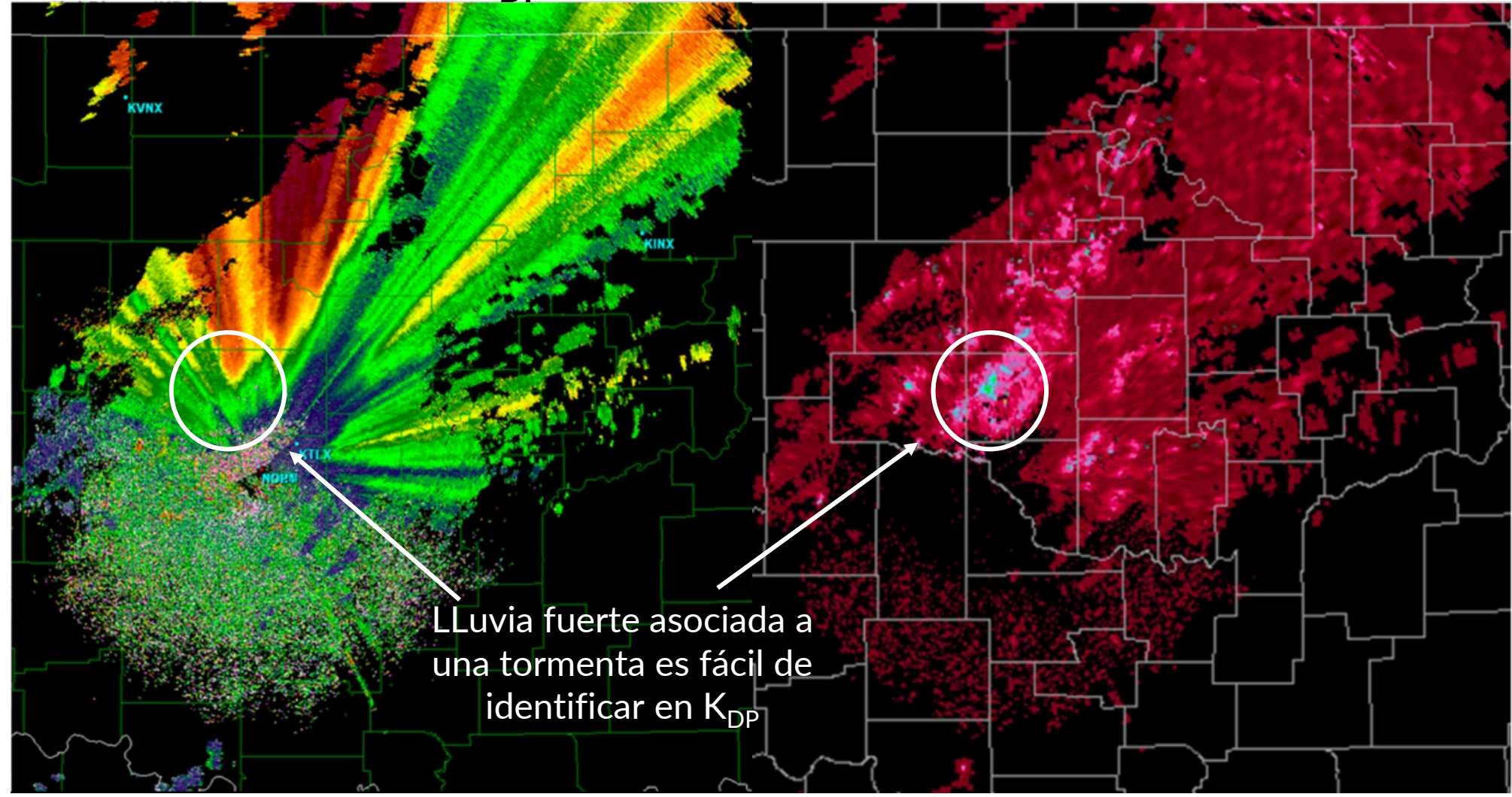


Diferencial de fase específica K_{DP}

#4

Diferencial de fase - φ_{DP}

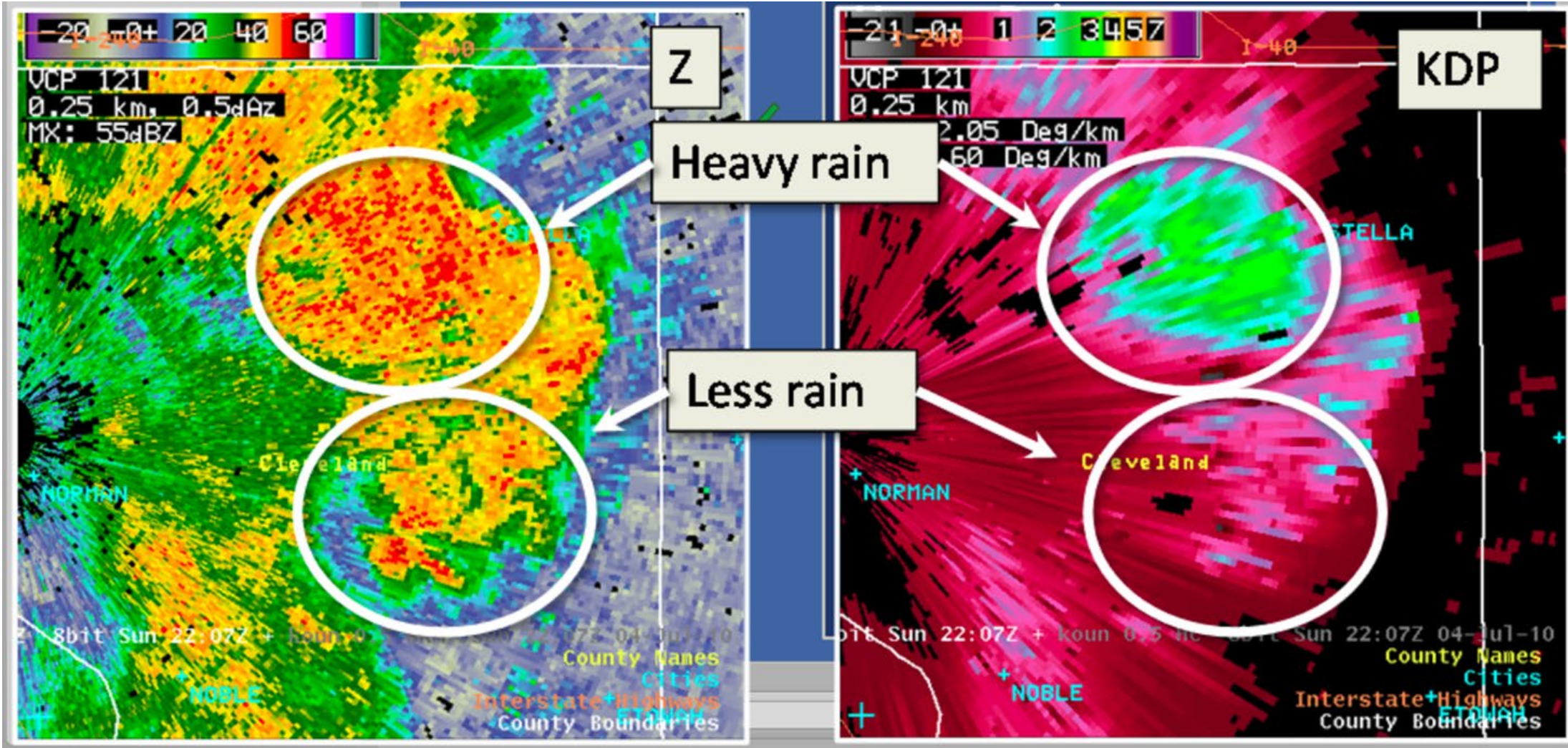
Diferencial de fase específico - K_{DP}



LLuvia fuerte asociada a una tormenta es fácil de identificar en K_{DP}

Diferencial de fase específica K_{DP}

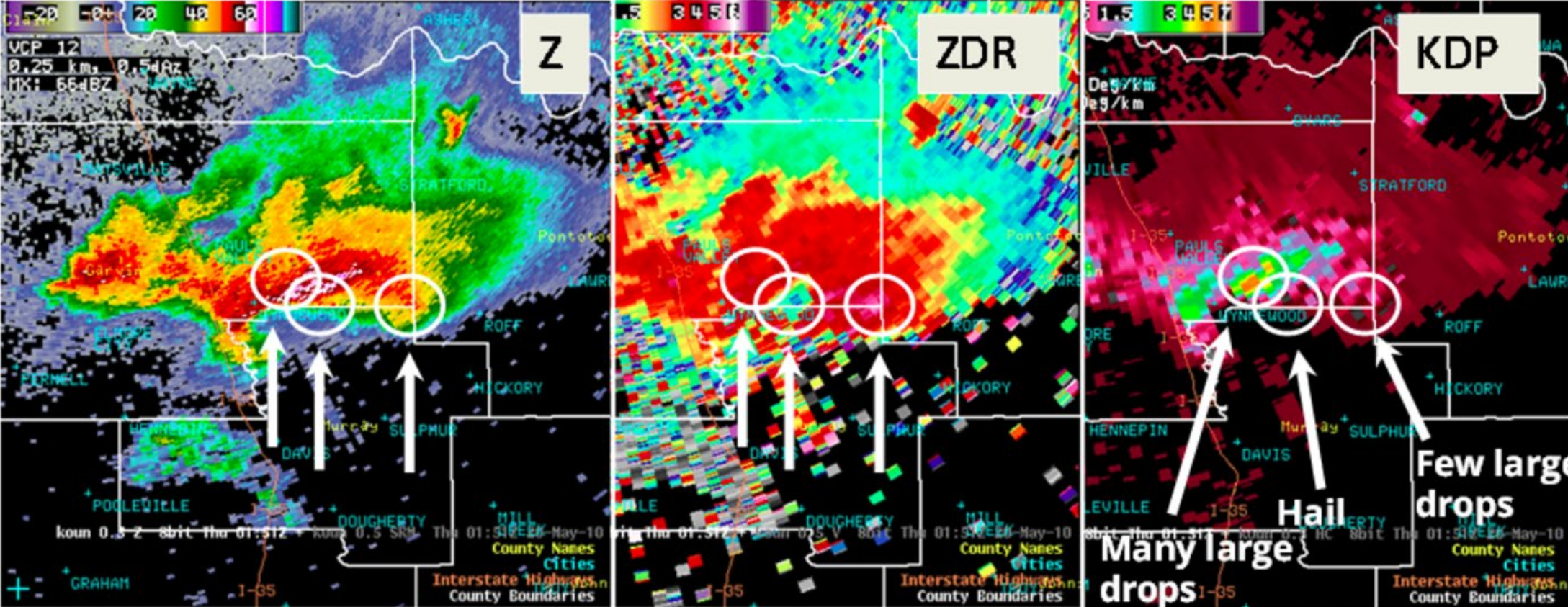
#5



Útil para identificar zonas con lluvias fuertes ($K_{DP} \sim 4-5^\circ/\text{km}$)

Diferencial de fase específica K_{DP}

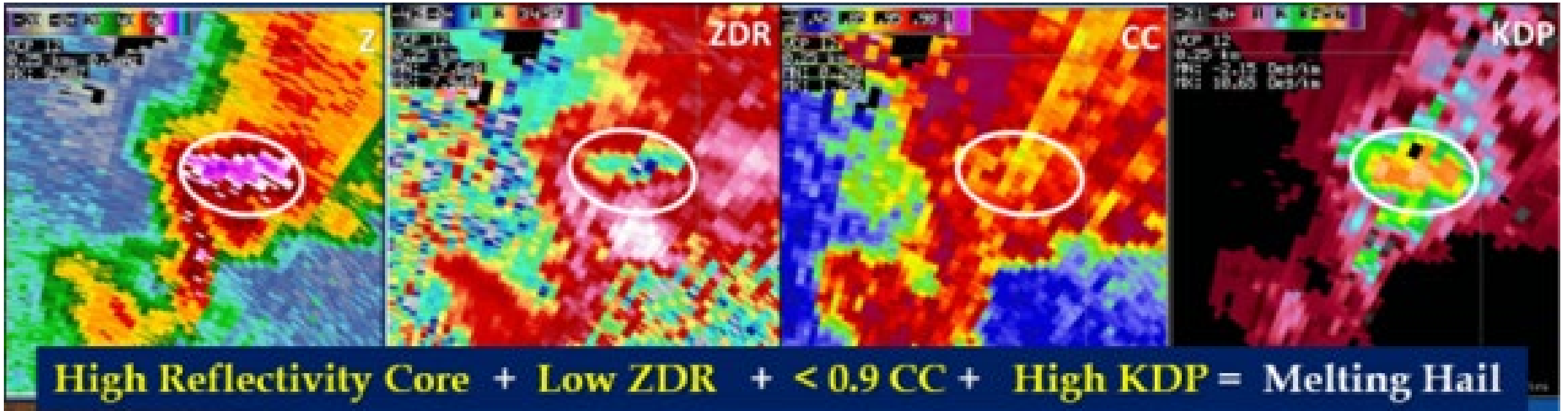
#6



Útil para identificar regiones con lluvia, granizo o mezcla

Diferencial de fase específica K_{DP}

#4

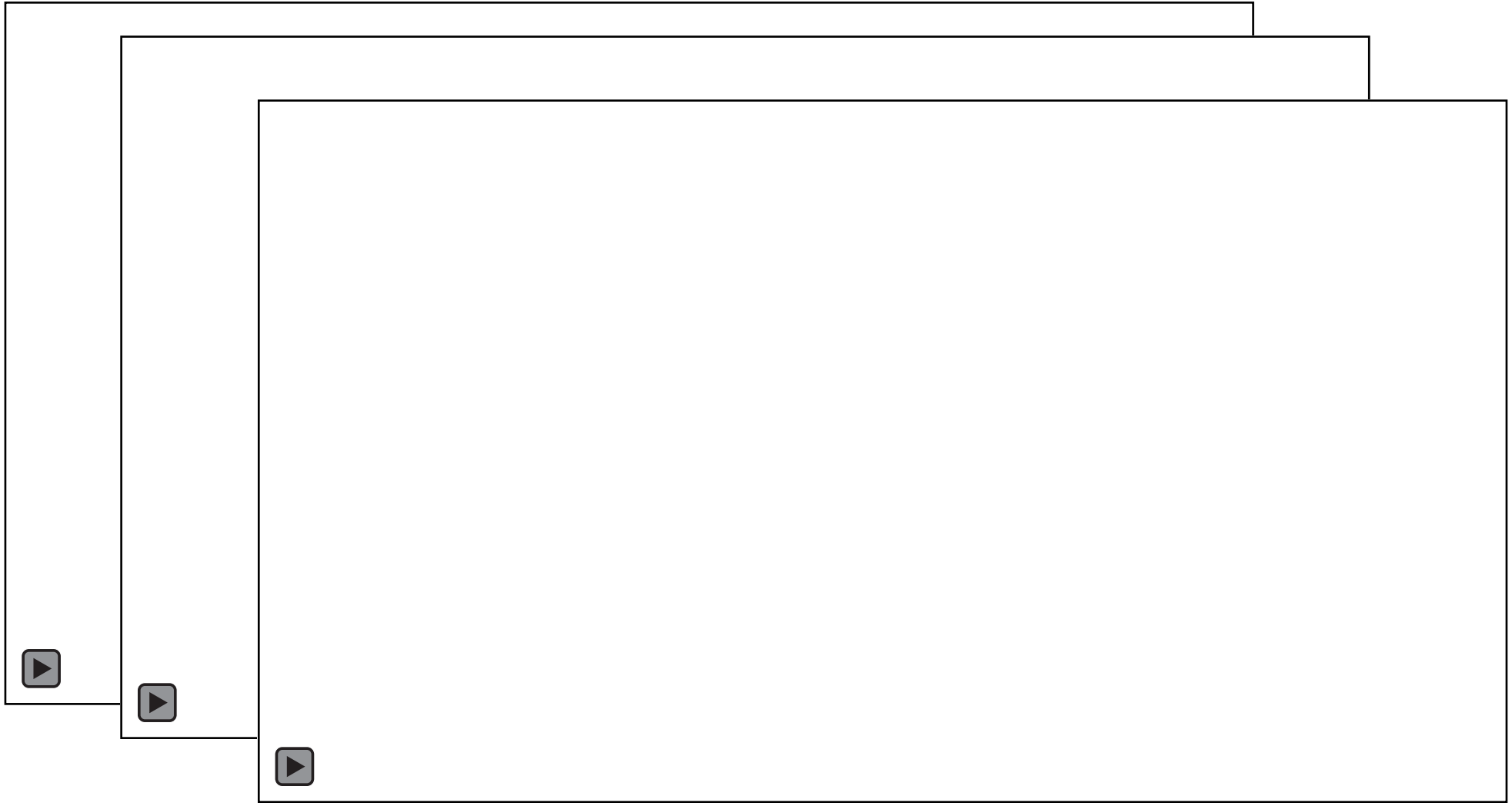


Útil para identificar zonas de granizo que se está fundiendo

Limitaciones: Ambigüedad de distancia

El tiempo que media entre la emisión de dos pulsos consecutivos del radar debe ser suficiente como para que la energía devuelta del primer pulso regrese antes de que el radar transmita el segundo, ya que en caso contrario el radar interpreta la energía devuelta del primer pulso como si perteneciera al segundo.

La distancia máxima que un pulso puede alejarse del radar sin que esto ocurra es la «**distancia máxima no ambigua**» ($R_{\text{máx}}$).



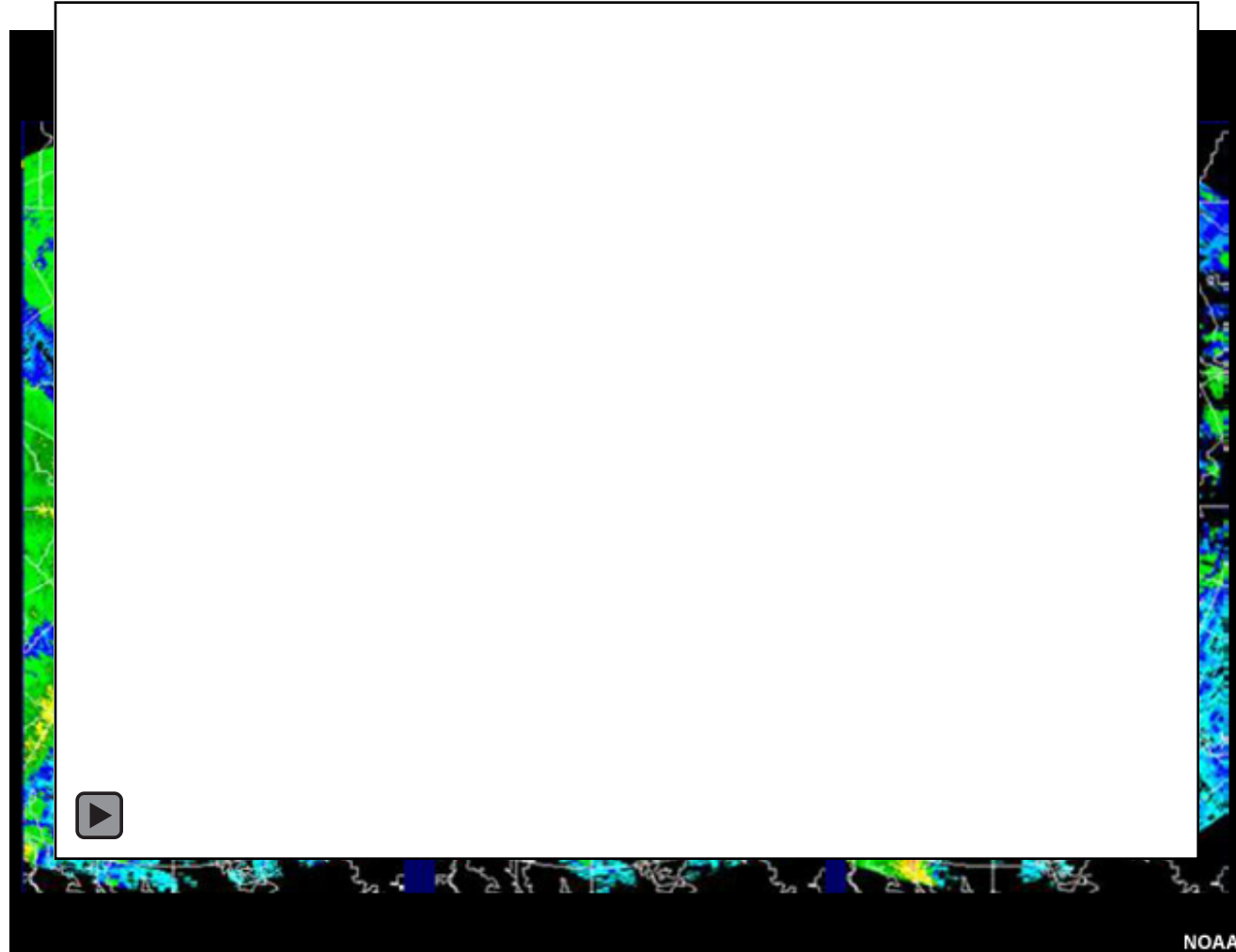
Limitaciones: Ángulo de visualización

Por lo general, el radar puede observar la convección a alguna elevación, excepto si la tormenta se encuentra muy cerca y se extiende hasta el cono de silencio. Incluso en esas condiciones, los niveles bajos de la tormenta se pueden observar en cierta medida, ya que aún es posible detectar las rotaciones fuertes y otras amenazas. Si la precipitación está lejos del radar, el haz puede pasar por encima de algunas estructuras importantes. Estos tipos de problemas se acentúan para la precipitación en niveles bajos, porque es posible no detectar en absoluto las áreas pequeñas cerca del radar.



Limitaciones: Atenuación

La segunda suposición es que la atenuación provocada por la absorción de la energía electromagnética por parte de los blancos es insignificante. El grado de atenuación que puede ocurrir depende en gran medida de la intensidad de la precipitación y de la longitud de onda de los pulsos transmitidos por el radar.



Bibliografía

- Material de curso de Jesús Riesco Martín (AEMET, España)
- Material de curso de Dr. Luciano Vidal (SMN, Argentina)
- Fundamentos de Radar Meteorológico (COMET Program)

GRACIAS! SULPAY!

*«Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide,
no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada
siempre»*

William Thomson Kelvin (Lord Kelvin)

Consultas y sugerencias son bienvenidas!
cmillan@senamhi.gob.pe



Siempre
con el pueblo