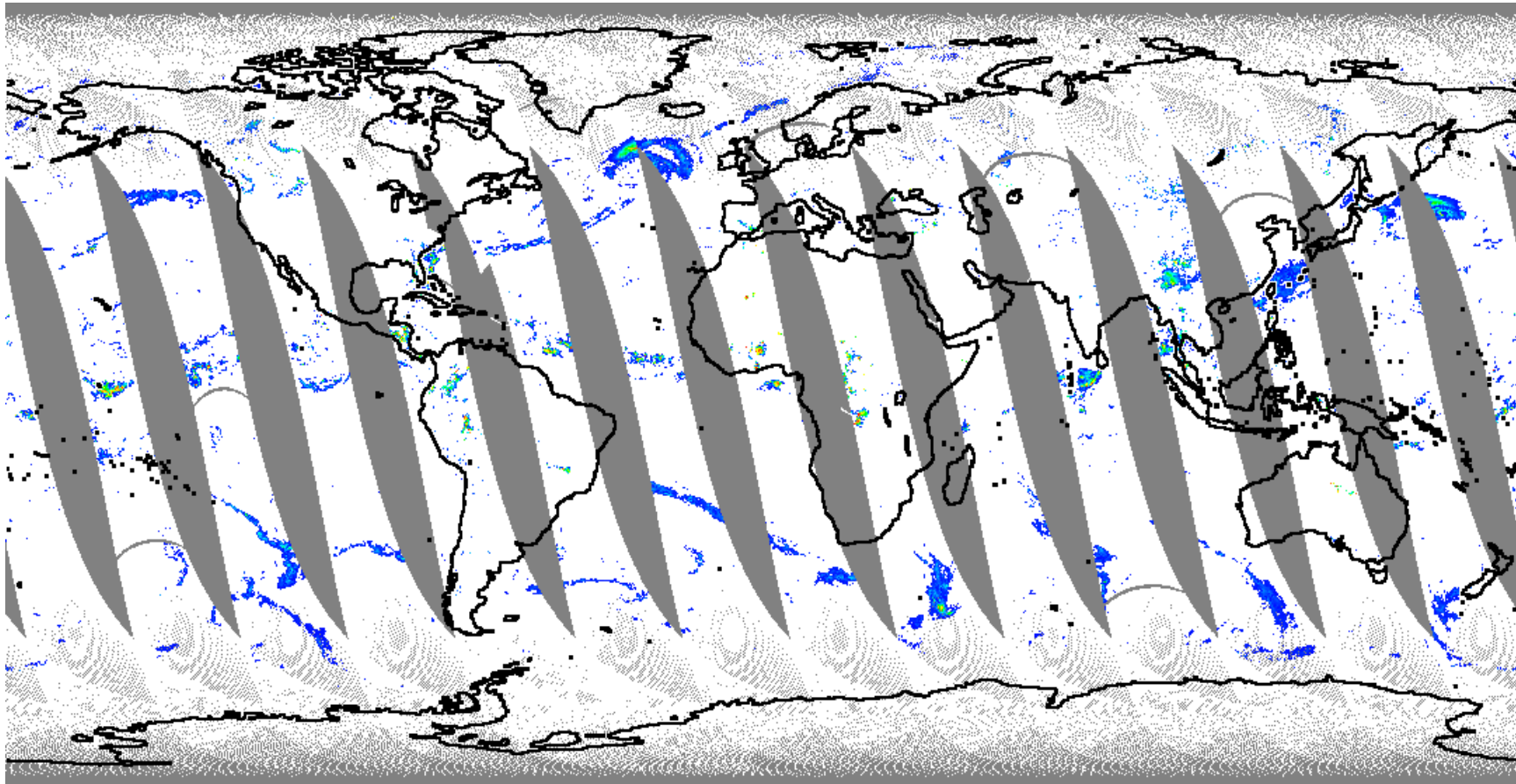
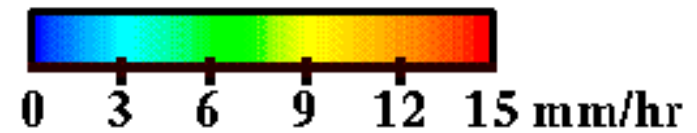


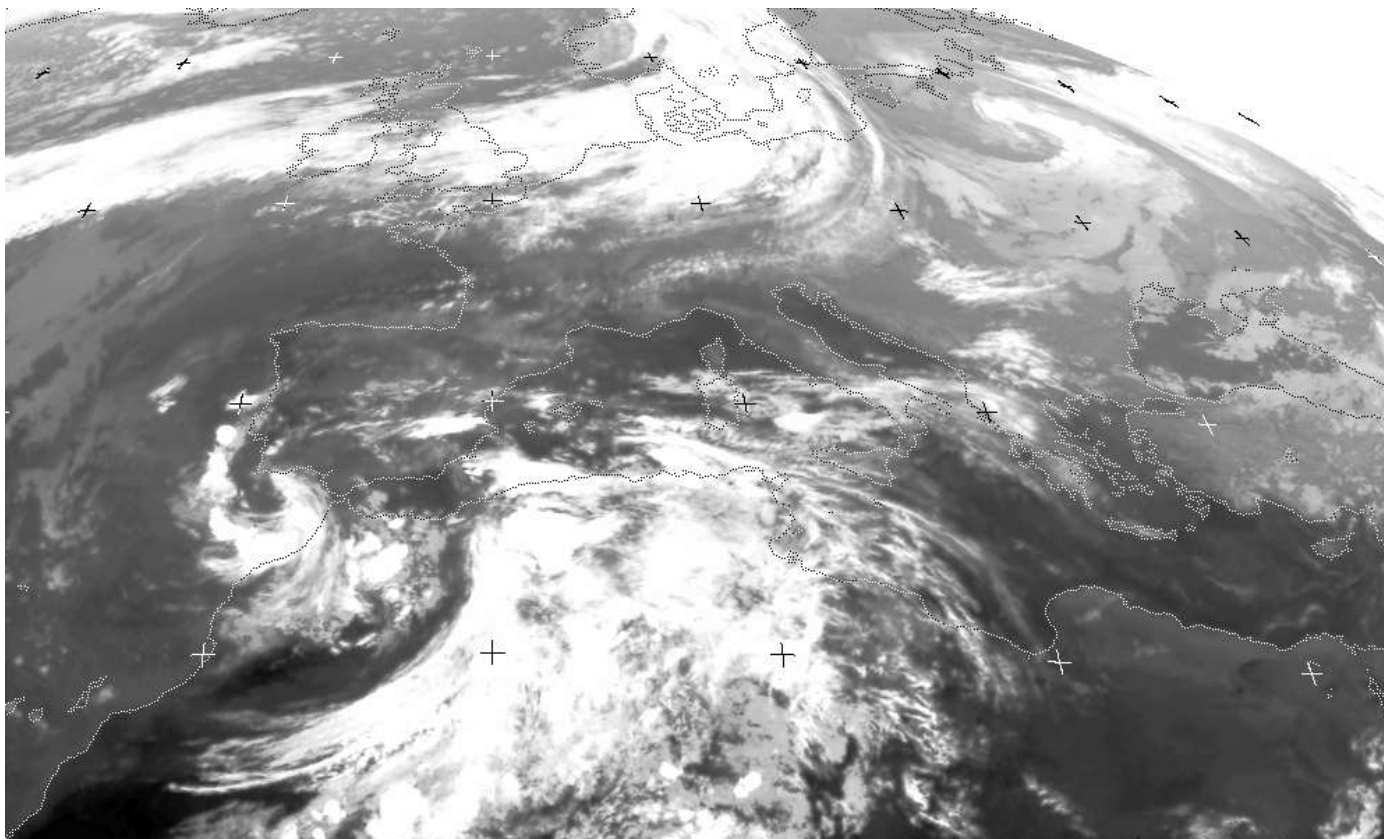
- Aplicaciones: Intensidad de Lluvia**



Datos (F-14): 29/9/1997  
(Procesado por NOAA)

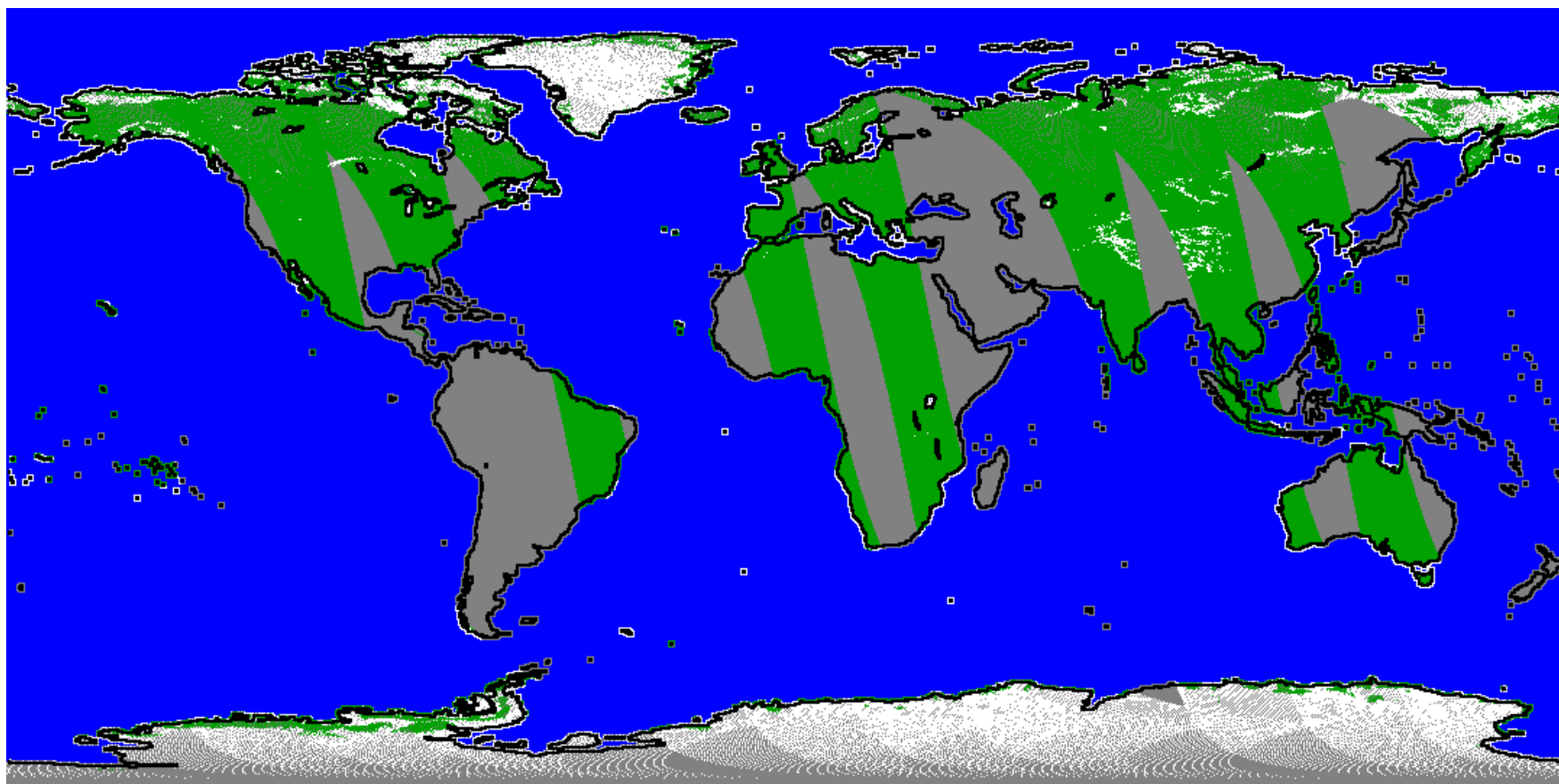


- **Comparación con Imagen METEOSAT (IR 29/09/97 18:00 h)**



Notar la correspondencia de las bandas nubosas con las zonas de lluvia, pero mientras los sensores ópticos o IR no penetran las nubes, las microondas sí.

- **Cobertura de Nieve (100% footprint)**



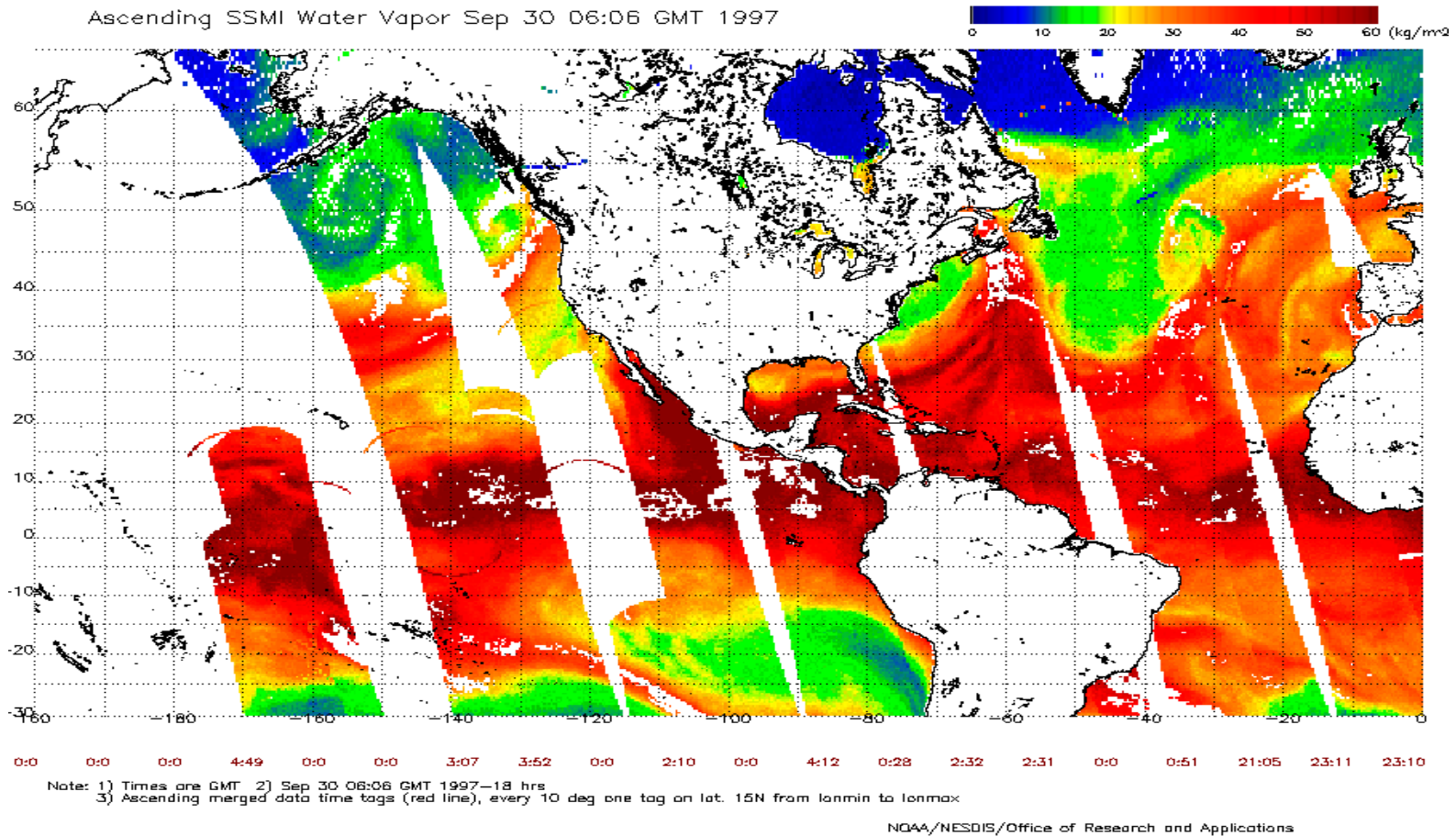
Datos (F-14): 29/9/1997

(Procesado por NOAA)

(c) 2000 Universitat Politècnica de Catalunya

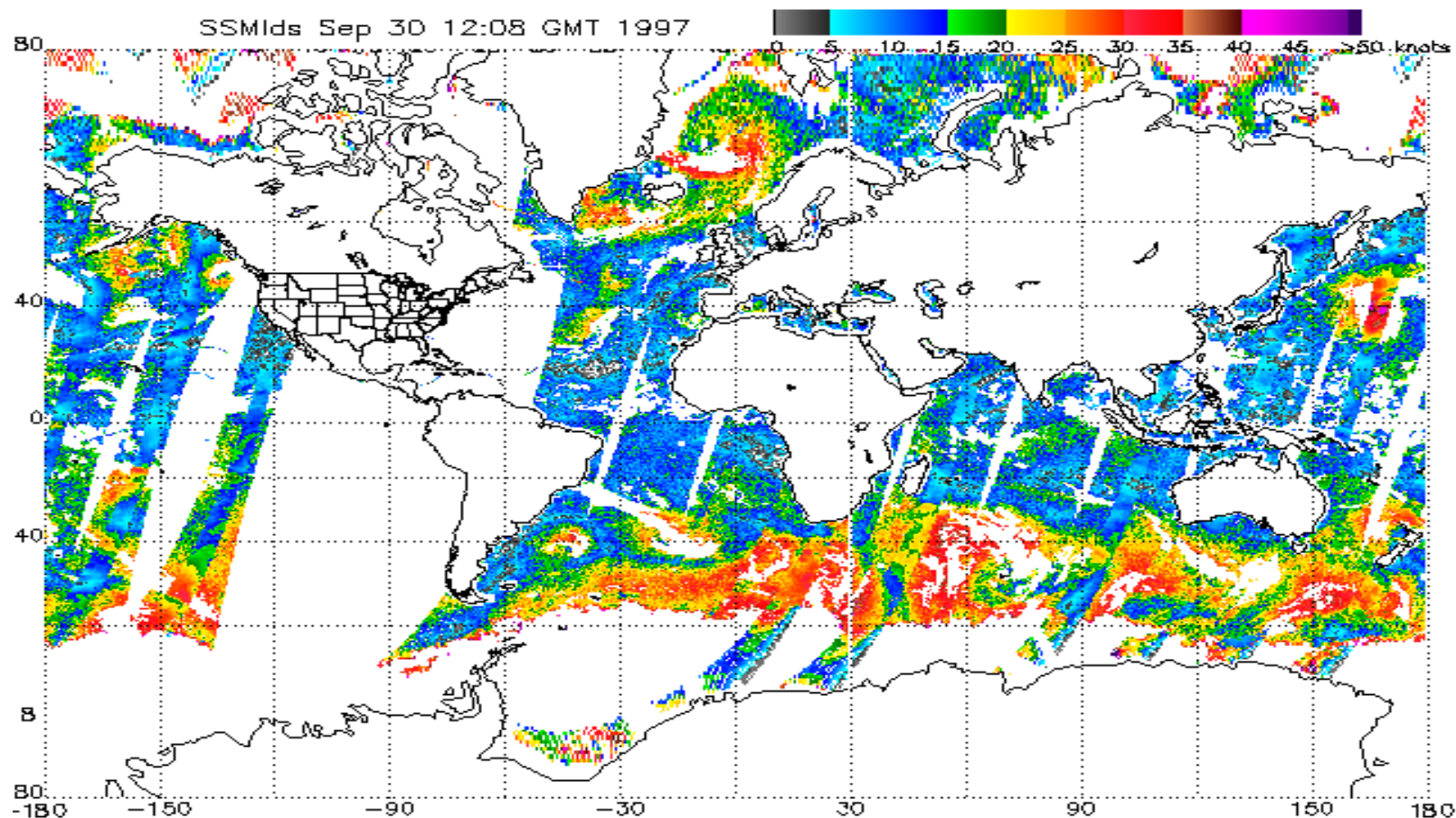


- Concentración de Vapor de Agua en la atmósfera**



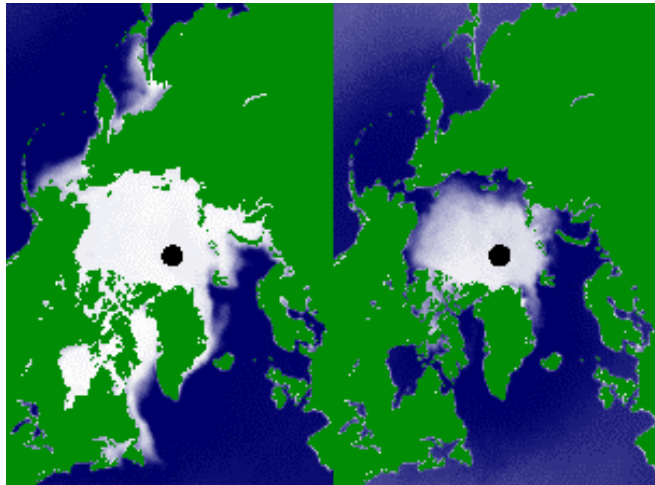
Datos (F-13): 30/9/1997, 6:06 h GMT (Procesado por NOAA)

- Estimación velocidad del viento.**

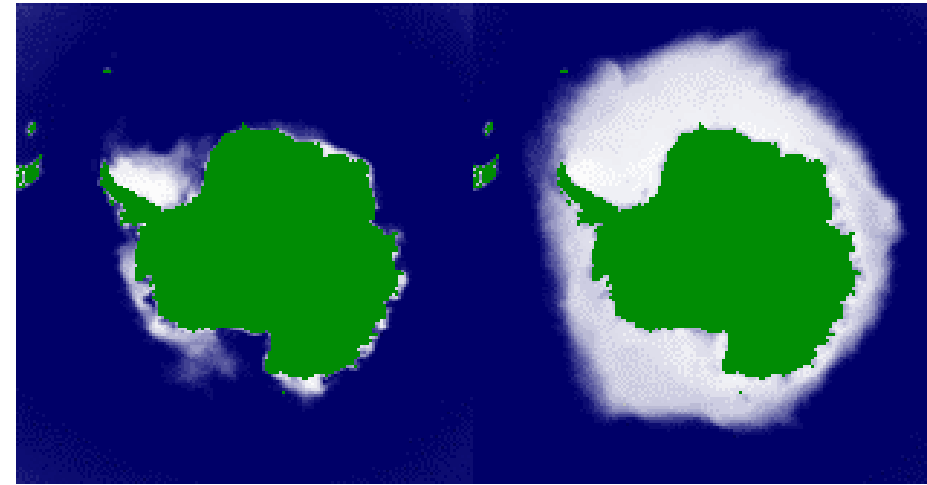


Datos (F-13): 30/9/1997, 12:08 h GMT (Procesado por NOAA)

- Variación estacional de la **cobertura de hielo** en las regiones polares

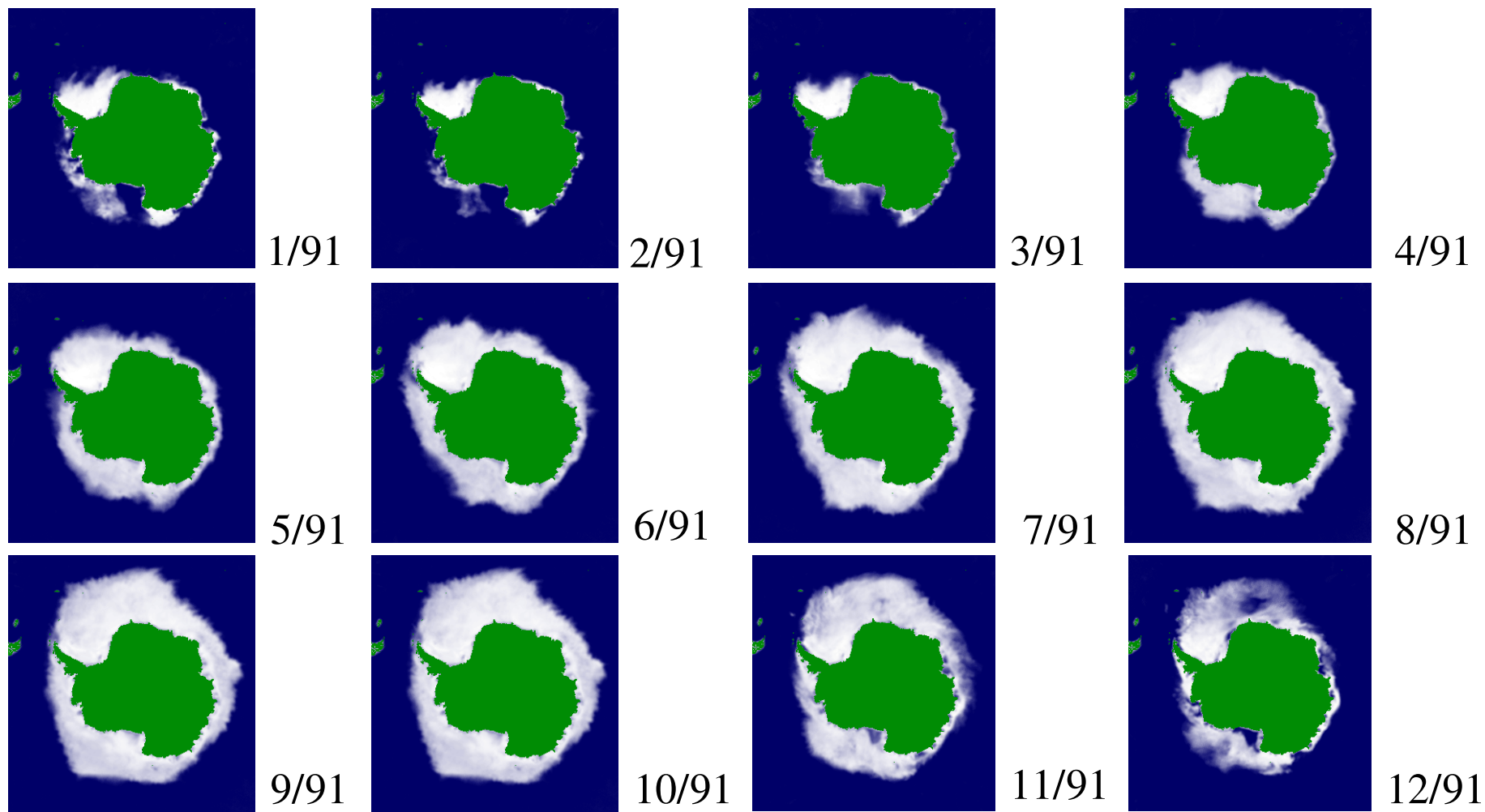


Océano Artico



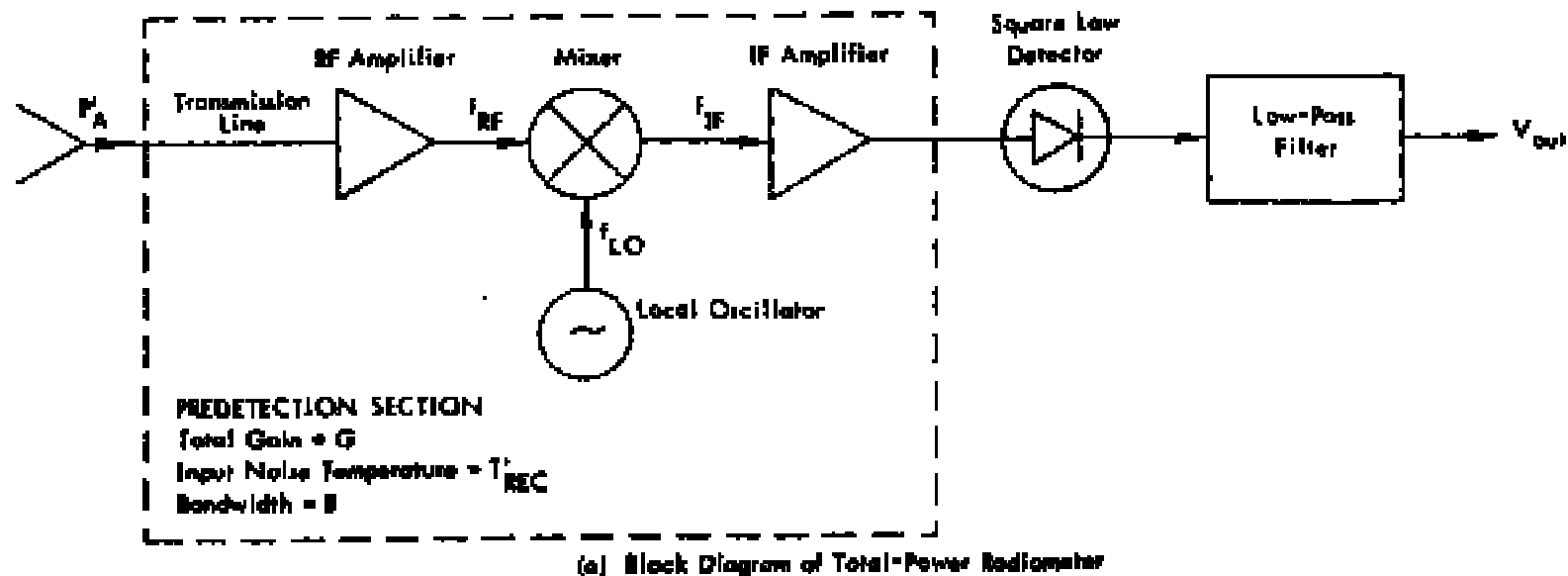
Océano Antártico

- Variación mensual de la **cobertura de hielo** en el Océano Antártico



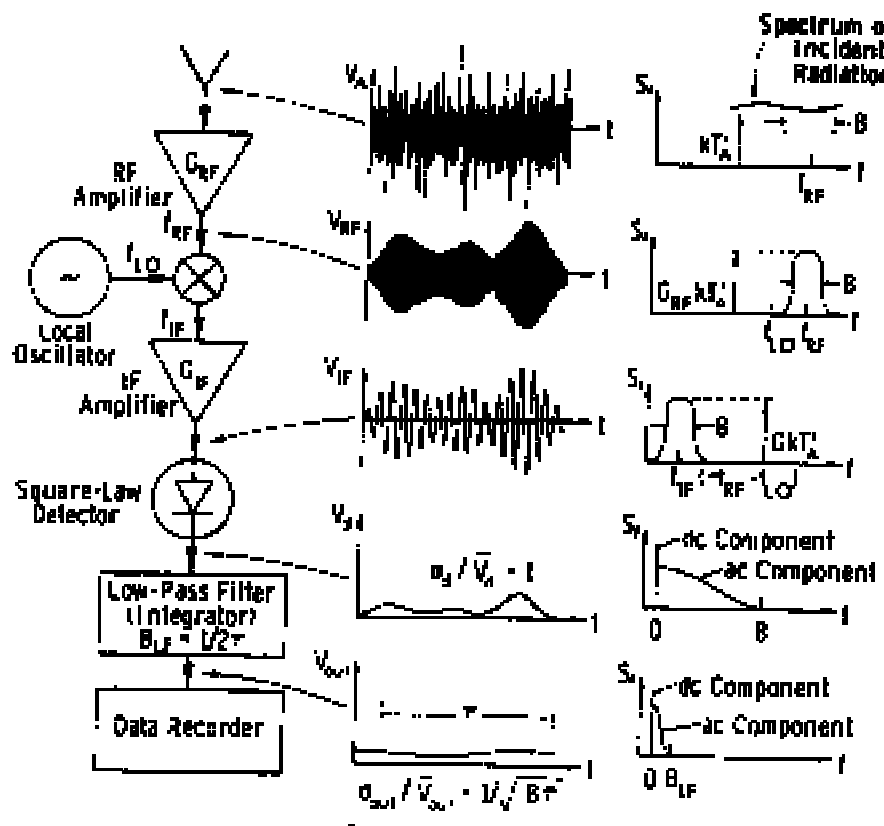
## 7.6. Radiómetros de Microondas

- Esquema básico de un **radiómetro de potencia total (TPR)**:





- Evolución de las **señales en** los diferentes puntos de un **TPR**.



Tensión a la salida del integrador:

$$V_{OUT} = C_d G k B T_{SYS} = C_d G k B (T'_A + T'_{REC})$$

Sensibilidad de un TPR:

$$\Delta T = \frac{T'_A + T'_{REC}}{\sqrt{B\tau}} = \frac{T_{sys}}{\sqrt{B\tau}}$$

G = Power gain of pre-detection section (between RF amplifier input and IF amplifier output).

S<sub>f</sub> = Power spectral density, W Hz<sup>-1</sup>

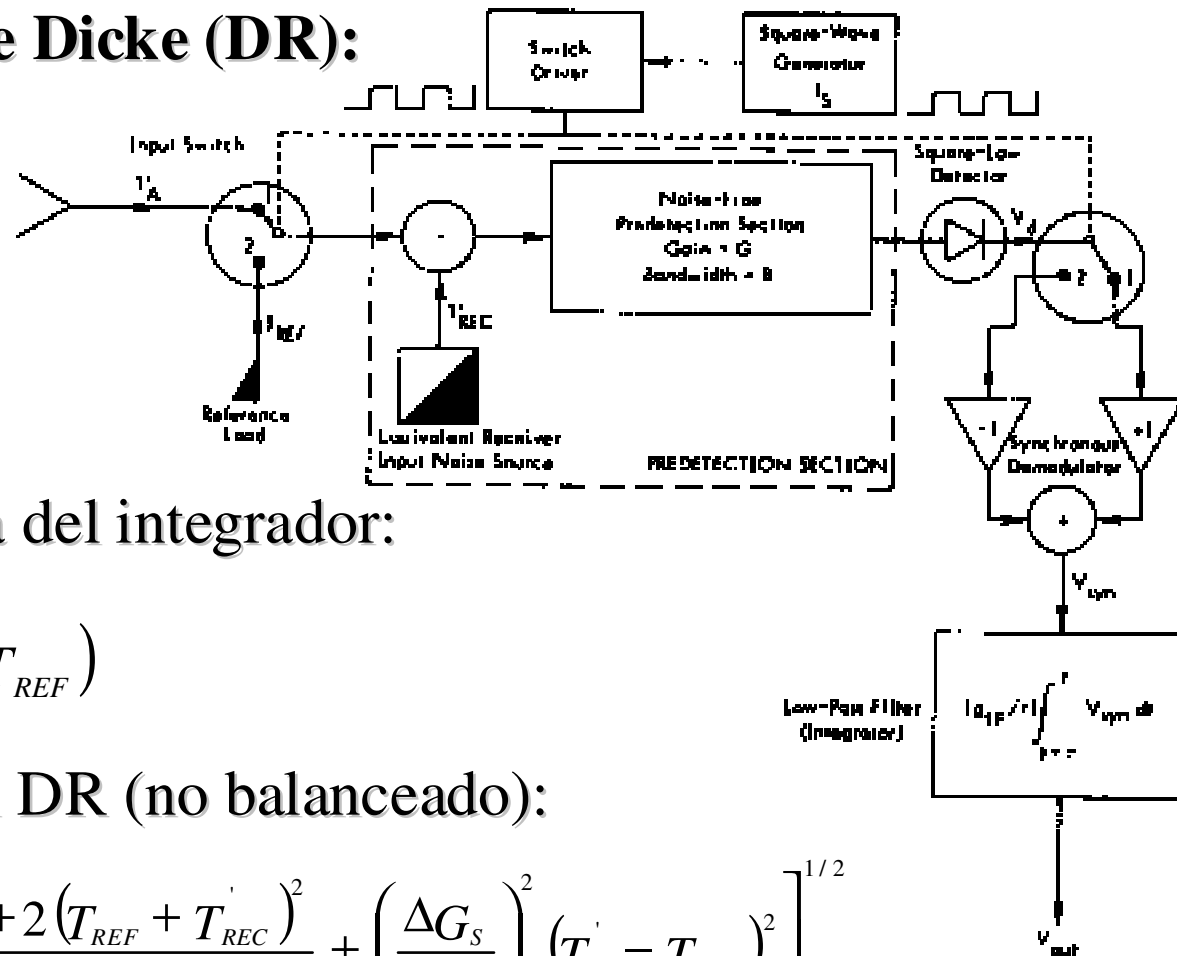
- **Limitaciones de los TPR:**

Fluctuaciones de ganancia de la cadena receptora:

- a largo plazo (derivas térmicas, envejecimiento...)  
=> calibración periódica
- rápidas (hasta unos pocos Hz): limitan la sensibilidad  
(variación de ganancia interpretada como variación de  $T_A$ )

$$\Delta T = T_{SYS} \left[ \frac{1}{B \tau} + \left( \frac{\Delta G_S}{G_S} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

• **El radiómetro de Dicke (DR):**



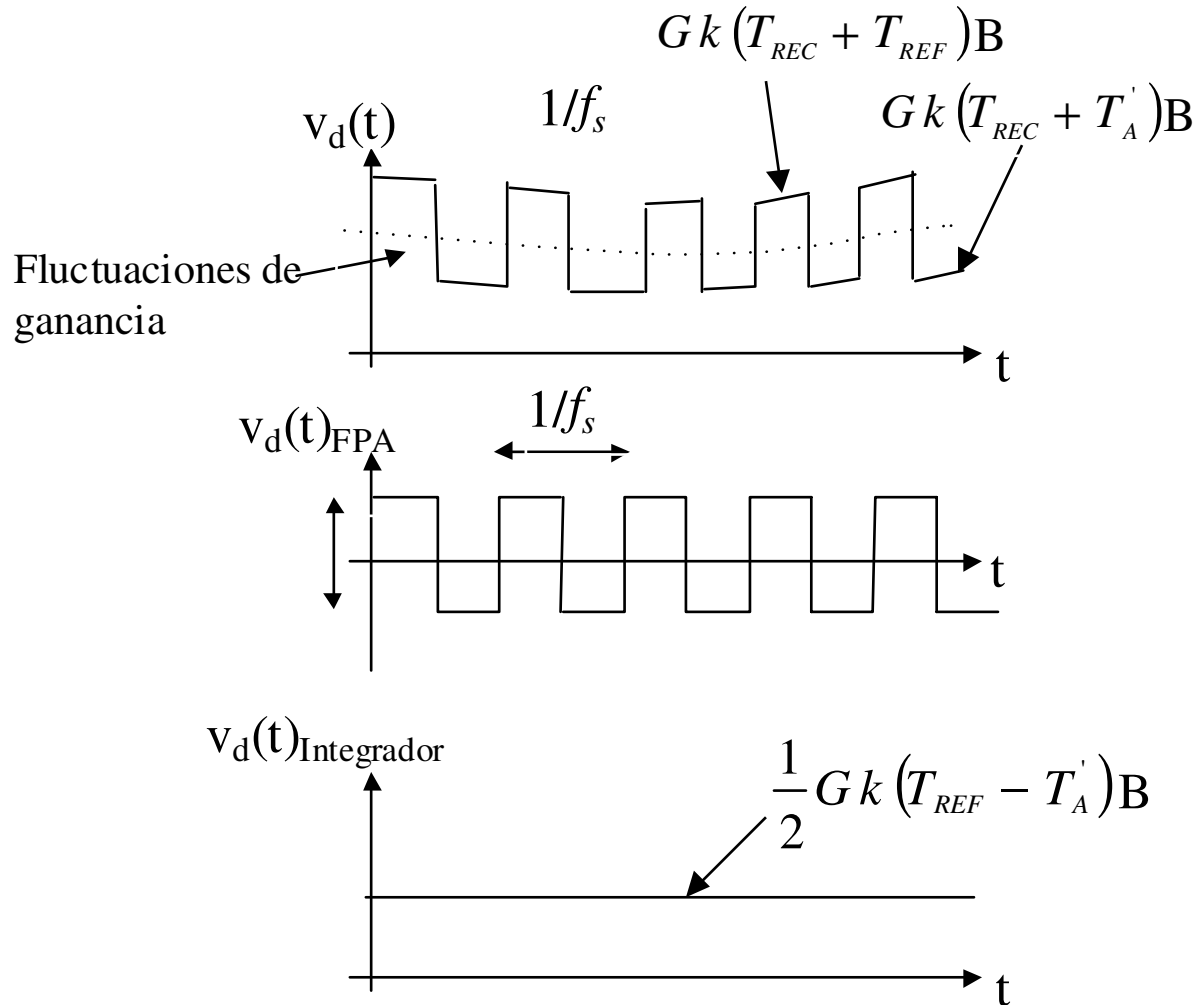
Tensión a la salida del integrador:

$$V_{OUT} = \frac{1}{2} G_s (T'_A - T_{REF})$$

Sensibilidad en un DR (no balanceado):

$$\Delta T = \left[ \frac{2(T'_A + T'_{REC})^2 + 2(T_{REF} + T'_{REC})^2}{B\tau} + \left( \frac{\Delta G_s}{G_s} \right)^2 (T'_A - T_{REF})^2 \right]^{1/2}$$

## • Funcionamiento básico del DR:



- $T_{REF} > T'_A$
- $f_s >$  Variaciones de ganancia

- $f_{tall}$  FPA  $>$  Variaciones de ganancia

- BW del amplificador de baja frecuencia limitado por el tiempo de subida de la señal ( $\tau_{sw}$ )

- $\tau_{sw} < 0.5 \% T_s$

$$\Delta T = \left[ \frac{2T_{SYS\_1}^2 + 2T_{SYS\_2}^2}{B\tau} + \dots \right]^{1/2}$$



- **Limitaciones del DR:**

Si  $T_A \neq T_{ref}$  entonces las fluctuaciones de ganancia no se compensan totalmente.

- **El radiómetro de inyección de ruido (NIR):**

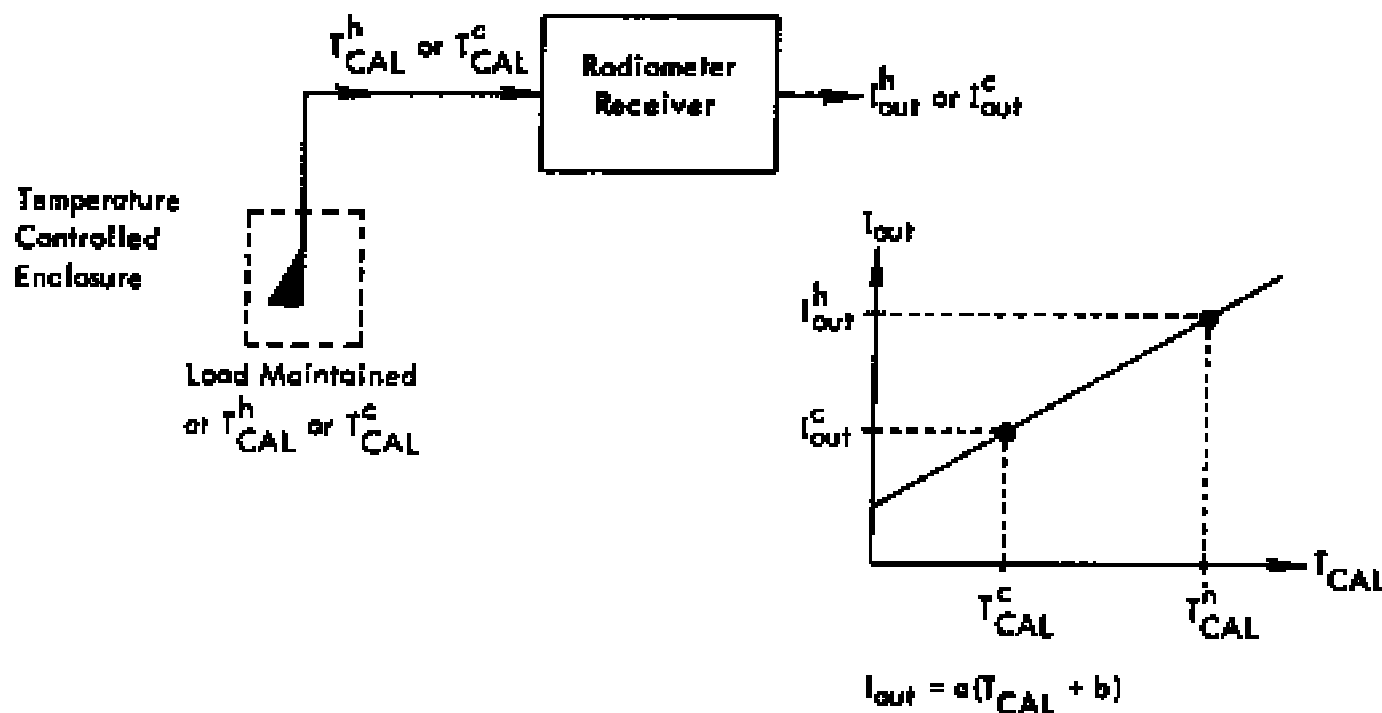
- Es básicamente un radiómetro de Dicke al cuya entrada se le suma una cierta potencia de ruido tal manera que:

$$T_A + T_I = T_{ref}$$

- La salida es siempre nula: fluctuaciones ganancia ✓  
linealidad detector de potencia ✓

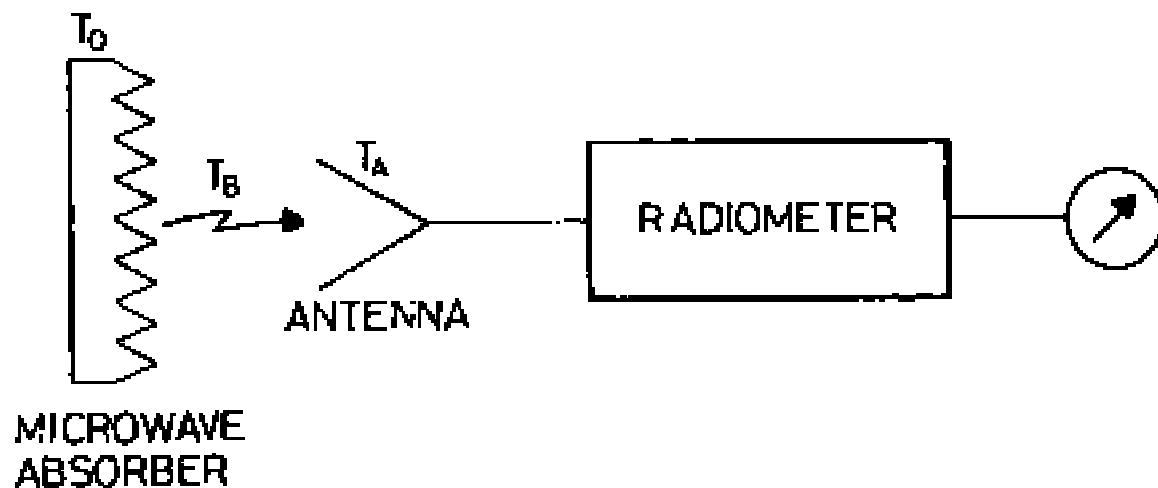
- **Calibración de los radiómetros:**

Si el detector es lineal, la calibración se realiza conociendo la respuesta del sistema a dos  $T_A$  conocidas: **cargas fría y caliente.**



Calibration of a reflection-free radiometer receiver.

## • CALIBRACIÓN: CARGA CALIENTE



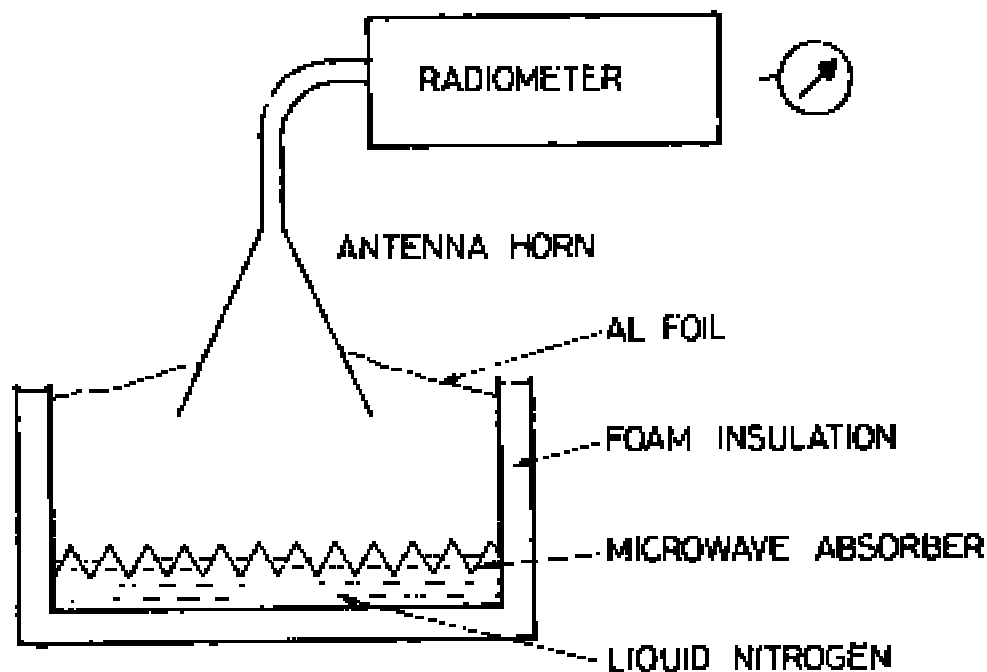
Absorbente de  $\mu\text{W}$  a temperatura ambiente



Temperatura de brillo ( $T_{HOT}=T_{amb}$ )



## • CALIBRACIÓN: CARGA FRÍA N<sub>2</sub> liq o el cielo claro



Punto de ebullición del N<sub>2</sub> (~77 K)



Temperatura de brillo ( $T_{COLD} = T_{amb} = 77 K$ )



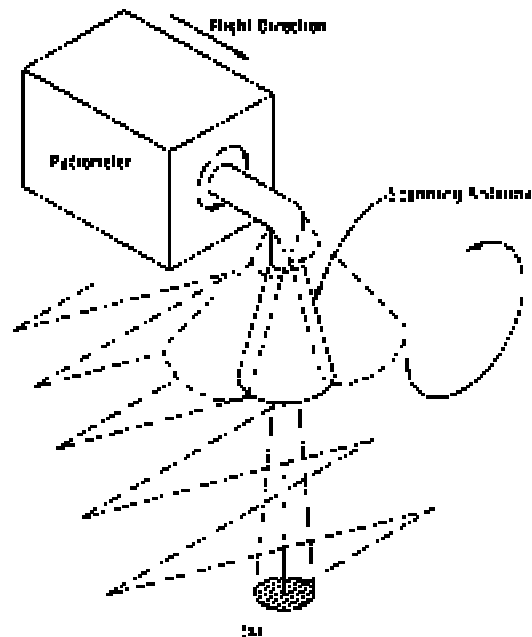
Deward con N<sub>2</sub> líquido



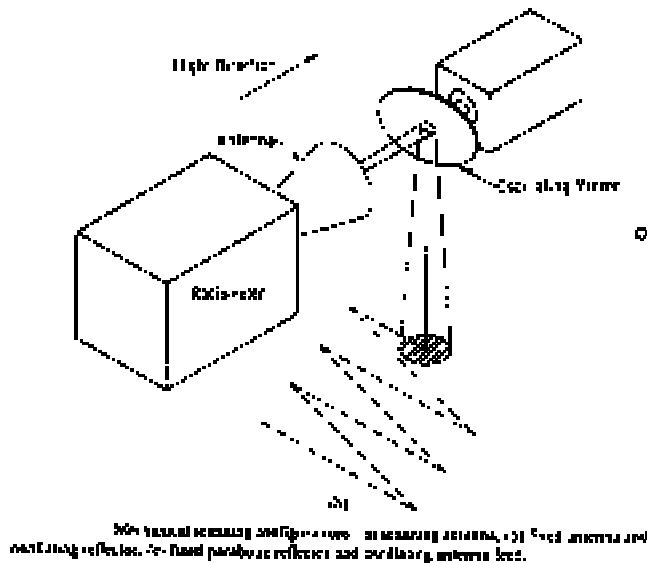
## 7.7. Formación de imágenes:

### • CONFIGURACIONES DE SCAN:

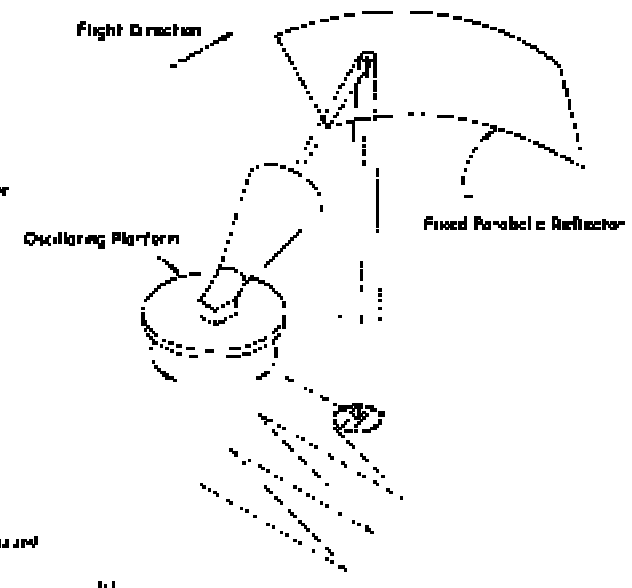
a) antena móvil,



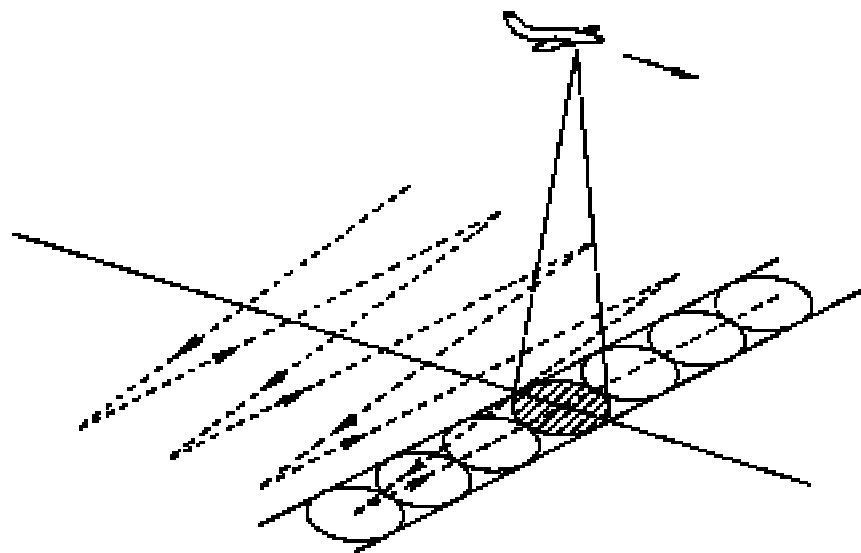
b) antena fija y espejo móvil,



c) antena oscilante y reflector fijo.



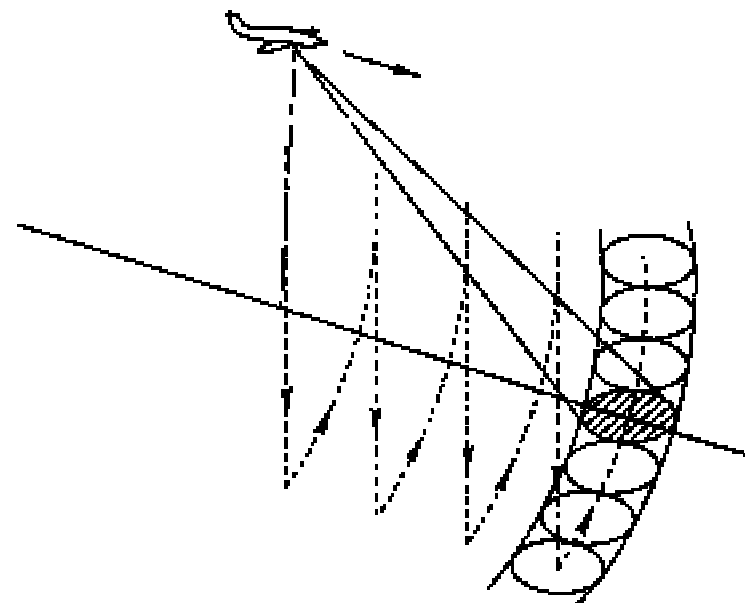
a) scan en zig-zag,



(a)

b) scan cónico.

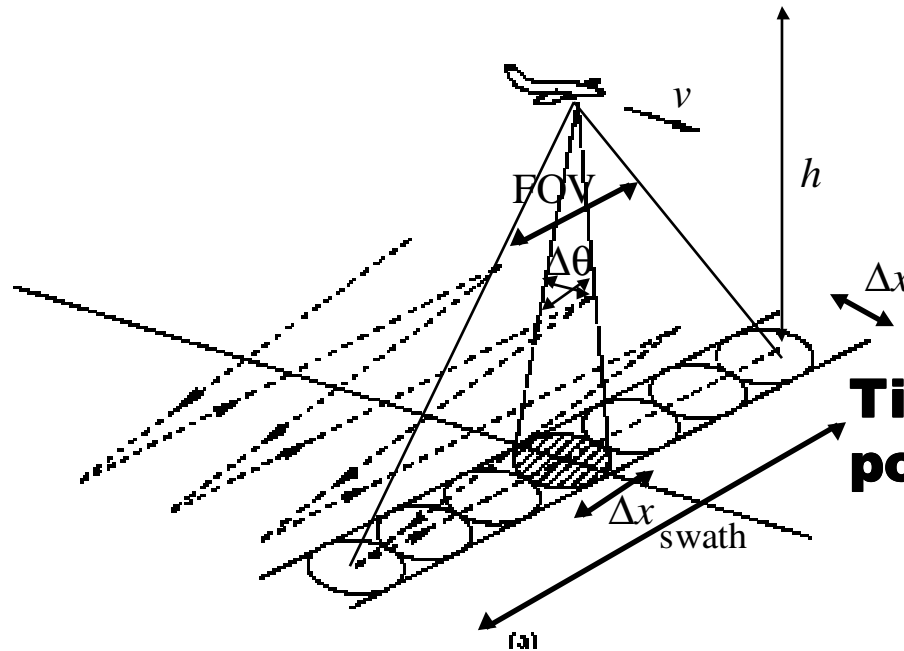
(Ventaja:  $\theta_{inc}$  sobre el suelo = cte)



(b)

Radiometric imaging by zigzag scanning: (a) cross-track scanning in the normal to the direction of flight; (b) conical scanning.

## • PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE UN RADIÓMETRO.



**Swath:** ancho del barrido en la dirección perpendicular al avance.

**Nº píxeles por swath :**

$$n = \frac{\text{FOV}}{\Delta\theta}$$

**Tiempo máximo de integración por píxel :**

$$\tau = \frac{T_{\text{swath}}}{n} = \frac{h}{v} \frac{\Delta\theta^2}{\text{FOV}}$$

**Sensibilidad radiométrica:**

$$\Delta T = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B\tau}} = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B}} \sqrt{\frac{v \text{FOV}}{h}} \frac{1}{\Delta\theta}$$

**Resolución espacial:**

$$\Delta x = h\Delta\theta$$

**Principio de incertidumbre:**

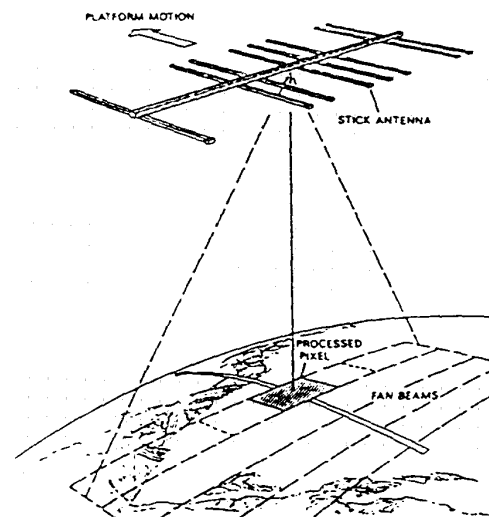
$$\Delta x \Delta T = T_{\text{sys}} \sqrt{\frac{v h \text{FOV}}{B}}$$



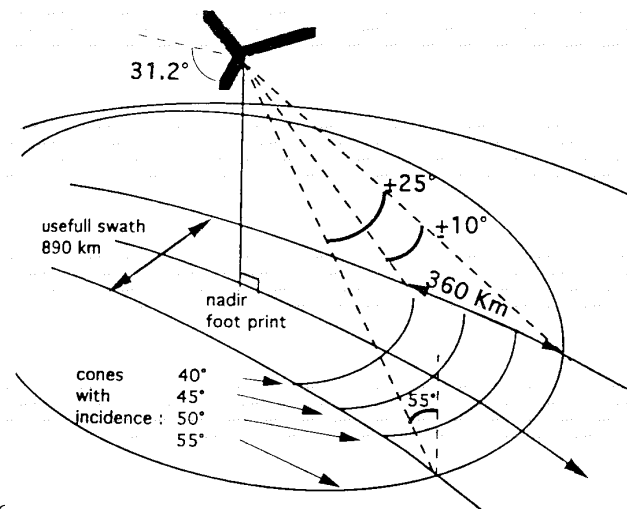
- Limitaciones de los sistemas actuales:  
**Pobre resolución espacial**, comparado con sist. activos y ópticos.  
**Antenas grandes.**
- La recuperación de parámetros importantes en el clima, como son la **humedad del suelo** (SM) y la **salinidad del mar** (OS), requieren el uso de **medidas pasivas en banda L** (1.4 GHz).
- En toda la historia de los sensores pasivos embarcados sólo el **COSMOS-243** ('68) y el **SKYLAB S-194** ('73) han llevado radiómetros en banda L.
- **Futuro:**
  - 1.- **Radiómetros de Apertura Sintética**
    - ESO - **ESTAR**: radiómetro por síntesis de apertura en 1 D (Bda. L)
    - ESA - **MIRAS**: radiómetro por síntesis de apertura en 2 D (Bda. L)
    - otras misiones en fase de estudio: @ 37 GHz, 89 GHz
    - => mapeado alta resolución del hielo oceánico y de la lluvia.
  - 2.- **Radiometría Polarimétrica**

## 7.8. Radiometría Interferométrica por Síntesis de Apertura:

VLA



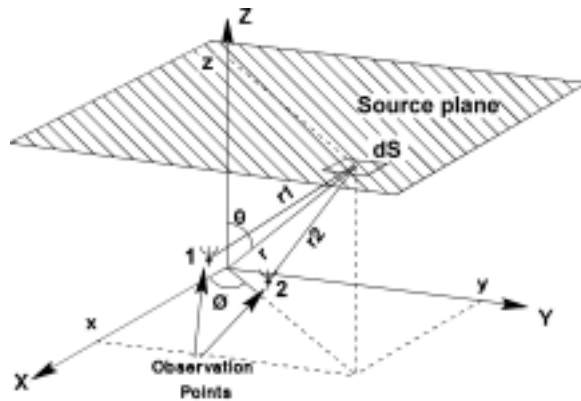
ESTAR



MIRAS

$$V(u, v) = \frac{1}{2} E[b_1(t)b_2^*(t)] = F [T_{AP}(\xi, \eta)]$$

## • PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO (i)



Línea de base:

$$(u_{kj}, v_{kj}) = (x_j - x_k, y_j - y_k) / \lambda_0$$

Cosenos directores:

$$(\xi, \eta) = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi)$$

Función de fringe-wash:

$$\tilde{r}_{kj}(\tau) = \frac{e^{-j^2 \pi f_0 \tau}}{\sqrt{B_k B_j}} \int_0^\infty H_{nk}(f) H_{nj}^*(f) e^{j^2 \pi f \tau} df$$

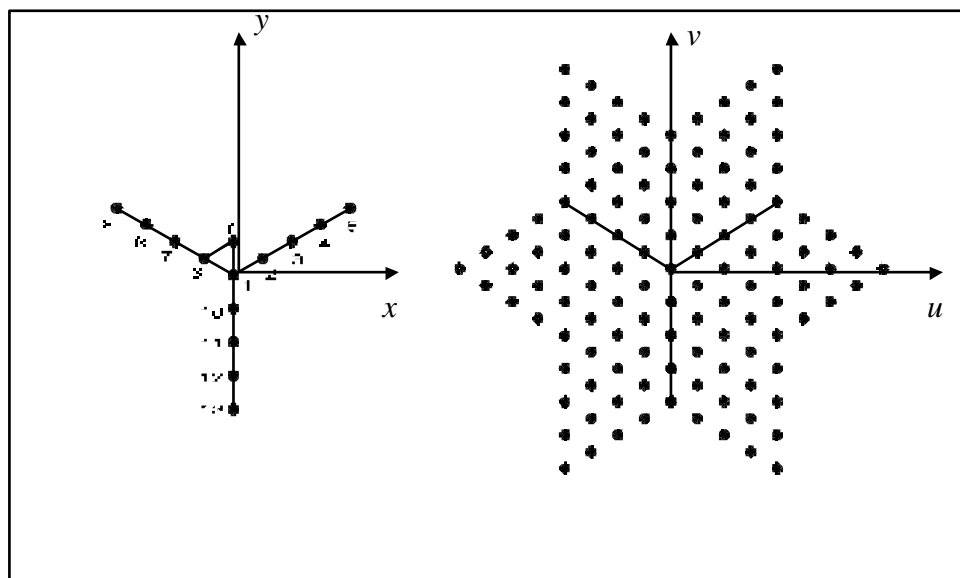
**Función de visibilidad:**

$$V_{kj} = V(u_{kj}, v_{kj}) \stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{k_B \sqrt{B_k B_j} \sqrt{G_k G_j}} \cdot \frac{1}{2} \langle b_k(t) b_j^*(t) \rangle =$$

$$\stackrel{\Delta}{=} \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_j}} \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{nk}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta) \tilde{r}_{kj} \left( -\frac{u_{kj} \xi + v_{kj} \eta}{f_0} \right) e^{-j^2 \pi (u_{kj} \xi + v_{kj} \eta)} d\xi d\eta$$

## • PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO (ii)

Las agrupaciones óptimas de antenas tienen forma de Y.



Agrupación de antenas    Puntos de muestreo en plano  $(u,v)$

Caso **ideal**:  $F_n = F_{nk} = F_{nj}$

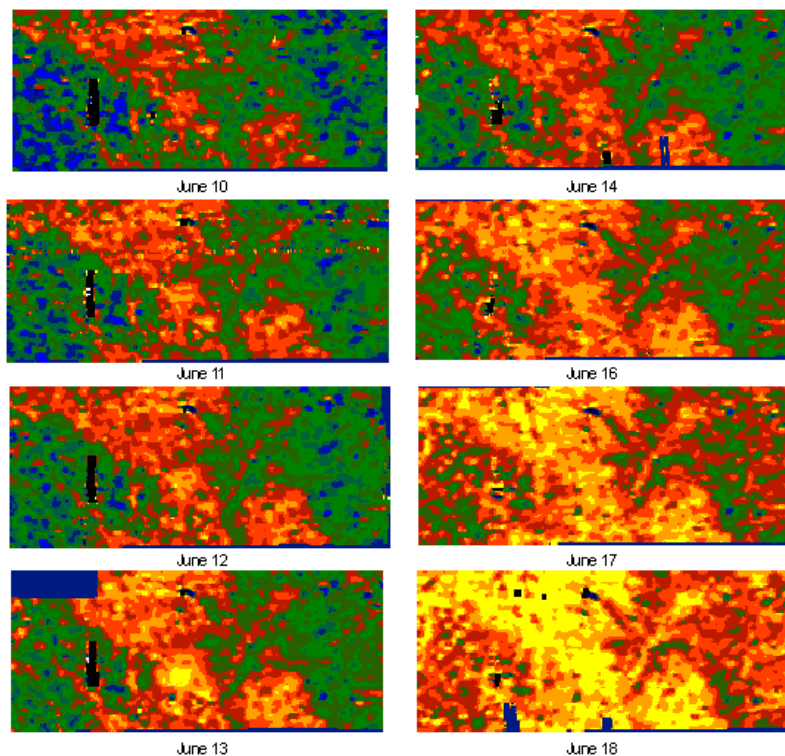
$$\tilde{r}_{kj} = 1$$

La función de visibilidad es la transformada de Fourier en el punto  $(u,v)$  de la temperatura aparente de brillo.

$$V(u, v) = F[T(\xi, \eta)]$$

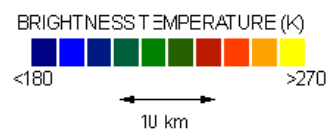
$$T(\xi, \eta) = \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \frac{|F_n(\xi, \eta)|^2}{\Omega}$$

## • Electronically Steered Thinned Array Radiometer (i)



The eight ESTAR data sets are shown, collected in June 1994. The ESTAR instrument is a L-band passive microwave radiometer developed as an aircraft prototype for a satellite based synthetic aperture radiometer to measure soil moisture .

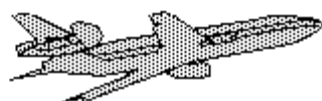
(<http://hydrolab.arsusda.gov/RSatBARC/smestar.html>)





## • Electronically Steered Thinned Array Radiometer (ii)

A model to compute soil moisture was developed using the ESTAR (Electronically Steered Thinned Array Radiometer) microwave radiometer. The radiometer is able to sense changes in the temperature of the soil (Brightness Temperature, or TB). Data were collected for eight days during **June 1992** over the **Little Washita Watershed, Oklahoma**.



$$\epsilon_{obs} = TB / T_s$$



$$\epsilon_{sur} = 1 + (\epsilon_{obs} - 1) \exp(2bWV_v)$$



$$\epsilon_{soil} = 1 + (\epsilon_{sur} - 1) \exp(h)$$

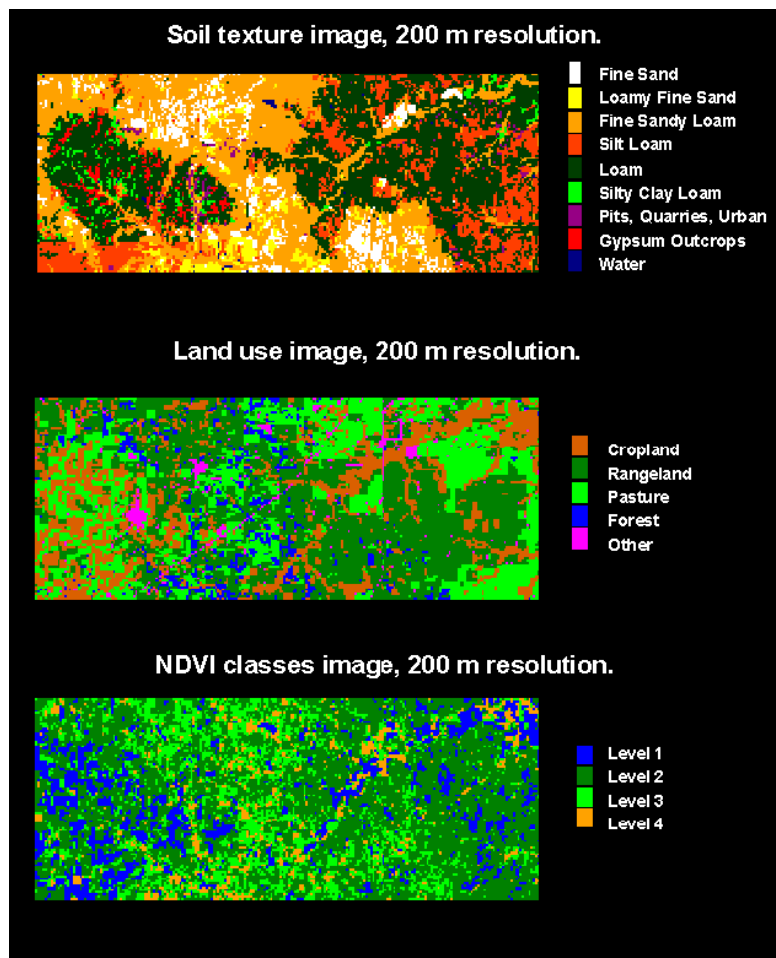
$$k = \left( \frac{(1 - \epsilon_{soil})^{0.5} - 1}{(1 - \epsilon_{soil})^{0.5} + 1} \right)^2$$

Soil Moisture = f(k, soil texture)

### Soil Moisture Algorithm

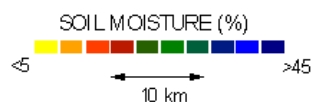
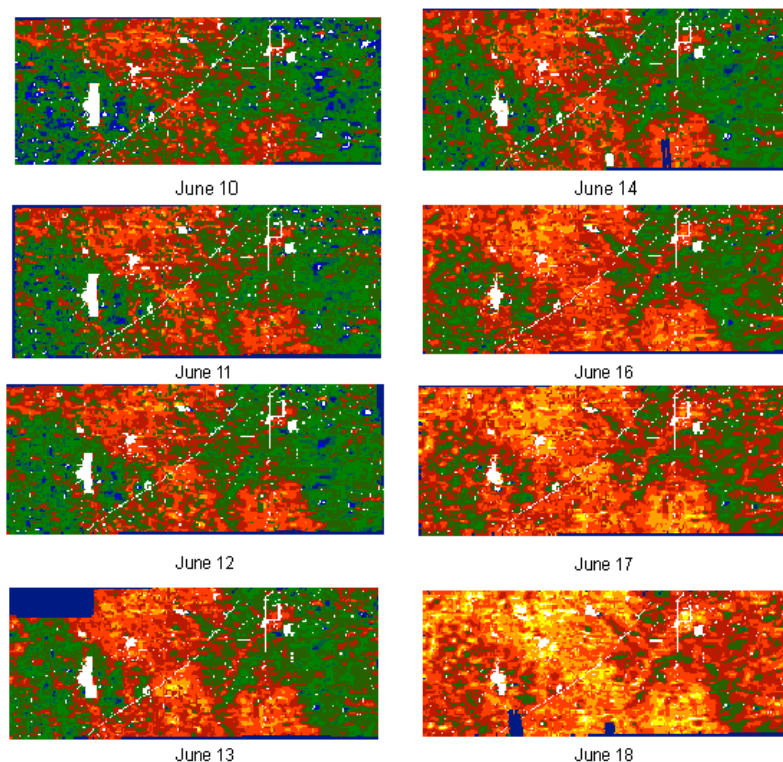
- \* Normalize TB using deep soil temperature
  - \* Remove vegetation effects using estimate of vegetation water content (Wv) derived from land use and NDVI
  - \* Remove surface roughness effects using estimate of rms height (h) - minor effect
  - \* Compute soil dielectric constant (k)
- (<http://hydrolab.arsusda.gov/RSatBARC/soilmoisture.html>)

## • Electronically Steered Thinned Array Radiometer (iii)



Parámetros del modelo

- **Electronically Steered Thinned Array Radiometer (iv)**



## Soil Moisture Model Results

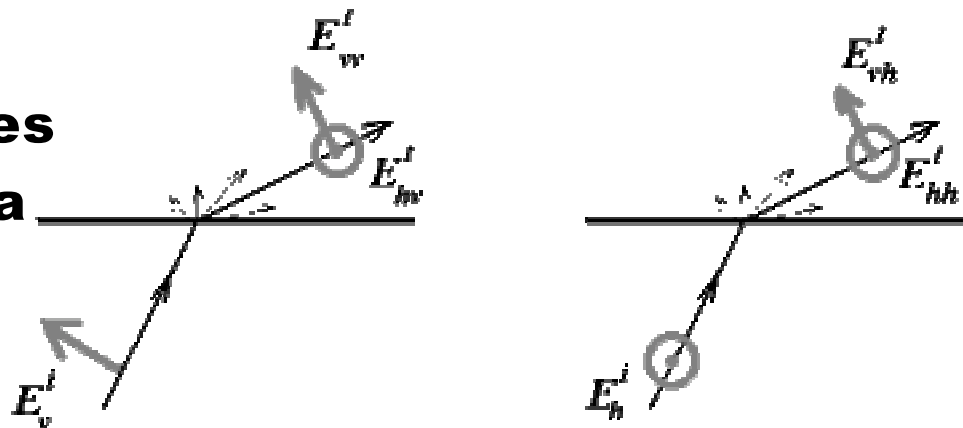
The eight days of computed soil moisture are shown below. The drying of the soil is apparent from the progression over time.

The white and blue pixels indicate either areas of RFI or where there was no soil texture data available, (ie, roads, forests or lakes).

(<http://hydrolab.arsusda.gov/RSatBARC/smresults.html>)

## 7.9. Radiometría Polarimétrica (i):

La **rugosidad** de las **superficies** provoca una **polarización de la radiación térmica**.



$$T_v \propto \frac{1}{\eta} \mathbb{E}[E_v E_v^*]$$

$$T_h \propto \frac{1}{\eta} \mathbb{E}[E_h E_h^*]$$

$$U \propto \frac{2}{\eta} \Re\{\mathbb{E}[E_v E_h^*]\}$$

$$V \propto \frac{2}{\eta} \Im\{\mathbb{E}[E_v E_h^*]\}$$

La medida de los **cuatro parámetros de Stokes**, da información de la rugosidad y orientación.

Aplicación a la medida de la **intensidad y dirección** del viento sobre el mar ...

## • Radiometría Polarimétrica: APLICACIONES (ii)

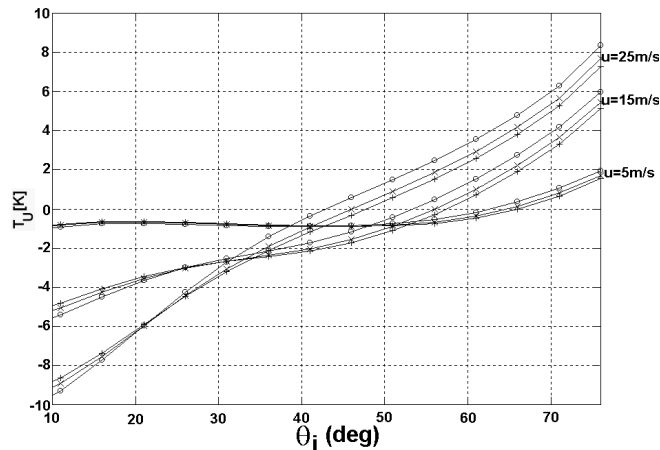
### Determinación de la dirección y de la intensidad del viento sobre el mar:

$$\gamma_{pmnq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) = \frac{1}{\cos \theta_i} \frac{k^2 q^2 U_{mm} U_{pq}^*}{2 q_z^4 g_x g_y} \exp \left[ -\frac{1}{2 q_z^2} \left( \frac{q_x^2}{g_x^2} + \frac{q_y^2}{g_y^2} \right) \right]$$

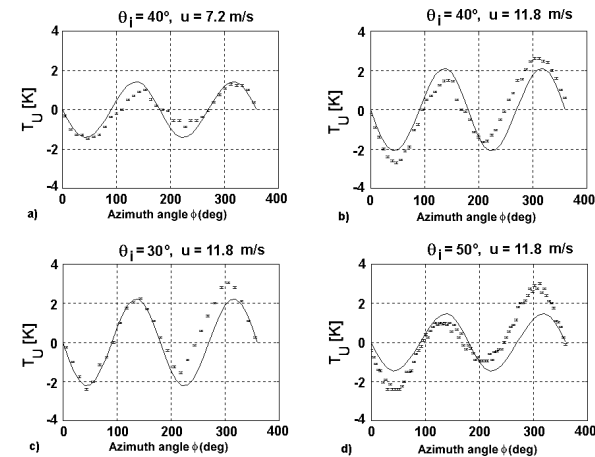
$$e_v^h(\theta_s, \phi_s) = 1 - \frac{1}{4\pi \cos \theta_s} \int \int \cos \theta_i \left[ \gamma_{vvvv}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \gamma_{hhvv}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) \right] d\Omega_i$$

$$e_v^v(\theta_s, \phi_s) = -\frac{1}{4\pi \cos \theta_s} \int \int \cos \theta_i 2 \Re \left[ \gamma_{vhhh}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \gamma_{vvhv}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) \right] d\Omega_i$$

$$T_U(\theta, \phi) = T_{U0}(\theta) \sin(2\phi)$$



Maximum amplitude of the third Stokes parameter ( $\phi = -45^\circ$ ) vs. incidence angle at (+) 19 GHz, (x) 37 GHz, and (o) 89 GHz, and wind speed  $u = 5$  m/s, 15 m/s and 25 m/s at 12.5 m,  $S = 33\%$ ,  $T_s = 25^\circ\text{C}$ .



Comparison of numerical results with Yueh et al. 95 experimental measurements.

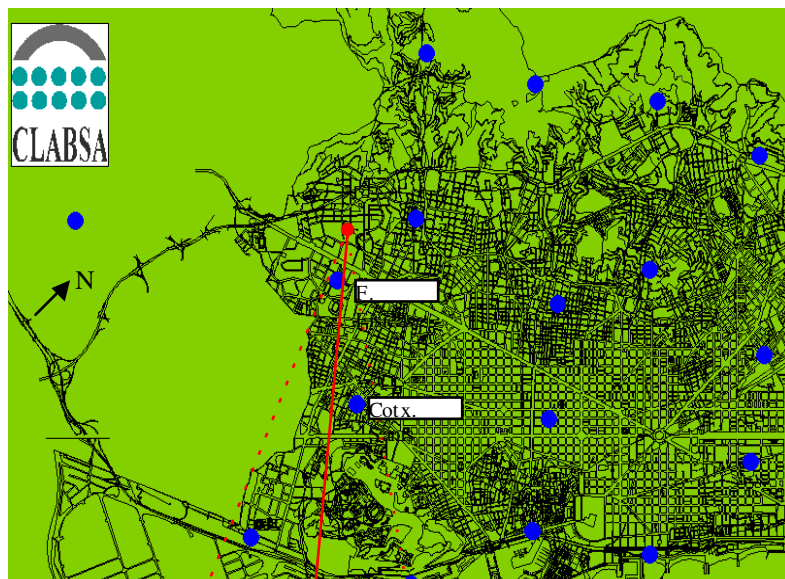
Frequency = 19.35 GHz, wind speed ( $u$ ) at 5 m,  $S = 33\%$ ,  $T_s = 25^\circ\text{C}$ .

Fourier coefficients of measured data: a)  $T_{U1} = -0.4\text{K}$ ,  $T_{U2} = -1.1\text{K}$ ,

b)  $T_{U1} = -1.0\text{K}$ ,  $T_{U2} = -2.0\text{K}$ , c)  $T_{U1} = -0.7\text{K}$ ,  $T_{U2} = -2.0\text{K}$ , d)  $T_{U1} = -1.1\text{K}$ ,  $T_{U2} = -1.8\text{K}$

## • Radiometría Polarimétrica: APLICACIONES (iii)

Determinación de la intensidad de lluvia y ... (actualmente en investigación)



- PR
- Estaciones meteorológicas de Barcelona
- Dirección haz principal
- ⋯ Ancho de haz de antena

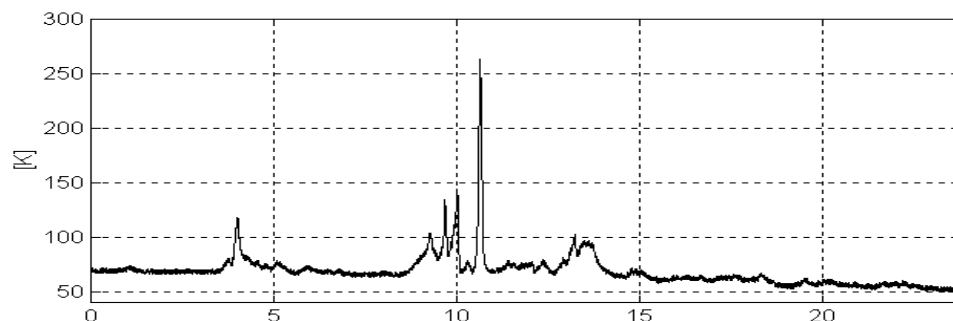
*Localización geográfica del radiómetro polarimétrico de la UPC y de las estaciones meteorológicas de Barcelona*



*UPC polarimetric radiometer at the D3 antennas-microwaves-radar laboratory.*

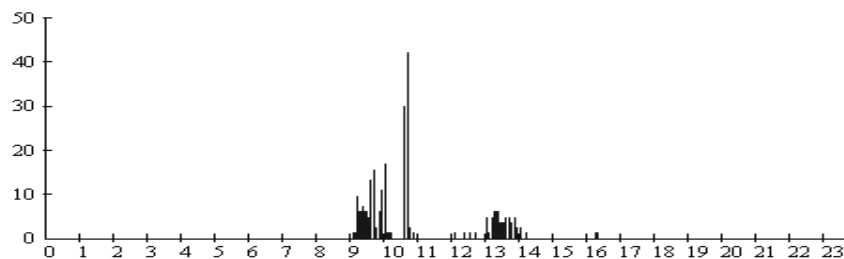
## • Radiometría Polarimétrica: APLICACIONES (iv)

$T_h$  [K]



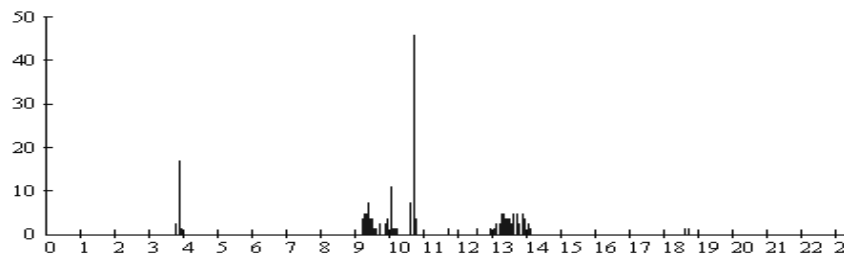
Intensitat 5-minutal (mm/h). 02-08-1998

Intensidad de lluvia [mm/h]



Intensitat 5-minutal (mm/h). 02-08-1998

Intensidad de lluvia [mm/h]



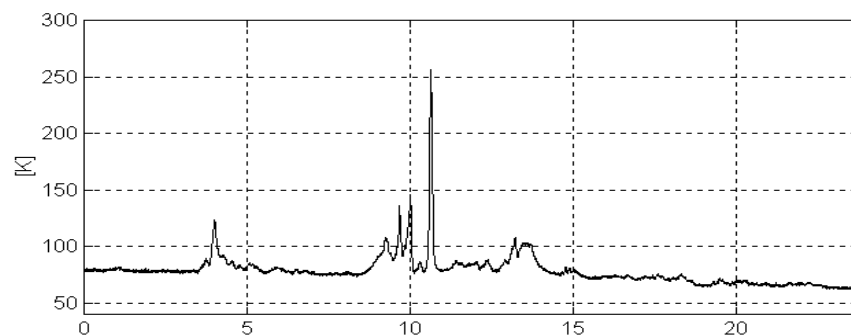
Temps [hores]

Facultad de Físicas

Cotxeres de Sants

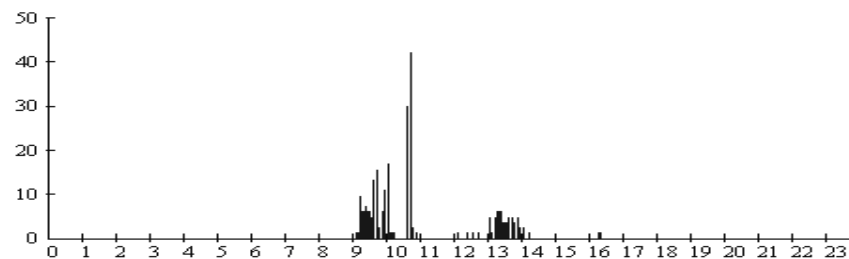
## • Radiometría Polarimétrica: APLICACIONES (v)

$T_v$  [K]



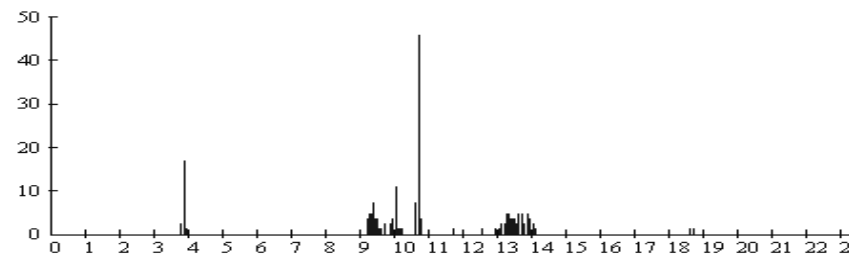
Intensitat 5-minutal (mm/h). 02-08-1998

Intensidad de lluvia [mm/h]



Intensitat 5-minutal (mm/h). 02-08-1998

Intensidad de lluvia [mm/h]



Temps [hores]

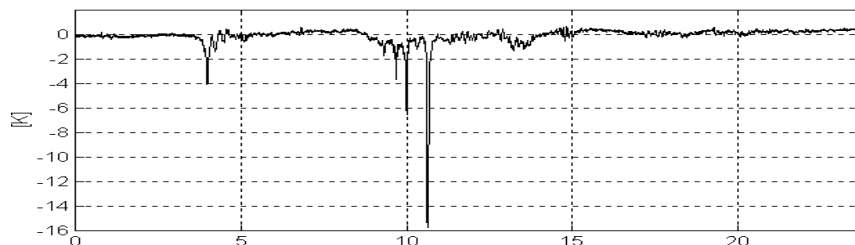
Facultad de Físicas

Cotxeres de Sants

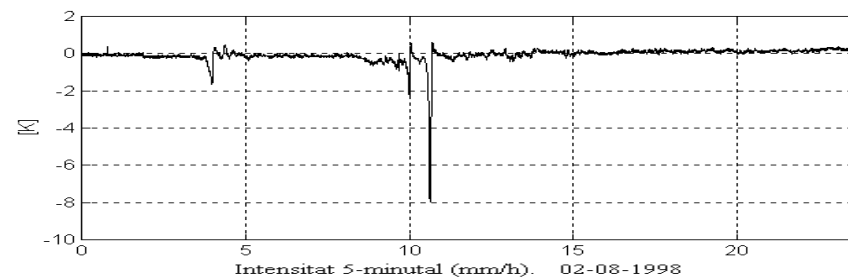


## • Radiometría Polarimétrica: APLICACIONES (vi)

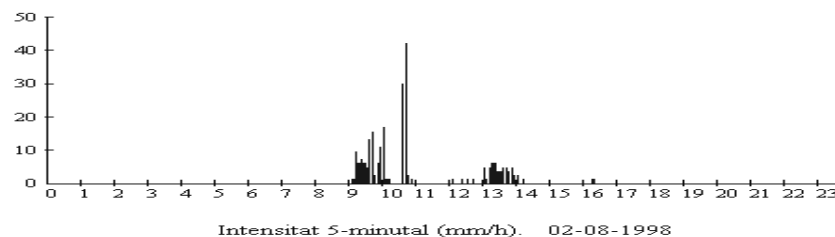
$T_U$  [K]



$T_V$  [K]

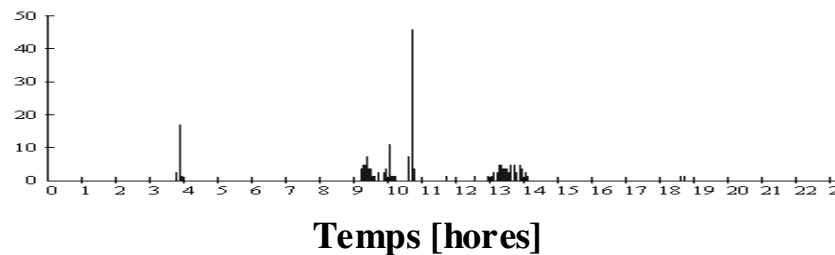


Intensidad de lluvia [mm/h]



Facultad de Físicas

Intensidad de lluvia [mm/h]



Cotxeres de Sants



- **Solicitud, adquisición y procesado de datos reales:**
  - **Satellite Active Archive (SAA):** <http://www.saa.noaa.gov/data-available.html>
    - AVHRR Level 1B
    - TOVS Level 1B
    - DMSF: SSM/T1 Level 1B
    - SSM/T2 Level 1B
    - SSM/I SDR
    - SSM/I EDR
    - SSM/I TDR
  - NOAA-K Level 1B ( AVHRR & TOVS ) - 1998
  - **SSM/I Daily Channels:** [http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/ora/ht/HTML/microwave\\_daily.html](http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/ora/ht/HTML/microwave_daily.html)
    - Mapas de temperaturas de brillo.
  - **SSM/I 1.0 deg microwave products:**
    - [http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/ora/ht/HTML/microwave\\_1.0deg.html](http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/ora/ht/HTML/microwave_1.0deg.html)
    - Rainfall, rain frequency, cloud liquid water, cloudiness frequency, total precipitable water, snow cover, sea-ice, ocean surface wind speed...
  - **Productos combinados SSM/I/ERS-2/AMI...**
    - [http://manati.wwb.noaa.gov/doc/mpc\\_stuff.html#mpc\\_files](http://manati.wwb.noaa.gov/doc/mpc_stuff.html#mpc_files)
    - Wind speed, rainrates, water content...
  - **Remote Sensing Systems:** <http://www.sssmi.com>
    - datos SSM/I y productos recuperados: surface wind speed, columnar water vapor, cloud liquid water, precipitation rate ...