

# LUCES Y SOMBRAS DE LA INTERFEROMETRÍA RADAR

G. Luzi

Geomatics Research Unit  
gluzi@cttc.es

CTTC Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya  
*Avinguda Carl Friedrich Gauss, 7  
08860 Castelldefels, Barcelona*

**Grupo SAR AET, 7 de marzo 2023**



# ONDAS , RADAR Y INTERFEROMETRÍA

**INSAR: DEM**

**DINSAR : DEFORMATION**

**EJEMPLOS**

**..... Y ALGO MAS**

# LA SEÑAL RADAR: UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Los parámetros que caracterizan una onda electromagnética:

Frecuencia* /Periodo	f	T=1/f
Longitud de onda	$\lambda$	( $\kappa=2\pi/\lambda$ )
Velocidad de propagación	c	

La señal recibida por un radar varia con el tiempo (t) y la posición (z)  
¿Qué medimos en cada pixel de una imagen radar?

**Amplitude** y la **Phase**  $\phi=\omega t-kz$

... y polarización cuando disponible

Onda plana:

$$E(z,t) = E_0(z) \exp[-j(\omega t - kz)]$$

La propagación de dos o mas ondas está regulada por dos mecanismos típico de las ondas:

**Difracción:**  $\Delta\theta > \lambda/\Delta$

**Interferencia:**

$\Delta\phi \Leftrightarrow \Delta\lambda$

\*El Radar cubre normalmente una “banda” de frecuencia e.g. La “C” cubre de 4 a 8 GHz

# CONTENIDO DE UNA IMAGEN RADAR SAR

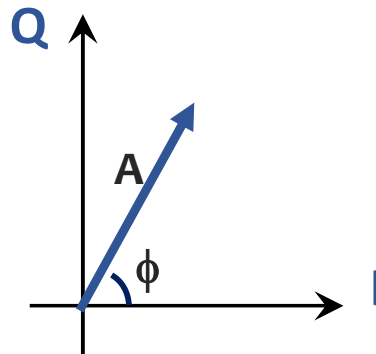


Antena Transmisora  
Antena Receptora

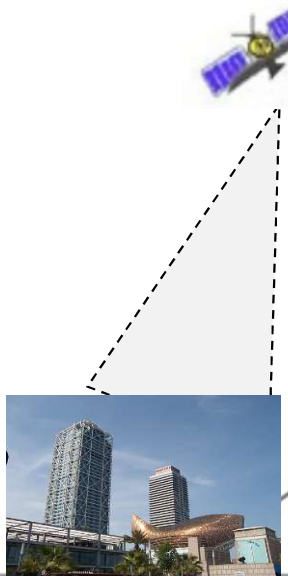
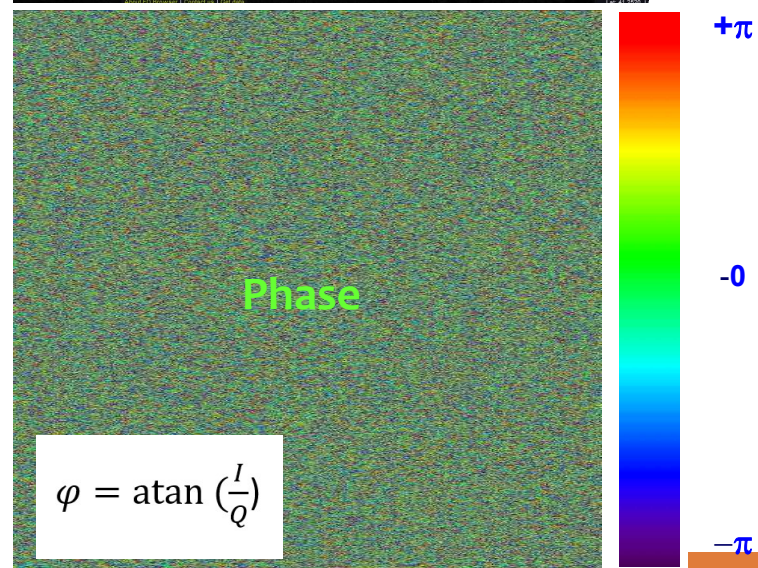
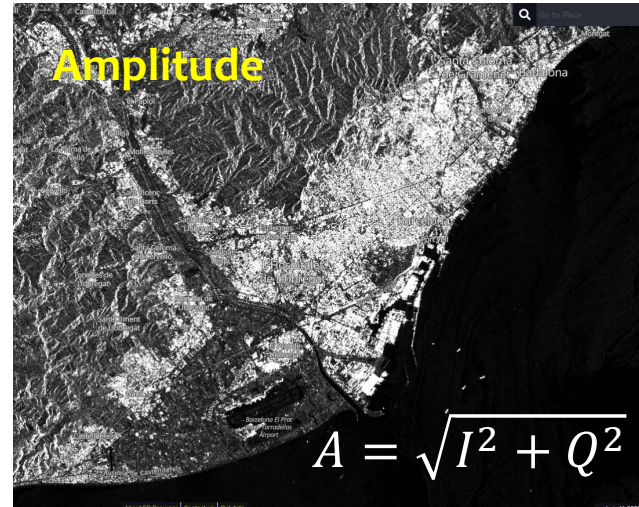


Target

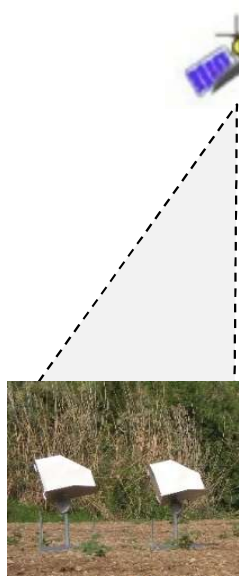
Un pixel de una imagen SAR asocia a una posición (i,j) un numero complejo



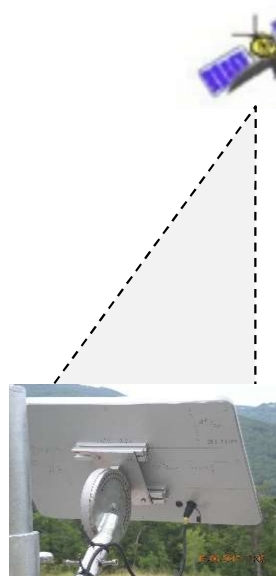
Buenos reflectors:



Naturales

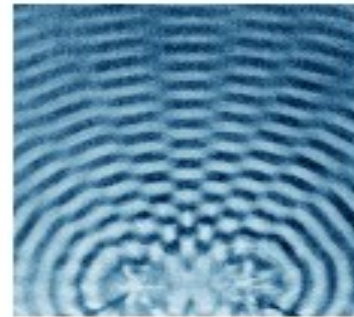
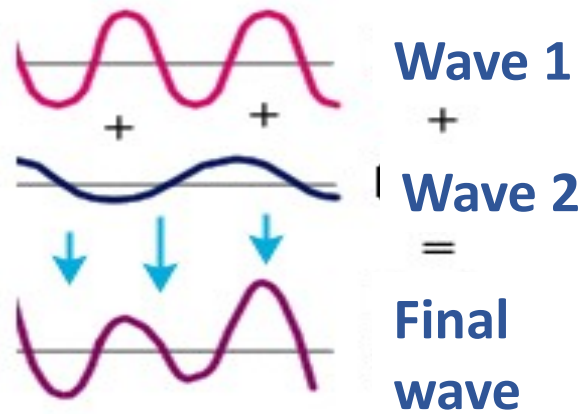


Artificiales

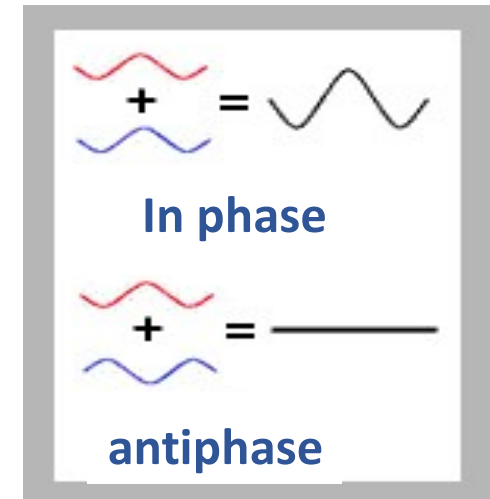




# INTERFERENCIA



Effect of two source of waves on the water surface



Dos ondas que coinciden en fase resultan en alta intensidad, mientras que dos ondas en oposición de fase se cancelan

La interferometría mide la diferencia de trayectoria entre dos ondas con una precisión de fracción de la longitud de onda de la onda, midiendo la fase diferencial \*

Para realizar la interferometría las ondas deben tener una fase estable es decir una señal “coherente”

\* En el caso de la interferometría multiplicativa aplicable en radar

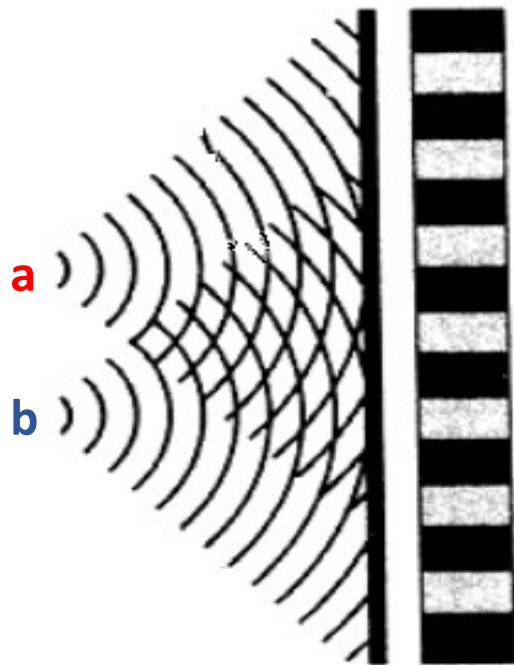
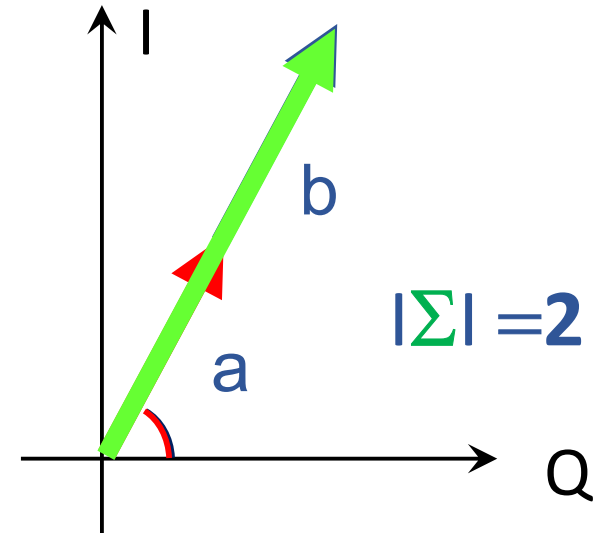
# USANDO LOS VECTORES

$$|a|=|b|=1$$

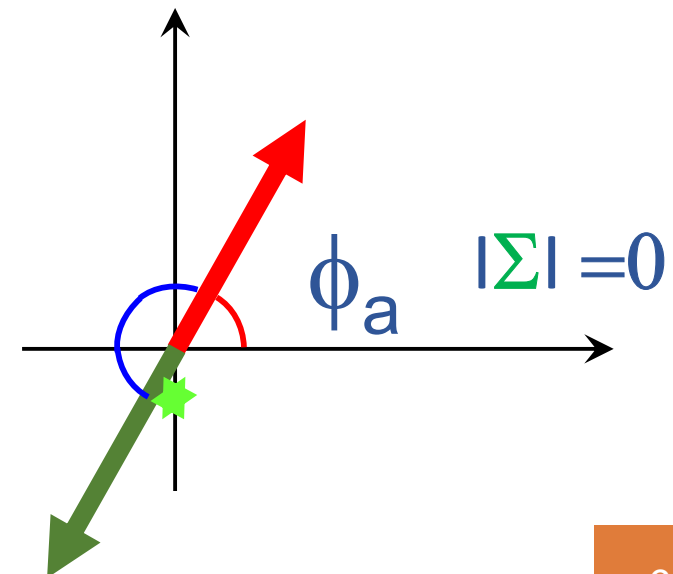
$$\phi_a = \phi_b$$

Interferencia constructiva: alta intensidad,  
destruktiva: cero

Las franjas, en el tiempo o en el espacio, se alternan cada  $\pi$

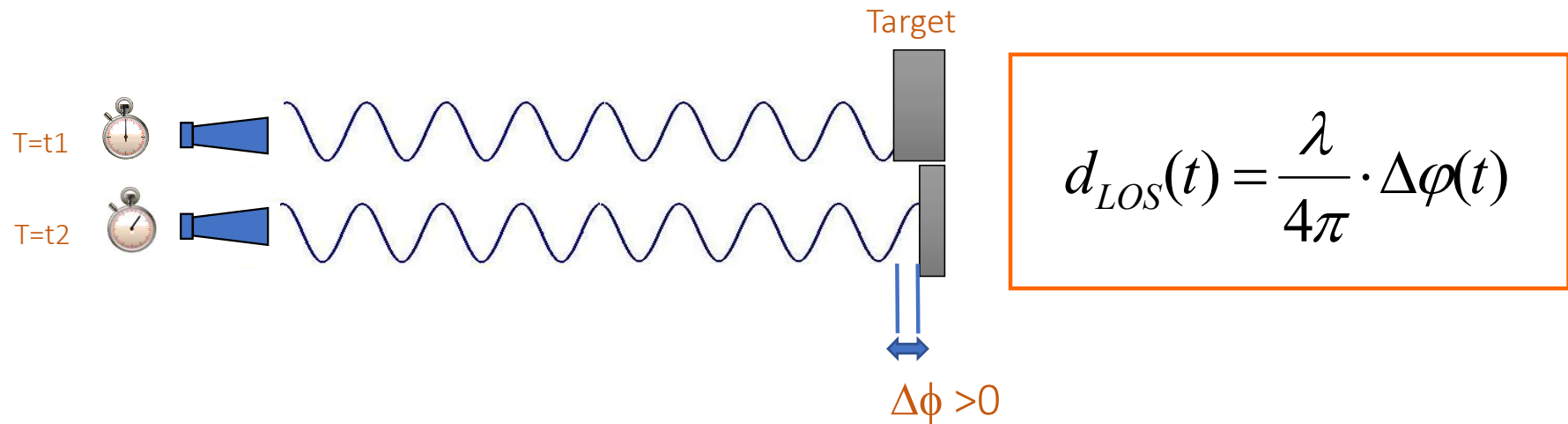


$$\phi_a = \phi_b + \pi$$



# UN EJEMPLO 1D

Si el desplazamiento es inferior a  $\lambda/2$ , la diferencia de fase  $\Delta\Phi$  es proporcional al cambio de distancia en la línea de visión (LOS)

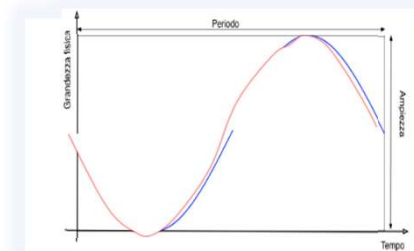
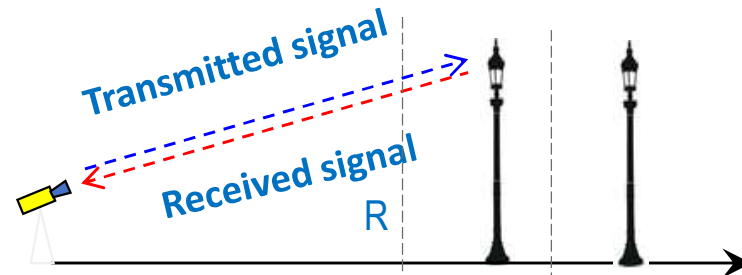


The sensitivity is of the order of fractions of the radar wavelength  $\lambda$  (submillimeter).

Variación de distancia	Desfase (X band)
1 $\mu\text{m}$	0.024°
1mm	24°

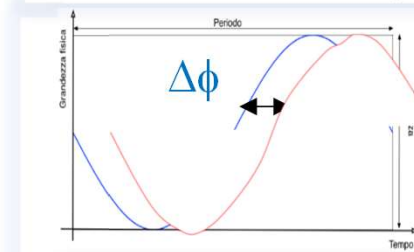
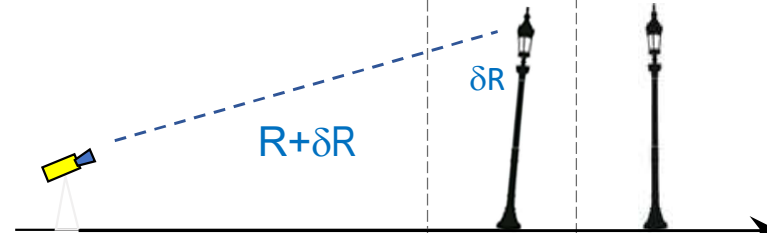
# EJEMPLO: MEDIR VIBRACIONES

$T=0\text{ s}$



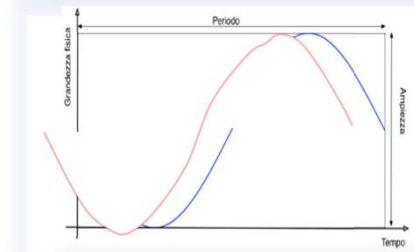
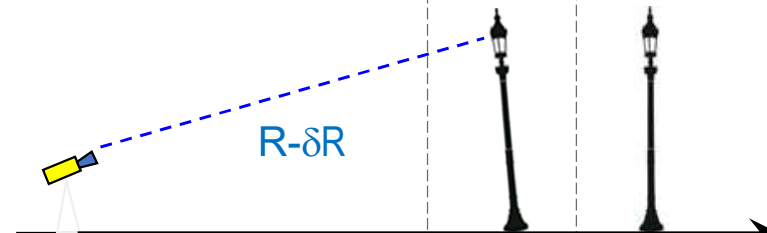
$$\Delta\phi = 0$$

$T=0,3\text{ s}$



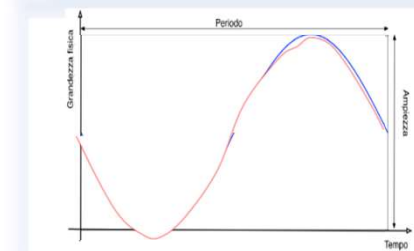
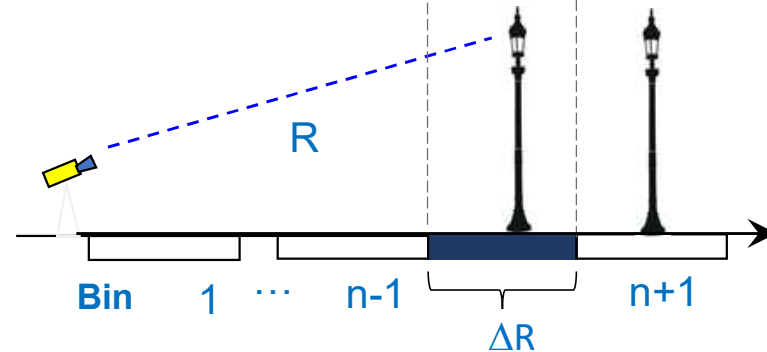
$$\Delta\phi > 0$$

$T=0,9\text{ s}$



$$\Delta\phi < 0$$

$T=1,2\text{ s}$

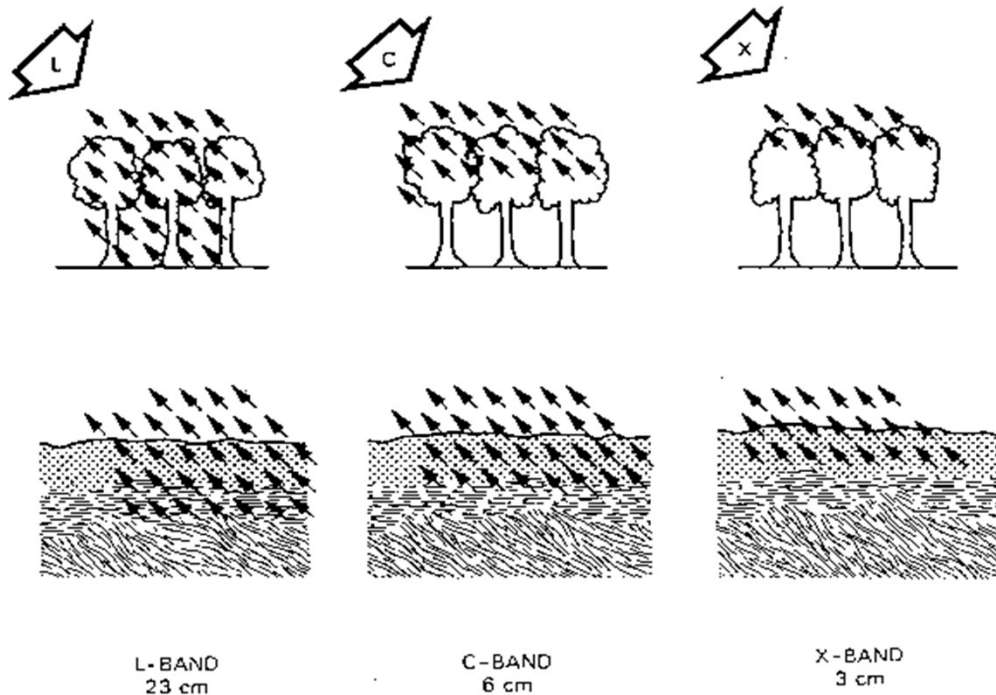


$$\Delta\phi = 0$$

# AMPLITUD DE LA SEÑAL RADAR:

## Backscattering

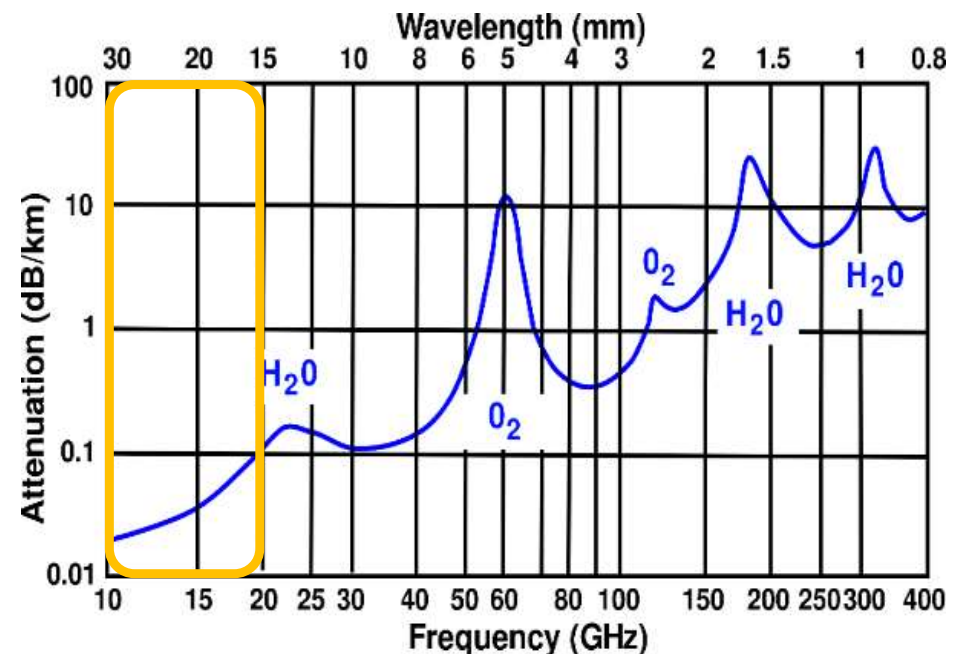
Afectada por la interacción electromagnética de la señal con las propiedades del blanco:



*Radar cross section* del blanco o el coeficiente de retrodifusión de la superficie cambian con diferentes propiedades **geométricas** y **dieléctricas**

## Propagación

Por las diferentes condiciones atmosféricas en la cual la señal se propaga



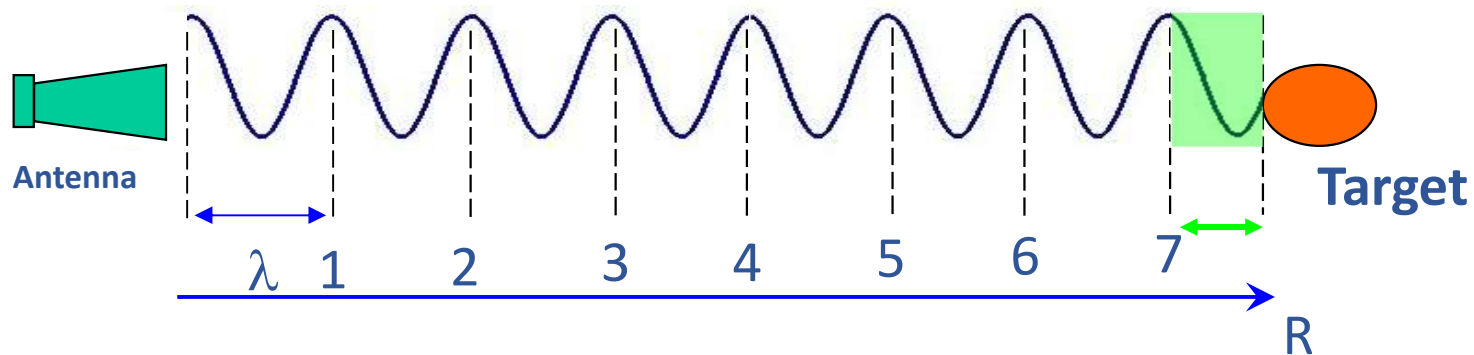
Un factor de atenuación proporcional al camino de la señal

# FASE DE LA SEÑAL RADAR

En la fase hay dos factores:

$$\phi = \phi_{\text{Geom}} + \phi_{\text{Scatt}}$$

$$\phi_{\text{Geom}} = \frac{4\pi}{\lambda} R$$



$$R = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \cdot \varphi_{\text{geom}}$$

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\varphi_{\text{measured}} + n \cdot 2\pi)$$

Solo medimos la última fracción de longitud de onda: no sabemos el número total de longitud de onda entera  $n$  ( $7 \times 2$  en el ejemplo): la fase está **"wrapped"**.



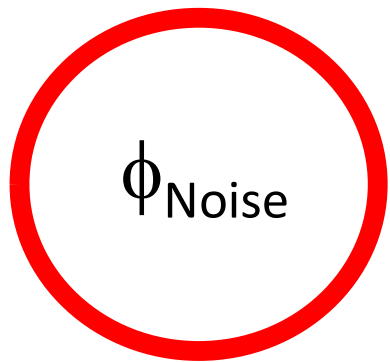
# TERMINO DE FASE NON GEOMÉTRICO DE LA SEÑAL RADAR:

## Backscattering

Contribución del blanco/superficie

- Humedad
- Rugosidad
- Forma geométrica

Muy variable con el tiempo asociable a un ruido



## Propagación

Efecto del medio entre blanco y radar: cambia la longitud de onda

$$\lambda_{\text{atm}} = \lambda_{\text{vacio}} / n$$

$$n = n(p, T, e)$$

p: atmospheric pressure  
e: water vapour pressure  
T: Absolute temperature

$$\varphi_{\text{atm1}} = \frac{4\pi \cdot R}{\lambda_1} \quad \varphi_{\text{atm2}} = \frac{4\pi \cdot R}{\lambda_2}$$
$$\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad \lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}$$

$$\Delta_{\text{atm}} = \frac{4\pi \cdot R (n_2 - n_1)}{\lambda_0}$$

La fase puede cambiar muchos durante el tiempo que separa dos pasajes del satélite: **perdida de coherencia**

# UN PIXEL CONTIENE DIFERENTES REFLECTORES

La señal medida proviene de la suma de todos los ecos del incluidos en el píxel

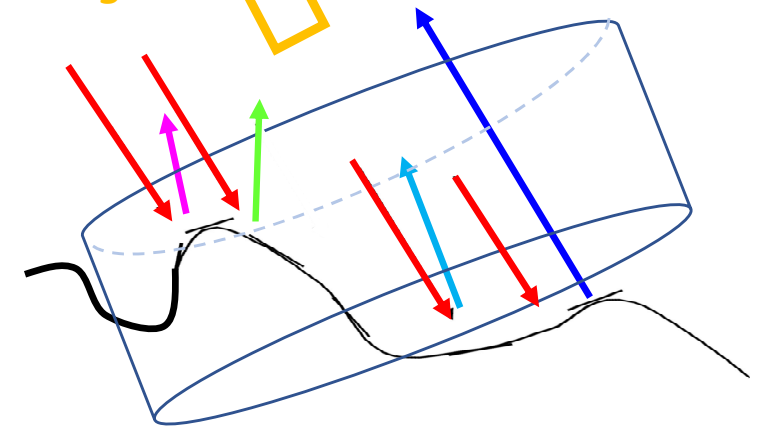
La suma de vectores se ve afectada por amplitud y fase



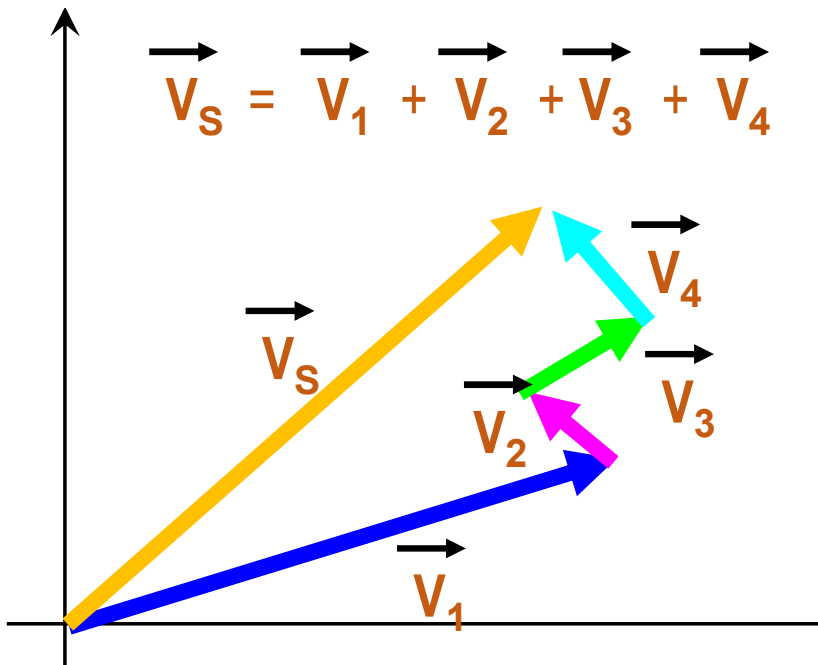
*Transmitted signal*

Radar bin

*Vs Backscattered signal*



Q (quadrature)



I (in phase)

# ONDAS , RADAR Y INTERFEROMETRÍA

INSAR: DEM

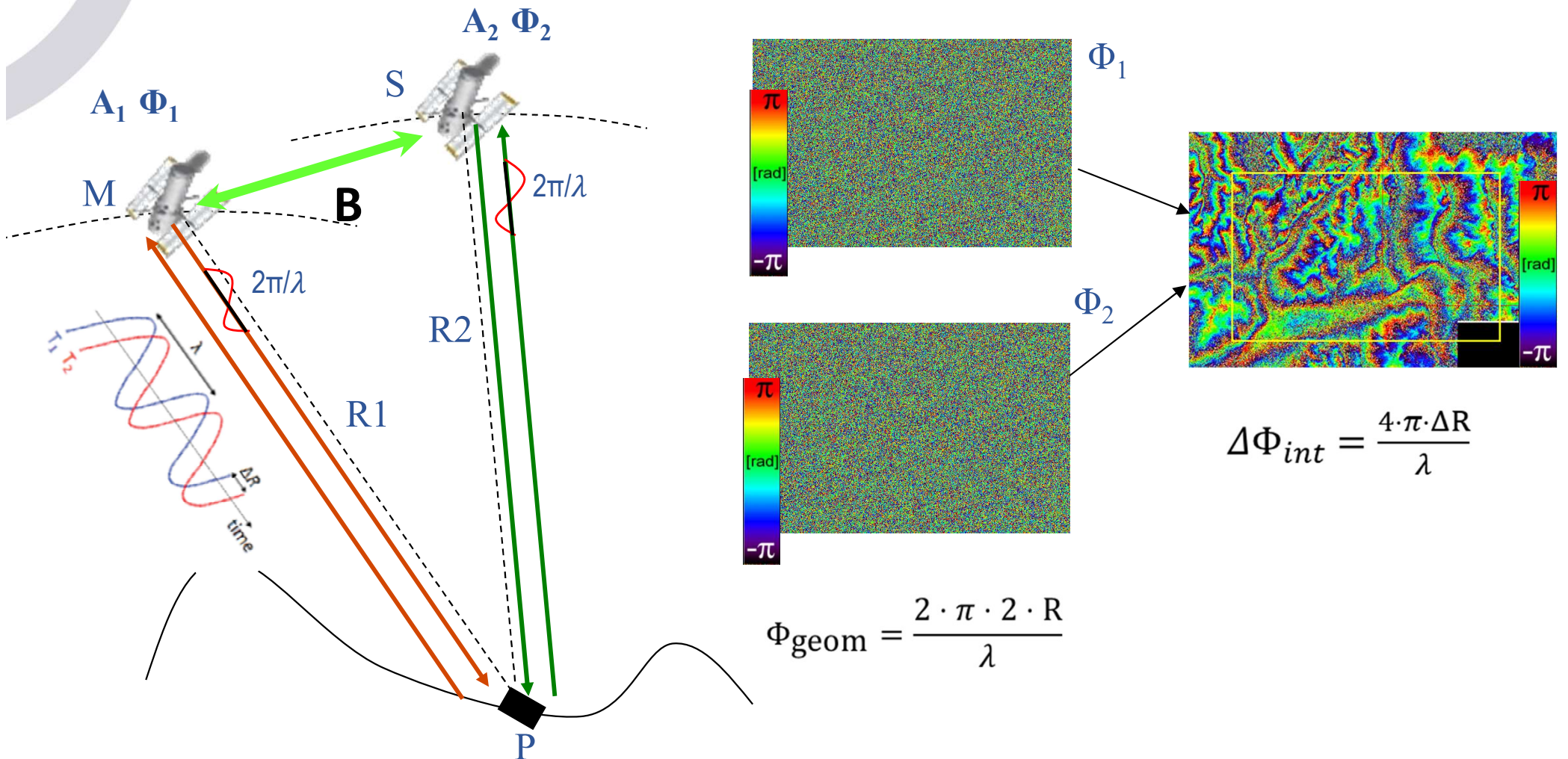
DINSAR : DEFORMATION:

EJEMPLOS

..... Y ALGO MAS

# INTERFEROMETRÍA CON DOS IMÁGENES SAR SATELITALES

El interferograma: un mapa de diferencia de fase entre dos imágenes



El satélite adquiere imagen en tiempos y posiciones (Baseline) diferentes

# DOS PRODUCTOS

Master Image

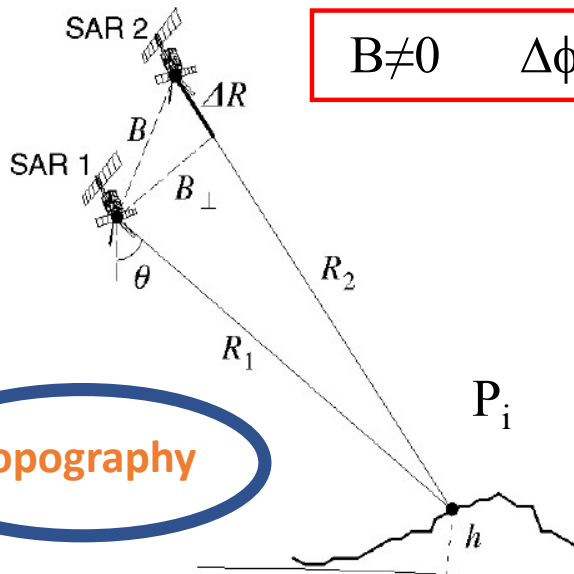
$$M(t, R) = a_{1i} e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{1i}}$$

Slave Image

$$S(t, R) = a_{2i} e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{2i}}$$

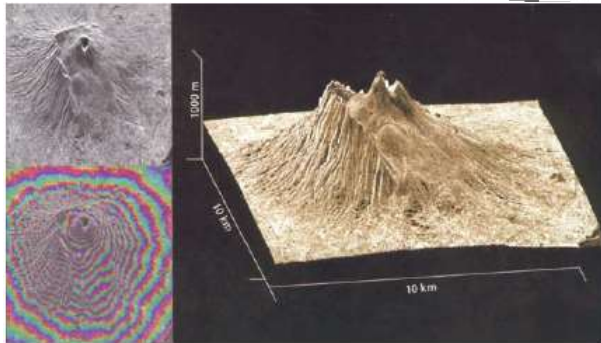
$$s_i = |a_{1,i} a_{2,i}^*| e^{j \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (R_{2i} - R_{1i}) - \Phi_{noise,i} \right]} = |s_i| e^{j\phi}$$

B=Baseline



$$B \neq 0 \quad \Delta\phi \propto (4\pi/\lambda) h_r$$

Topography

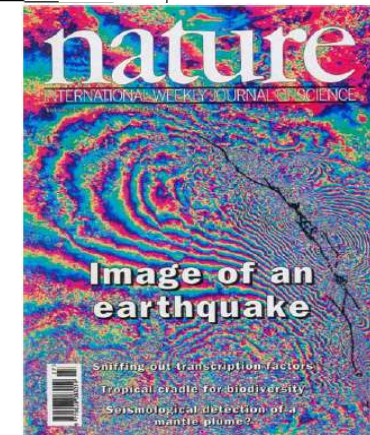
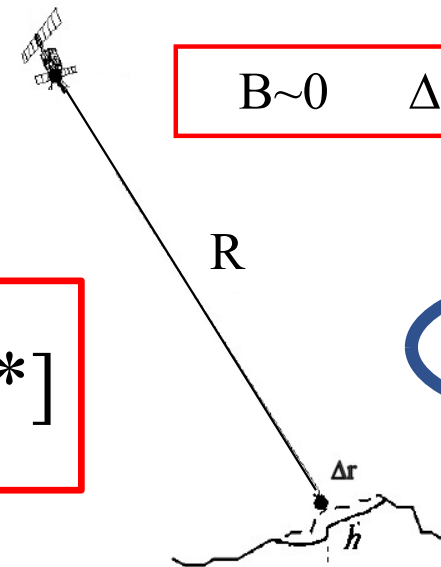


InSAR image of Vesuvius, © Eurimage

$$B \sim 0 \quad \Delta\phi = (4\pi/\lambda) \Delta R$$

$$\phi = \arg[MS^*]$$

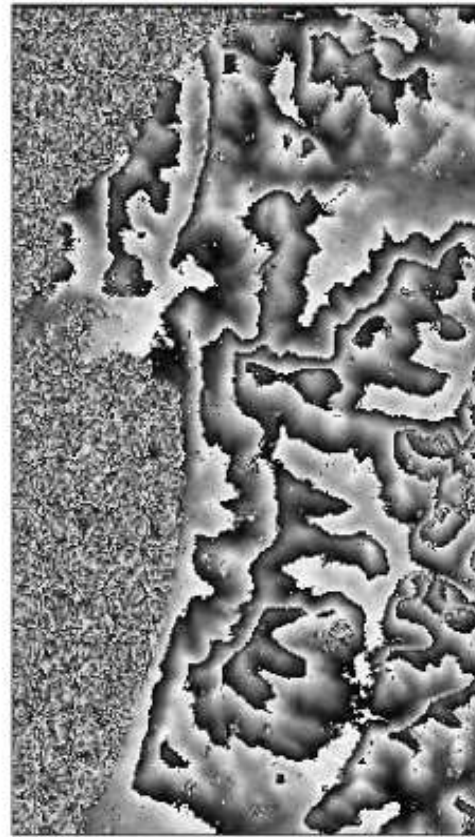
Deformation



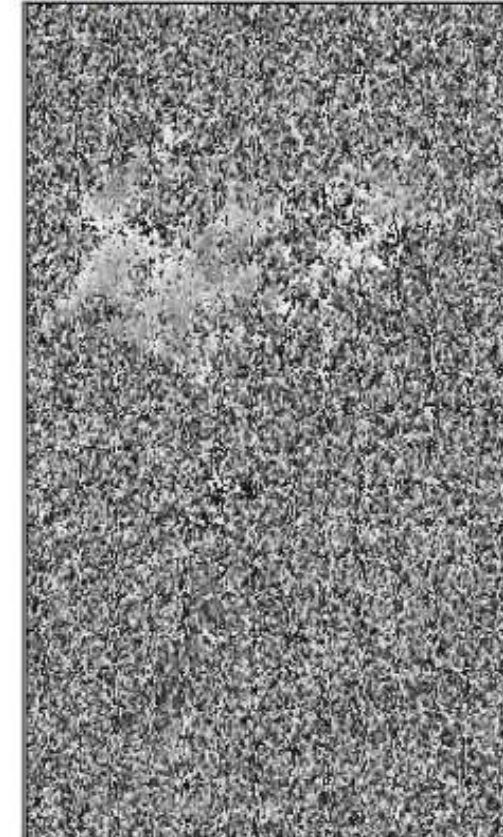


# DECORRELACIÓN O PERDIDA DE COHERENCIA

## The problem of temporal decorrelation



*1-day (Tandem)  
Interferogram*



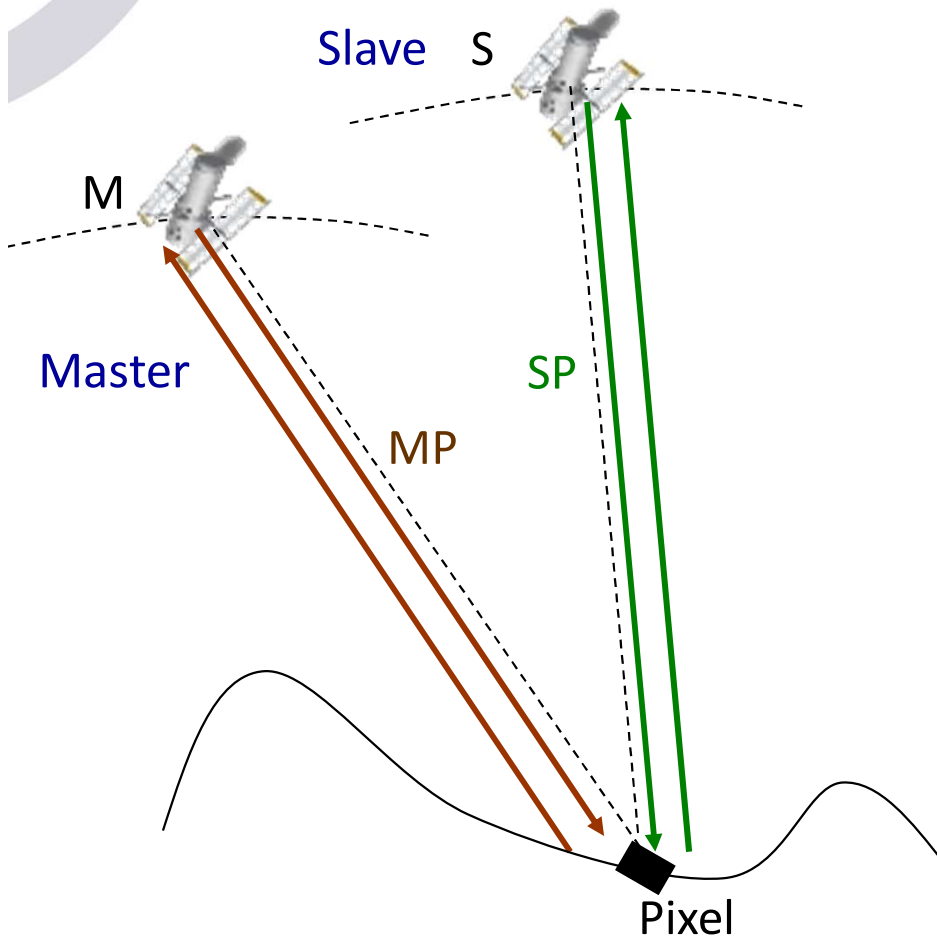
*15-months...*



# MODELO DIGITAL DEL TERRENO

1<sup>st</sup> acquisition @  $t_1$  orbit 1

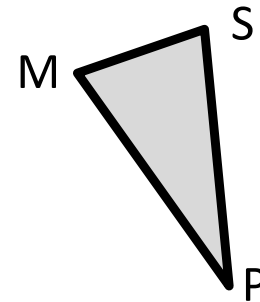
2<sup>nd</sup> acquisition @  $t_2$  orbit 2



$$\Phi_S = SP \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} + \Phi_o$$

$$\Phi_M = MP \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} + \Phi_o$$

$$\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M = (SP - MP) \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda}$$



$$SP = MP + \frac{\Phi_{Int} \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$$

$\Phi_{int}$

Related to Line Of Sight displacement

- Por cada pixel:
  - M, S known (orbits)
  - MP known (is the SAR Master *slant range*)
  - SP measured from  $\Phi_{int}$
  - Compute Pixel range

M-S distance = Baseline



# ONDAS , RADAR Y INTERFEROMETRÍA

INSAR: DEM

DINSAR : DEFORMATION

EJEMPLOS

.... Y ALGO MAS

# PHASE AND COHERENCIA

La interferometría funciona solo si la fase se conserva entre las diferentes adquisiciones.

El grado de correlación entre la imagen  $I_1$  e  $I_2$ , se puede estimar calculando la coherencia,  $\Gamma$ .

$$|\Gamma| = \frac{|\langle I_1 I_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle |I_1|^2 \rangle \langle |I_2|^2 \rangle}}$$

$\Gamma$  Nos da una estimación de la calidad estadística de la fase interferométrico. El promedio ( $\langle \rangle$ ) se calcula sobre un cuadro de  $n \times m$  píxeles

$\Gamma$  Varía entre un máximo, 1, y el mínimo, 0.

$\Gamma = 1$  : las dos imágenes están totalmente correladas

Cuando  $\Gamma = 0$  no Podemos sacar ninguna información de un interferogramas

# DIFERENTES COMPONENTES DE LA FASE INTERFEROMETRICA

La fase interferométrica depende de **diferentes componentes**:

- **Geométrica** ( rango R):
  - **Topografía**: debido a las diferentes posiciones del satélite en las dos adquisiciones
  - **Movimiento**: posición del blanco
- **Atmosfera**: debido al cambio de las condiciones atmosféricas en las dos adquisiciones\*
- **Noise** (cambio en el reflector)

$$\Delta\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{mov}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}}$$

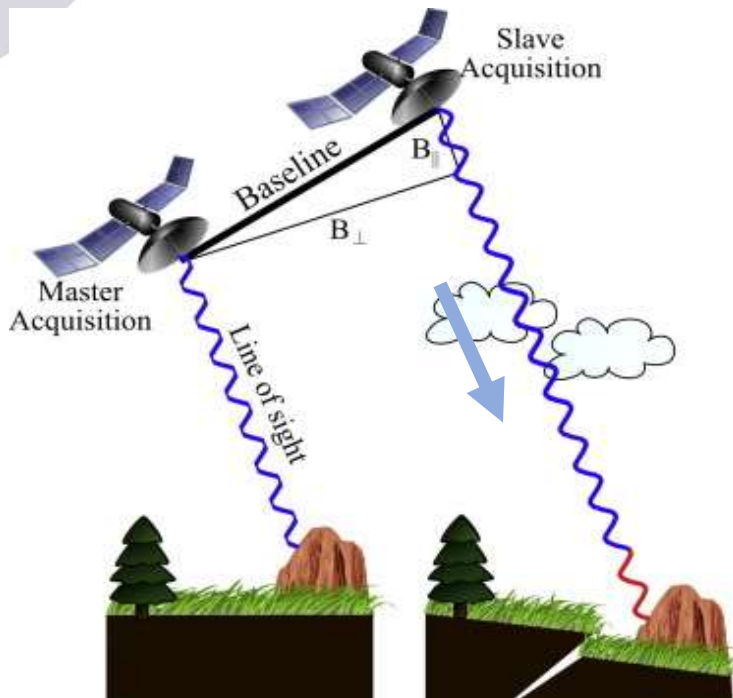


Image from Osmanoğlu et al., 2016



# LA ESTADÍSTICA PARA BUSCAR PUNTOS BUENOS

---

Como identificar **puntos buenos** para la interferometría?  
Nos ayuda la distribución de amplitud, ¿porqué?

Por un lado, un reflector **estable**, pequeño con respecto al pixel tiene una distribución de amplitud con un ratio **mean/standard desviación ratio mucho mayor que 2**

Por otro lado, un reflector de baja coherencia tiene distribución de Rayleigh con un ratio **mean/standard desviación ratio muy cerca de 2**

Procesando muchas imágenes nos permite identificar estos puntos donde corregir los términos de errores:

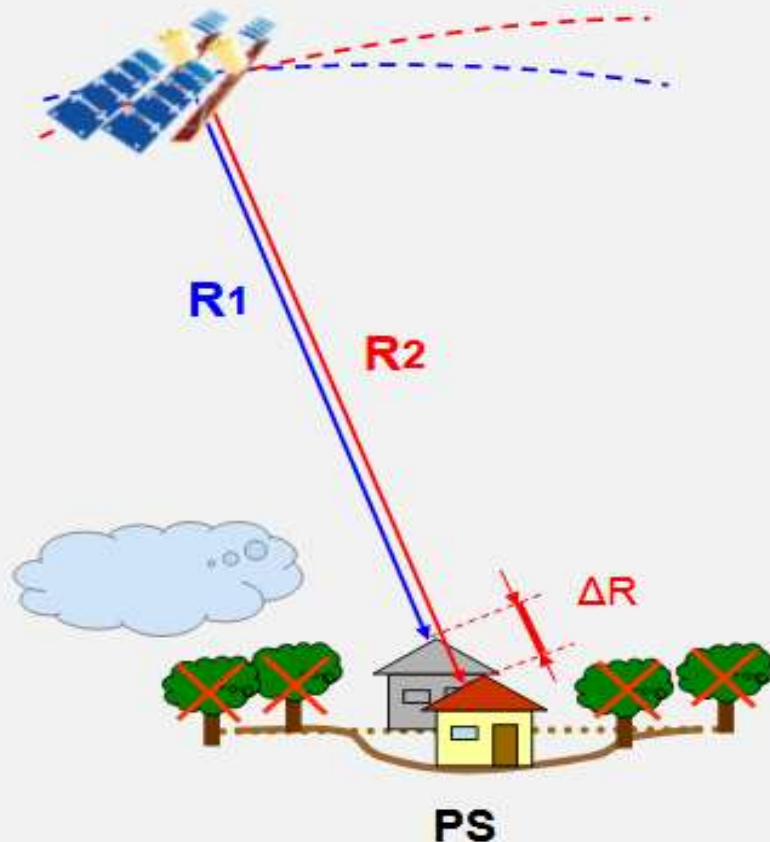
Los: **Permanent scatterers (Persistent scatterers)**

Cuando la densidad de PS es lo suficientemente alta ( $> 3-4 \text{ PS/km}^2$ ), se puede estimar y eliminar *Atmospheric Phase Screen* de cada imagen SAR

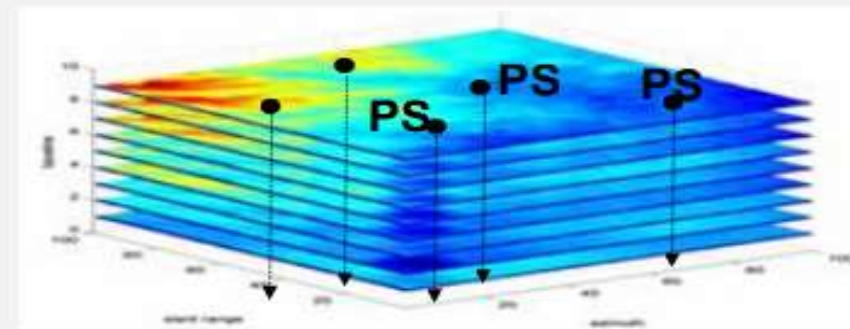
# PERMANENT SCATTERERS



## The PS Technique™



$$\phi = \Delta\psi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\alpha + noise$$



By using:

- temporal series of SAR data
- identification of:
  - coherent radar targets:  
the *Permanent Scatterers (PS)*

where atmospheric effects can be estimated and removed



# FASE Y DISPERSION DE AMPLITUD

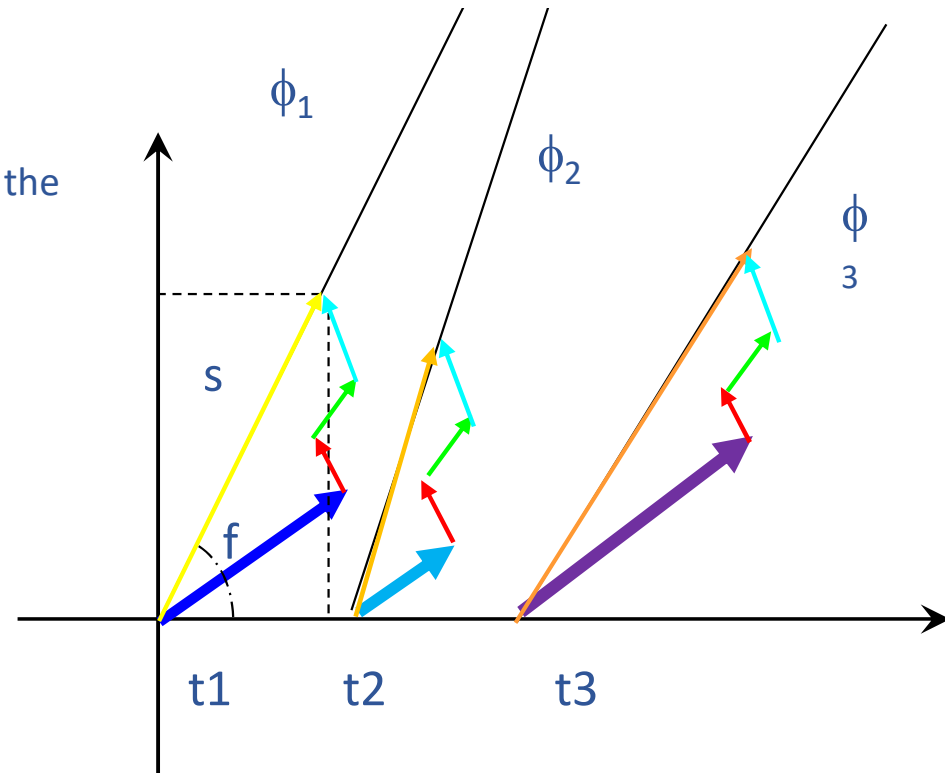
Para identificar PS buscamos pixels que tengan una **dispersión de amplitud baja**, es decir con amplitud alta y estable

$\sigma_A$  Standard deviation of the amplitude

$m_A$  Mean of the amplitude

Dispersion of amplitude

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A}$$

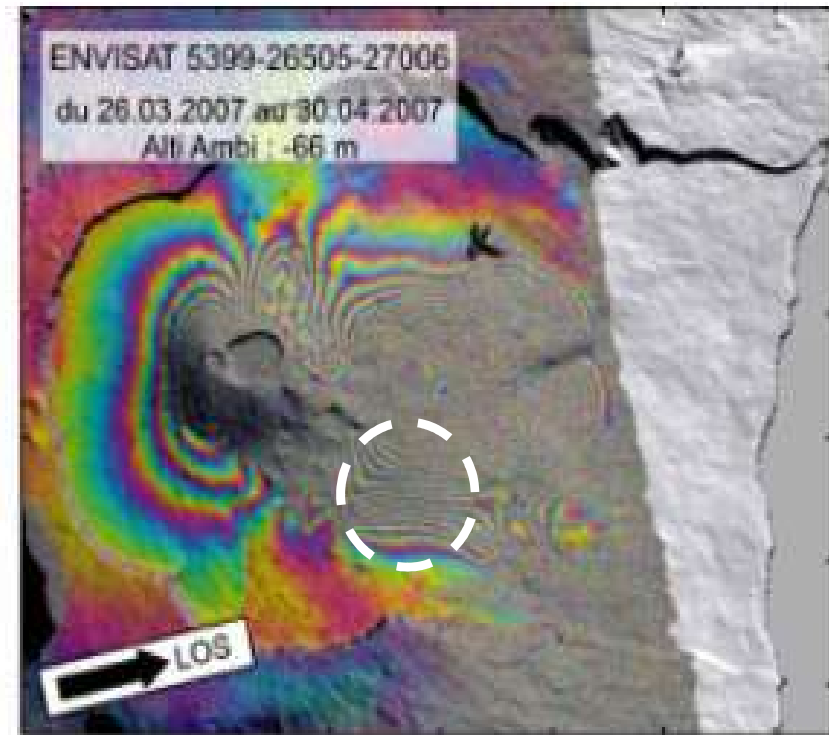
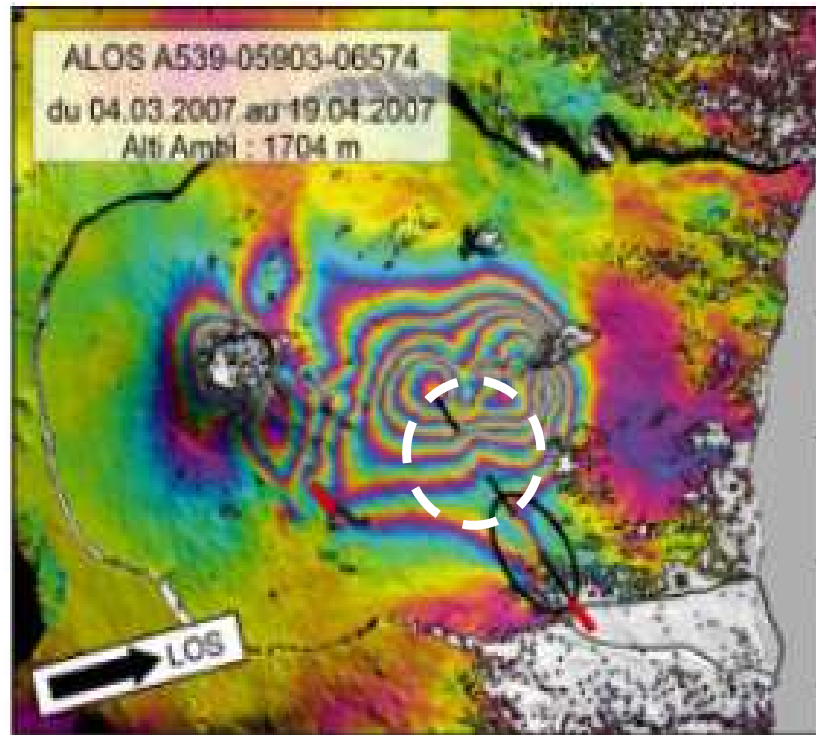


Si el amplitud varia con el tiempo ( $t_1, t_2, t_3$ ), también la fase sufre una inestabilidad:  $\phi_2 > \phi_1 > \phi_3$

# EL IMPORTANCIA DE LA BANDA

Palsar L band  $\lambda = 23.6$  cm

Envisat C band  $\lambda = 5.66$  cm



Source - © 2019 A. Augier - OPGC / CC BY-SA 4.0

6 franjas Palsar = 71 cm

Envisat → 25 franjas

# EL IMPORTANCIA DE LA BASELINE

$$\Delta\varphi_{topo} = \frac{4\pi \cdot B_p H}{\lambda R_M \sin(\theta)}$$

- Hay sensibilidad diferentes de la fase con respecto a la topografía y la deformación

-  $\Phi_{Topo}$  depende de la *baseline* (distancia SM):

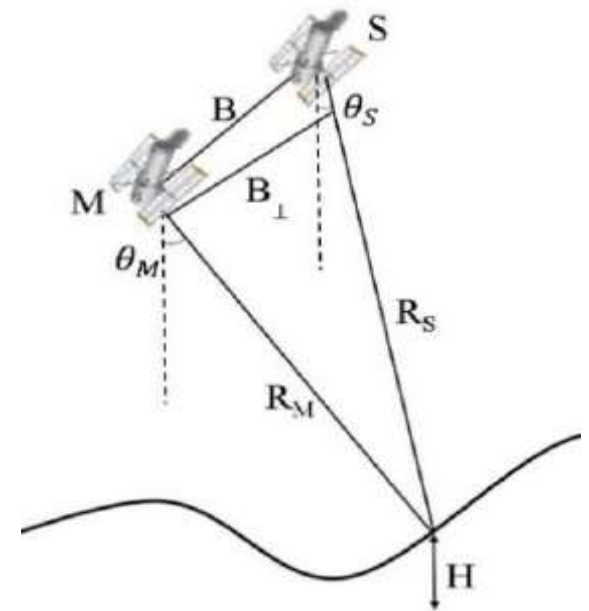
-  $\Phi_{Mov}$  no depende de la *baseline*

Ejemplo:

desplazamiento de 1 cm  $\rightarrow \approx 127^\circ$

diferencia de 20 m  $\rightarrow \Phi_{Topo} \approx 43^\circ$  ( $B_\perp = 50$  m)

$\rightarrow \Phi_{Topo} \approx 8.6^\circ$  ( $B_\perp = 10$  m)





# ONDAS , RADAR Y INTERFEROMETRÍA

INSAR: DEM

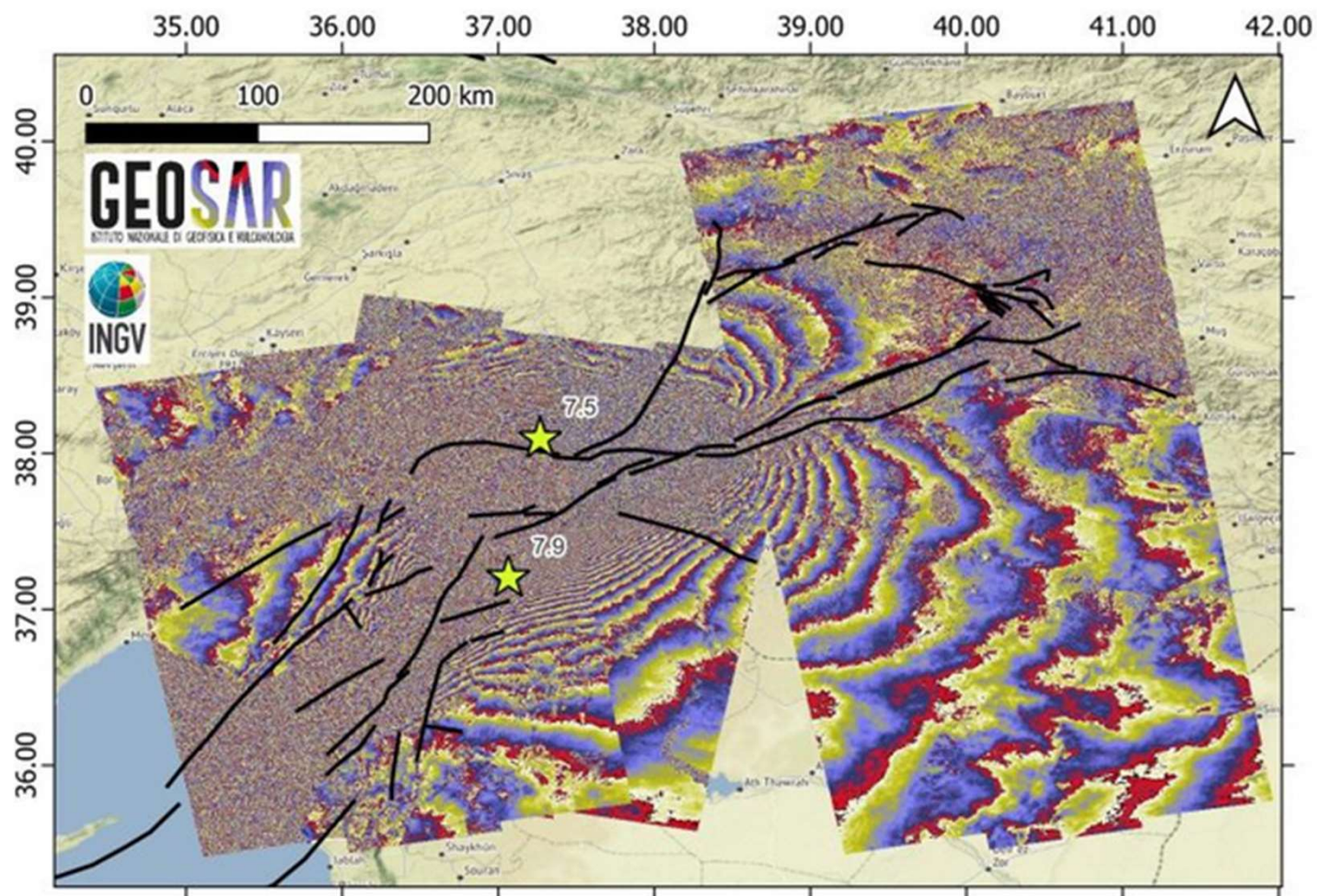
DINSAR : DEFORMATION:

**EJEMPLOS** Y ALGO MAS

# TERREMOTO TURCHIA Y SIRIA

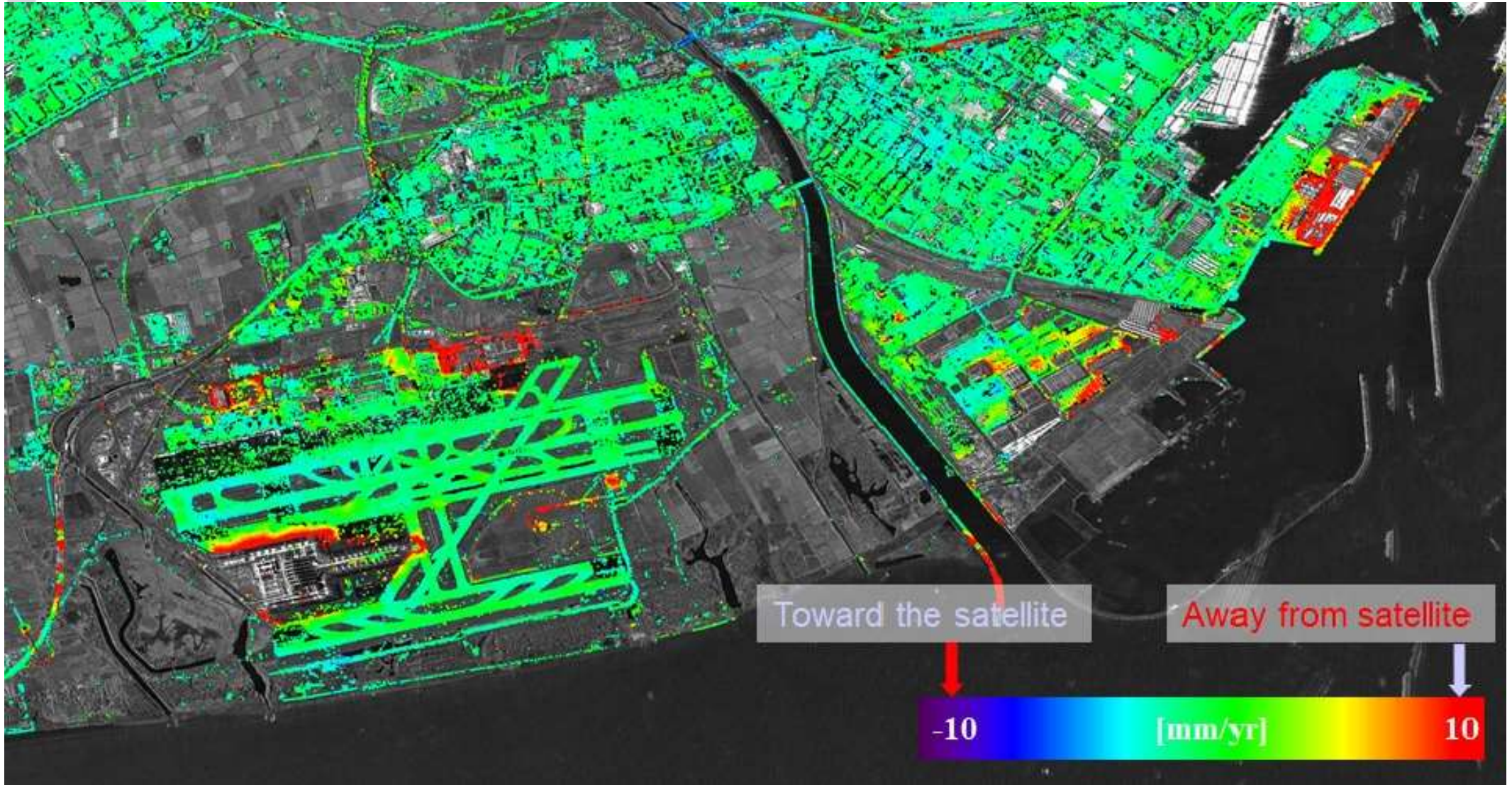
Patrón de franjas resultado de un procesamiento de adquisiciones *ascending* and *descending* (Sentinel-1)

Se notan franjas hasta 250 km de distancia del epicentro.





# DEFORMATION (PS) FROM SPACE



Barcelona airport. Map of PS processed at CTTC from TerrasarSAR-X data



# CUANDO EL DEM NO TIENE SUFICIENTE EXACTITUD

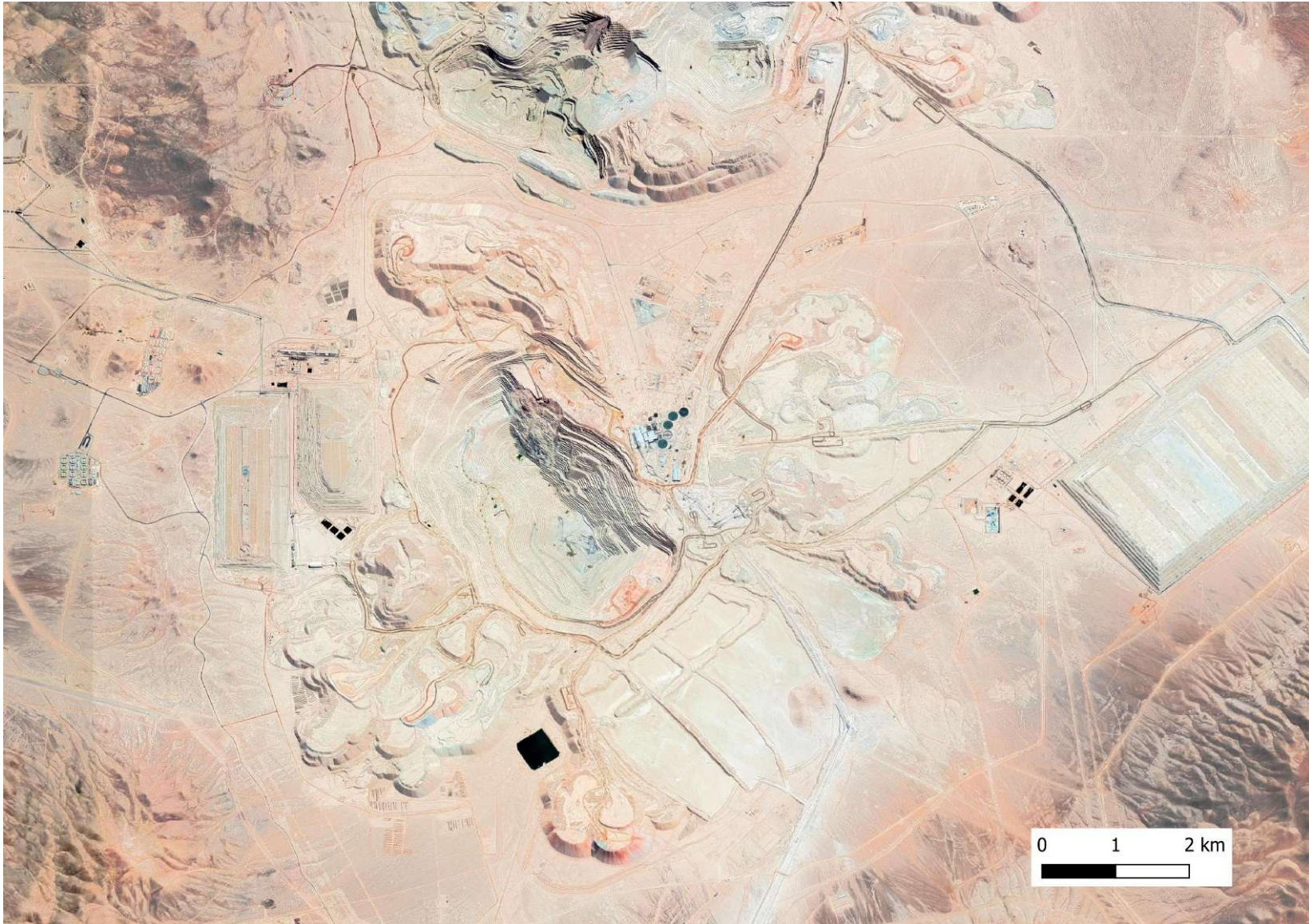
Con el error sobre los PS mejoramos el geocoding



Barcelona Skyscrapers. Map of PSs from TerraSAR-X data



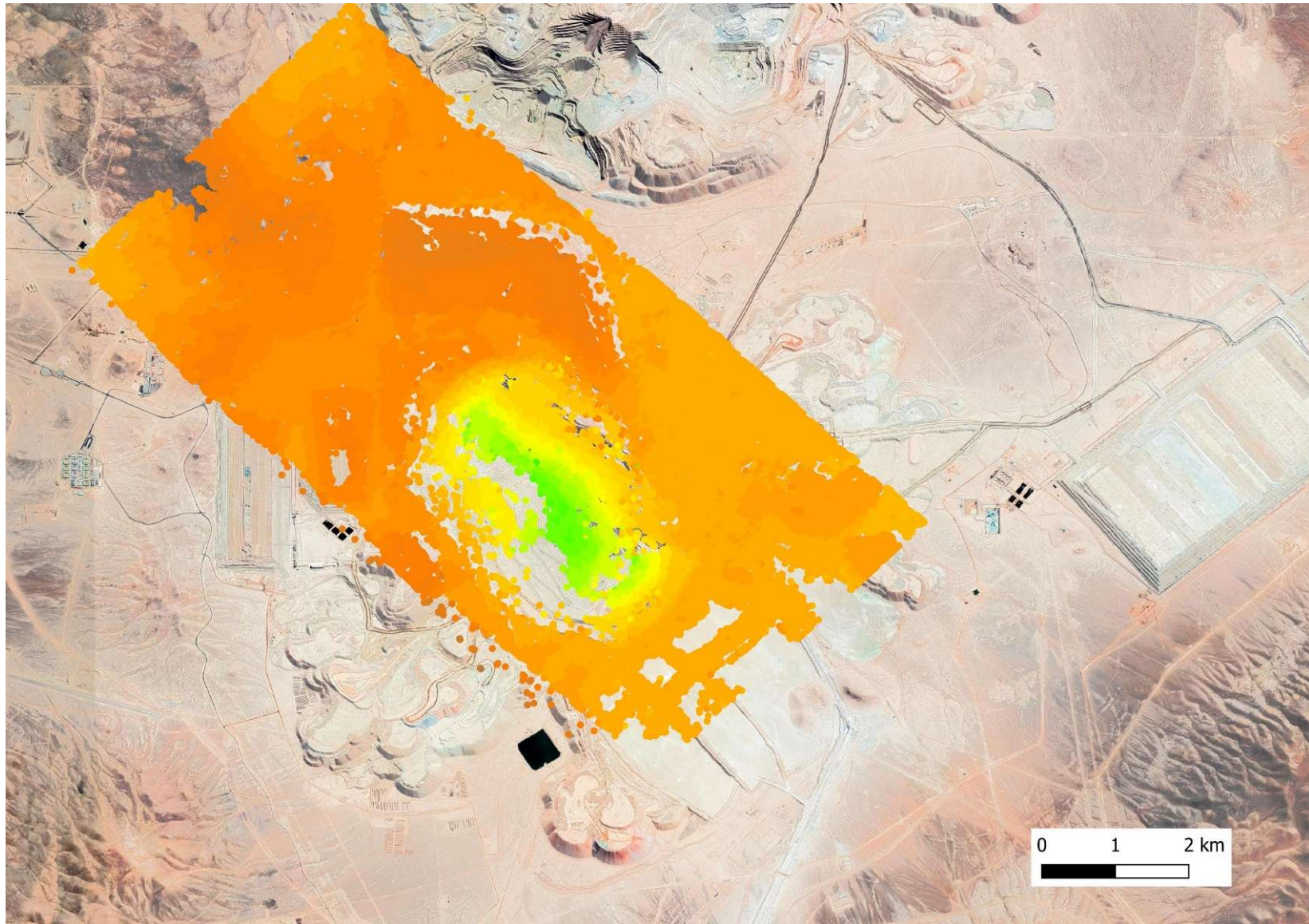
## EXAMPLE OF APPLICATION – MINING SITE



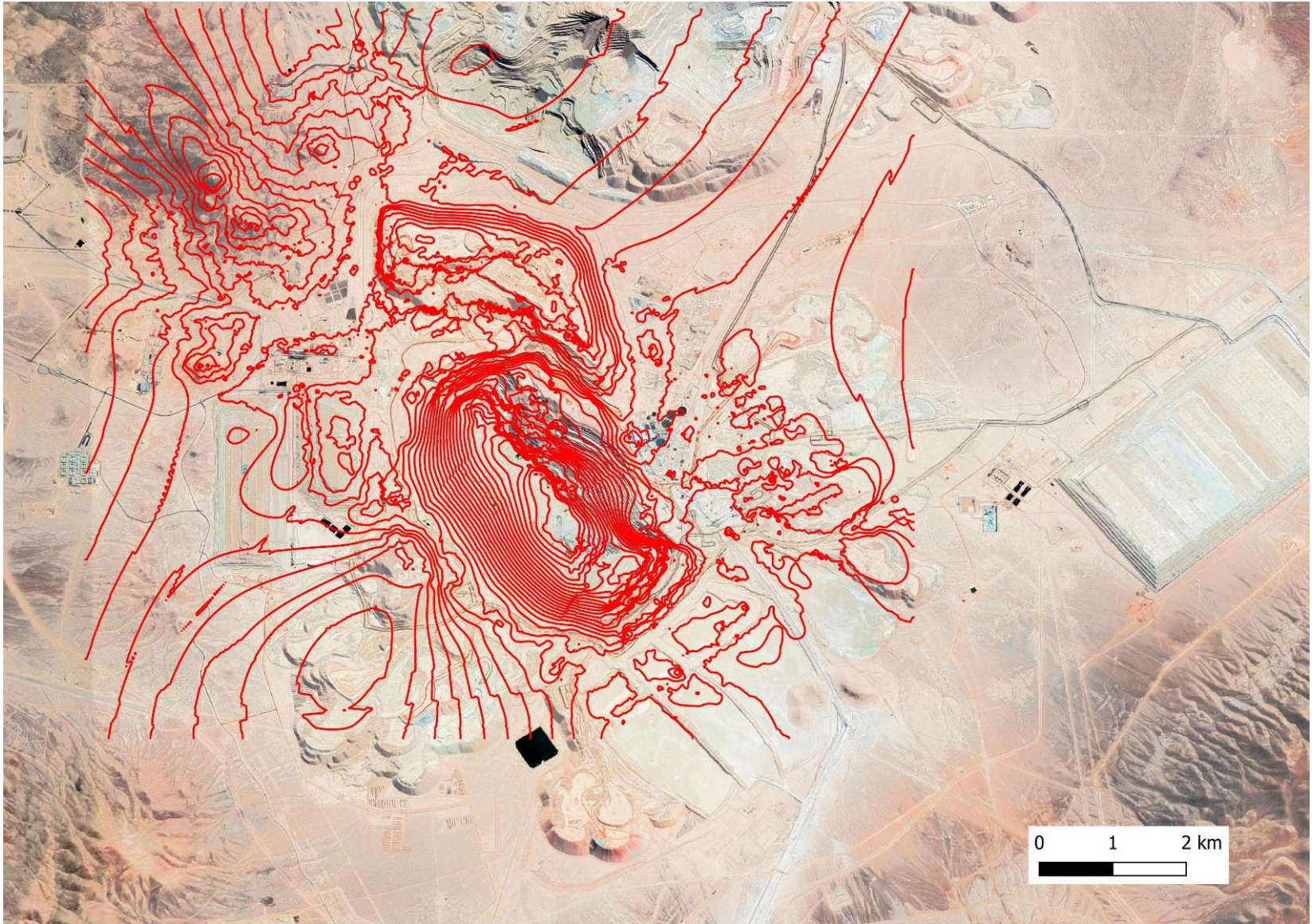
Very important for mining applications – useful for project reconciliation  
Probably not enough sensitivity for mining operations monitoring



# EXAMPLE OF APPLICATIONS – MINING SITE







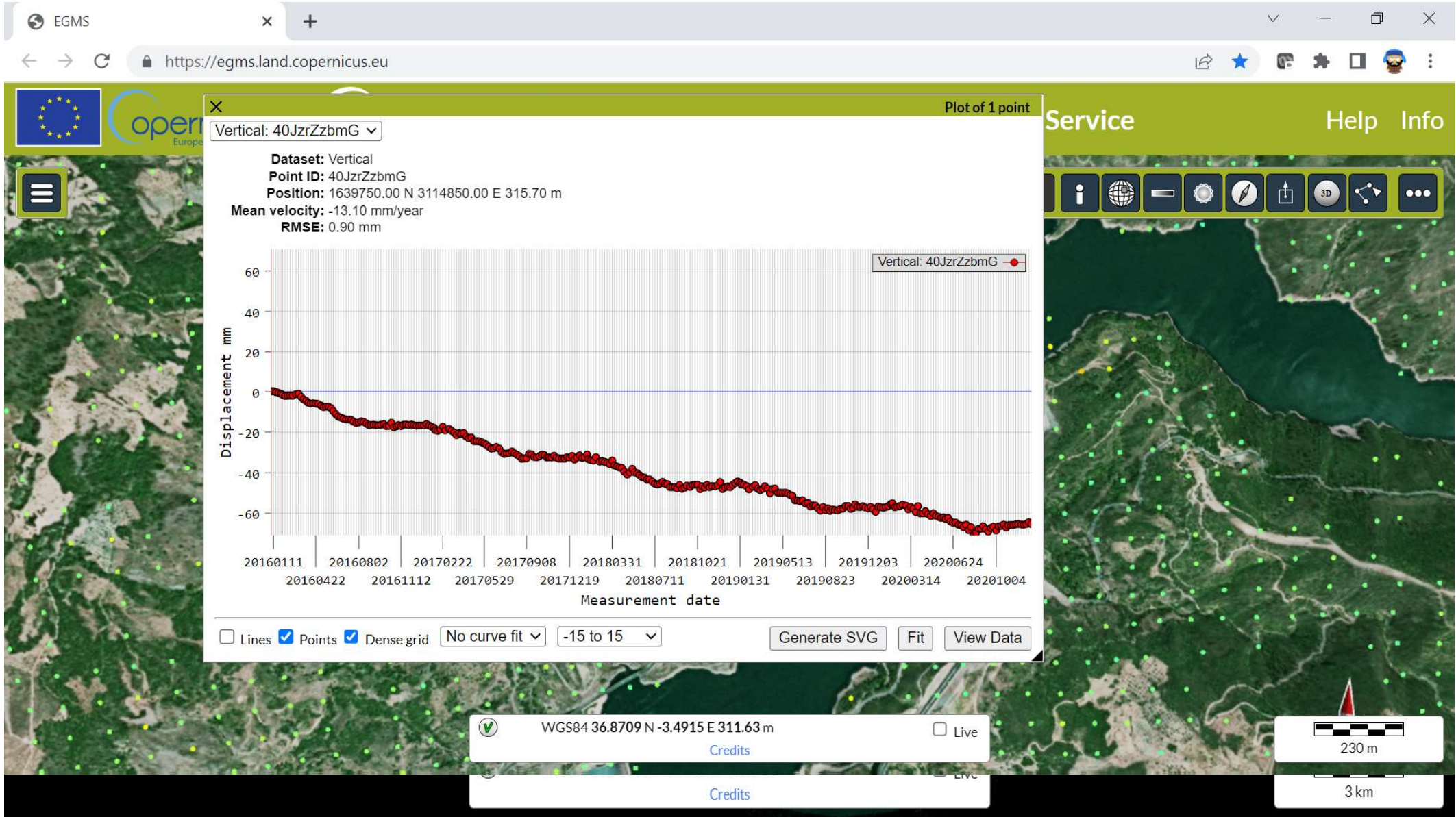


# EGMS: UNA HERRAMIENTA PARA TODA EUROPA

The screenshot shows the EGMS web application interface. At the top, there is a navigation bar with the logos of the European Union, Copernicus, Land Monitoring, and the European Environment Agency. The main title is "European Ground Motion Service" with "Help" and "Info" links. Below the navigation bar is a search bar with the placeholder text "Place/coordinates (lat lon)" and a toolbar with icons for information, globe, zoom, settings, compass, print, 3D, and share. The main area is a satellite map showing a landscape with a river and a dam. Numerous green and yellow dots are scattered across the map, representing ground motion stations. A white circle highlights a specific station. At the bottom, there is a coordinate display showing "WGS84 36.8709 N -3.4915 E 311.63 m" and a "Live" checkbox. A scale bar indicates 230 m and 3 km.

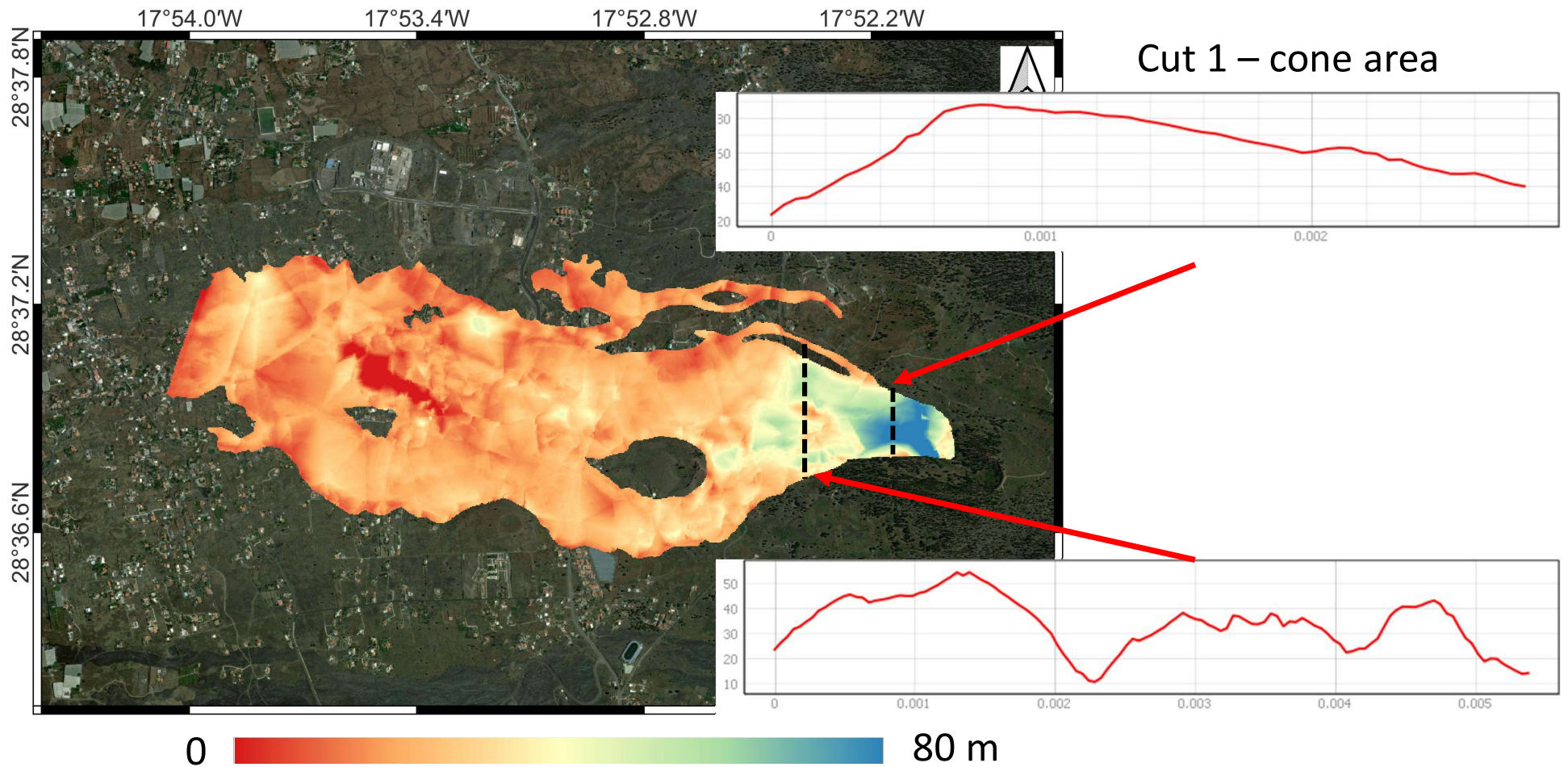


# CADA PS TIENE SU HISTORIA TEMPORAL





# LAVA IN LA PALMA



Cut1 : values included in [20-80] m  
Cut2: values included in [10-50] m



# ONDAS , RADAR Y INTERFEROMETRÍA

INSAR: DEM

DINSAR : DEFORMATION:

EJEMPLOS Y ALGO MAS



# Ground Based SAR

Antennas



Radar transceiver

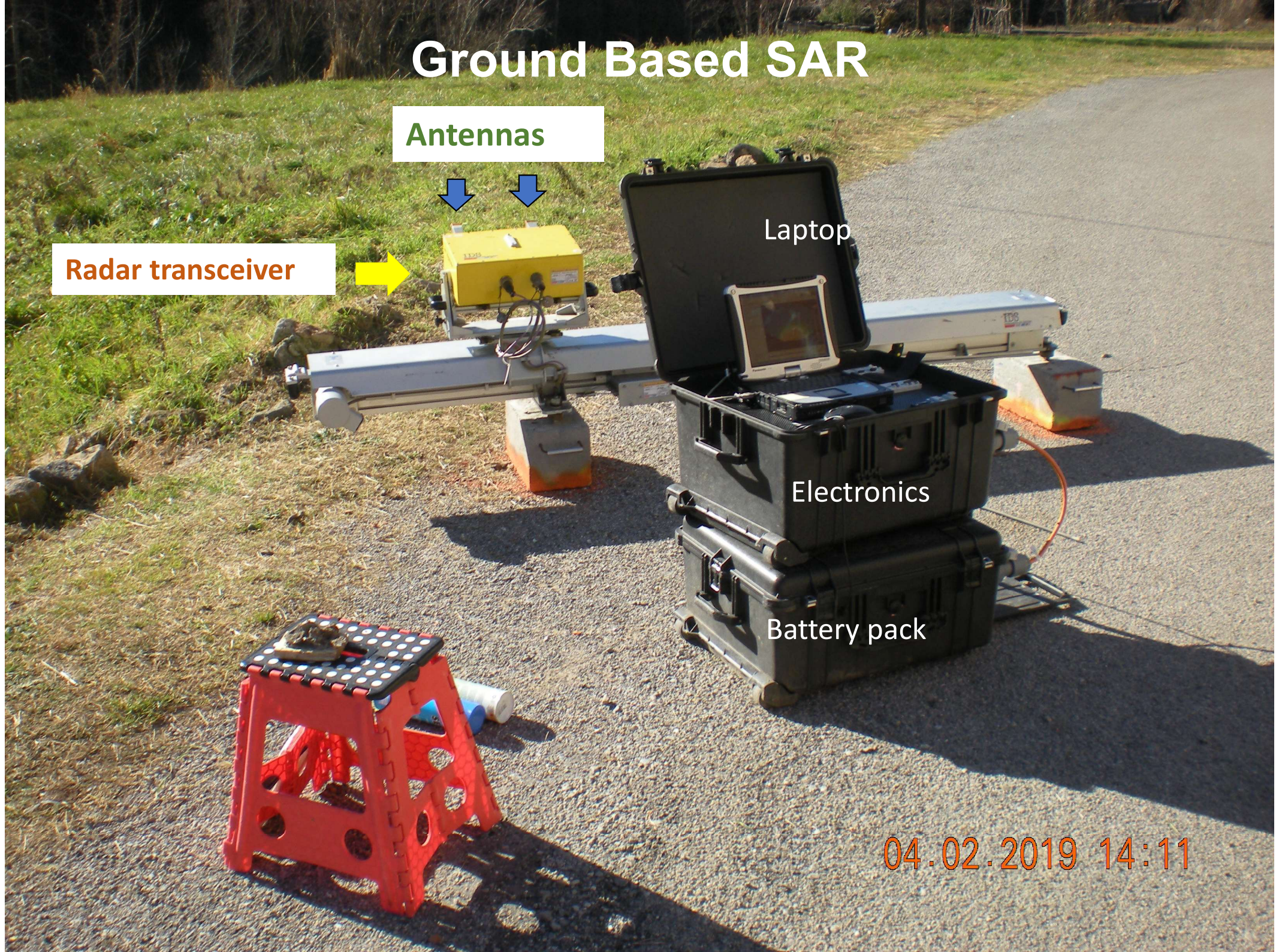


Laptop

Electronics

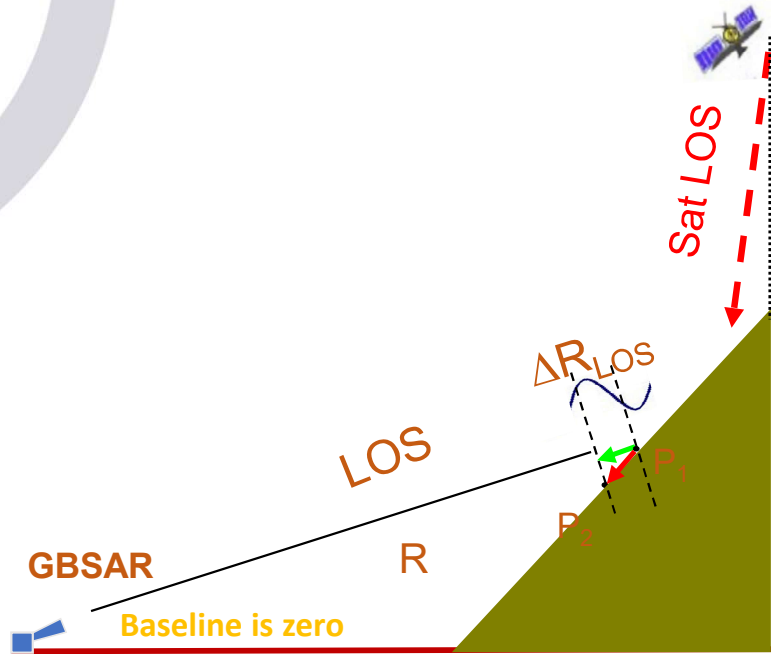
Battery pack

04.02.2019 14:11





# LINE OF SIGHT: A KEYPOINT

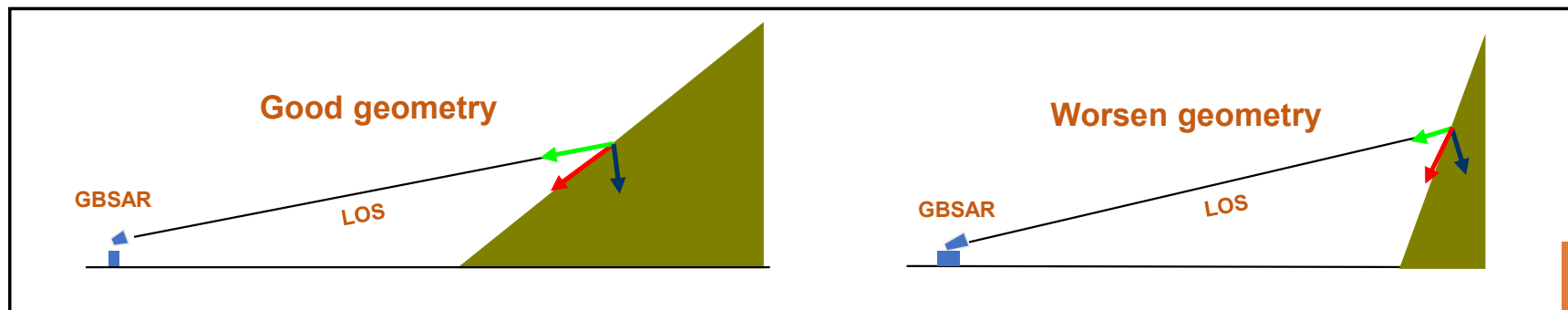


$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_{mov} - \varphi_{topo} - \varphi_{atmo} - \varphi_{noise}$$

↑

Acquisition rate: minutes!

- The line-of-sight direction (LOS) is mostly **horizontal**
- The high temporal sampling drastically **reduces the unwrapping problem**
- The different spatial scale demands a **different approach for correcting atmosphere**.



# TWO OPERATING MODES

Fast landslides / Early warning

1) GBSAR continuous monitoring



Slow landslides / Monitoring

2) GBSAR discontinuous monitoring



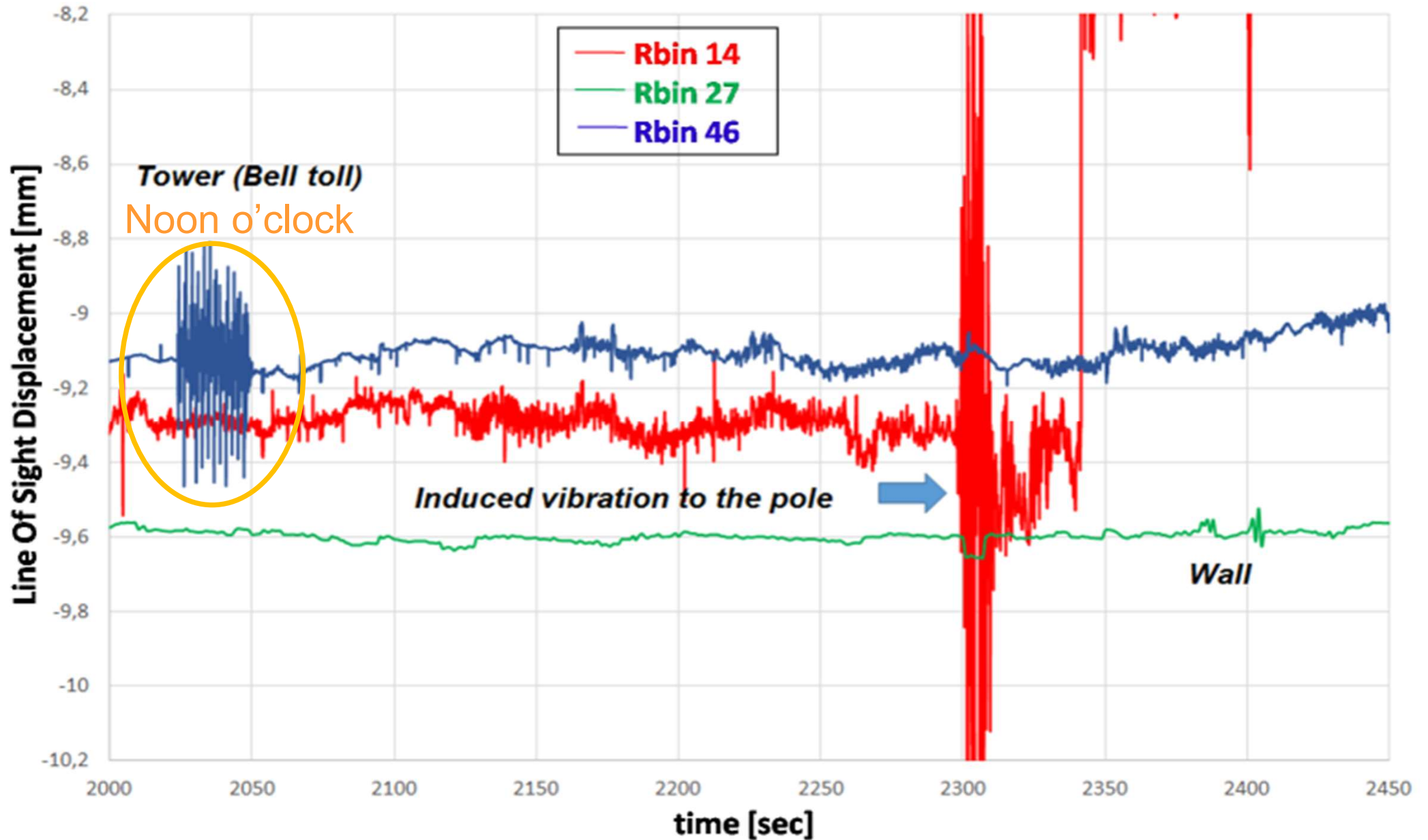
1. We need **high coherence** (vegetated area are usually incoherent)
2. **Unwrapping**: fast movement can be underestimated
3. **Atmospheric effect**: reference points data or correction algorithms are applied
4. Scalar deformation estimate (**Line of Sight**)

# THE MONITORING OF AN ANCIENT BELL TOWER II





# The monitoring of an ancient bell tower



# ¿Preguntas?

