

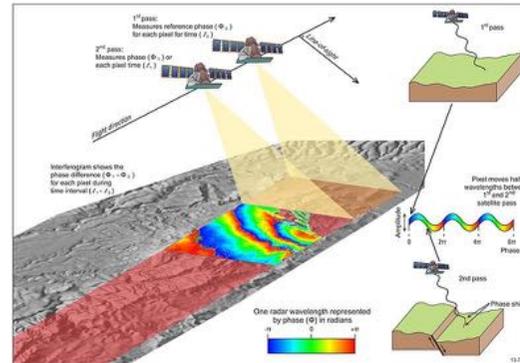
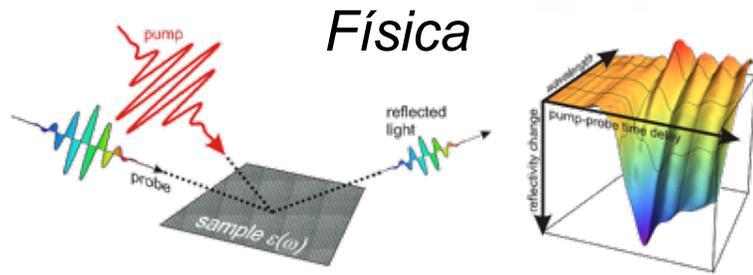
Teledetección y sensores: una breve introducción

Paolo Gamba



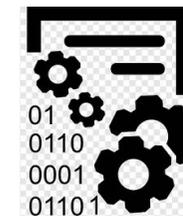
UNIVERSITÀ DI PAVIA

Una amplia gama de disciplinas involucradas

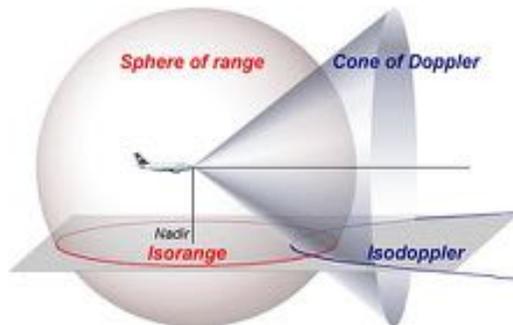


Procesamiento de señales

Procesamiento de datos, algoritmos



Sensores



Almacenamiento y recuperación de datos

<https://favpng.com/>

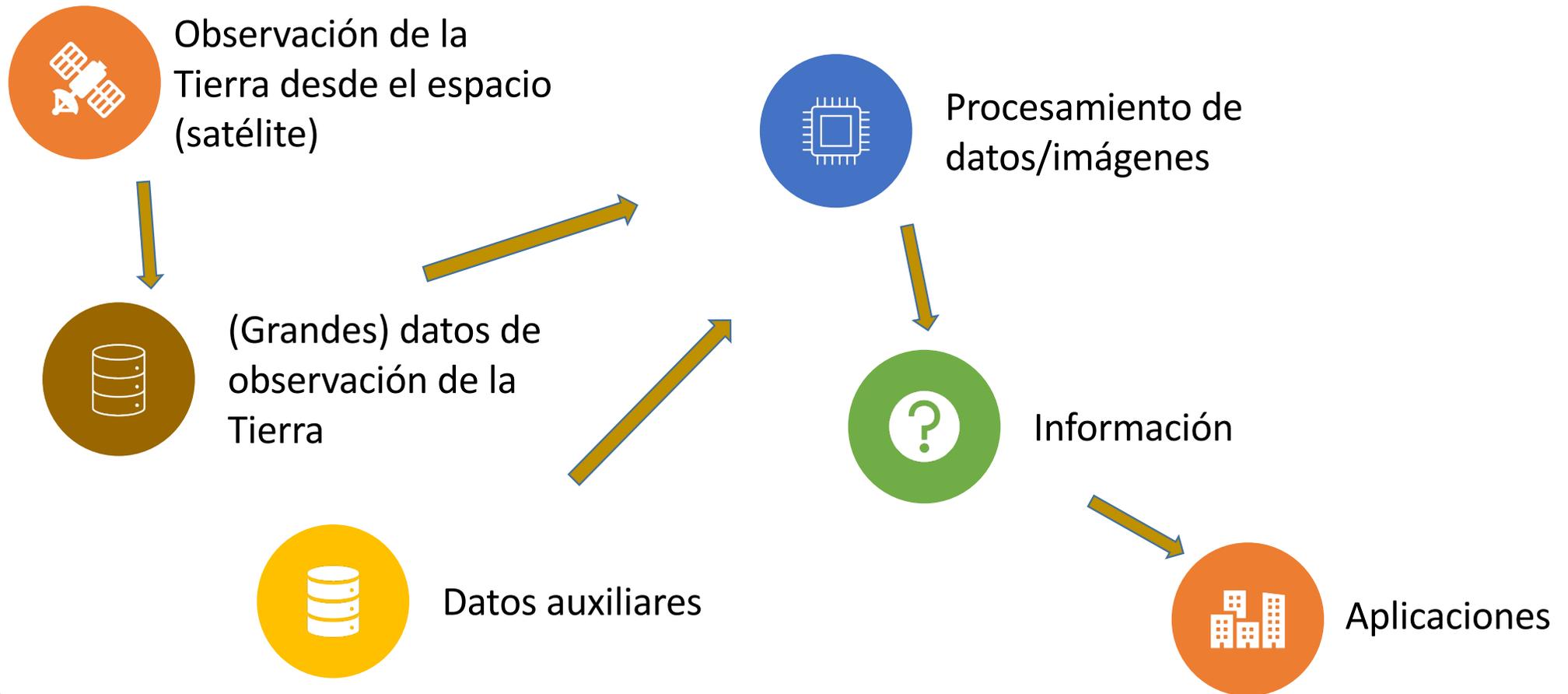


Extracción de información



UNIVERSITÀ DI PAVIA

Análisis de datos satelitales



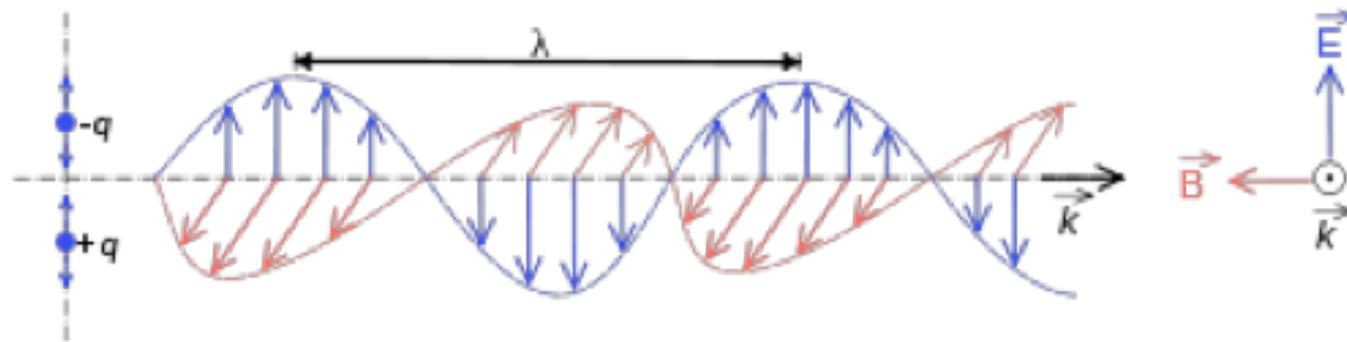
Teledetección

- Observación de las características de la materia y de las cantidades físicas (“detección”) desde lejos (“Tele”)
- La teledetección para la observación de la Tierra significa
 - detectar variables físicas en la superficie de la Tierra,
 - utilizando sensores distantes – satellite-based



La radiación electro-magnetica

- La radiación EM (incluida la luz) es una onda que se propaga a aproximadamente $3 \cdot 10^8$ km por segundo, compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético, que oscilan juntos.



$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c/n}{f} = \frac{c}{nf}$$

c = velocidad de la luz

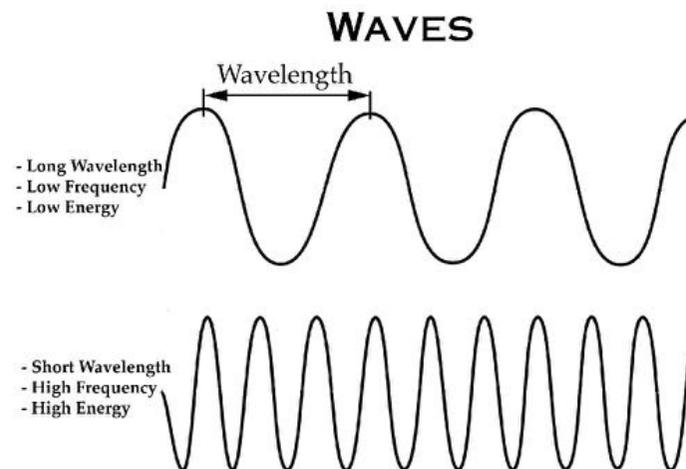
n = índice de refracción



Longitud de onda

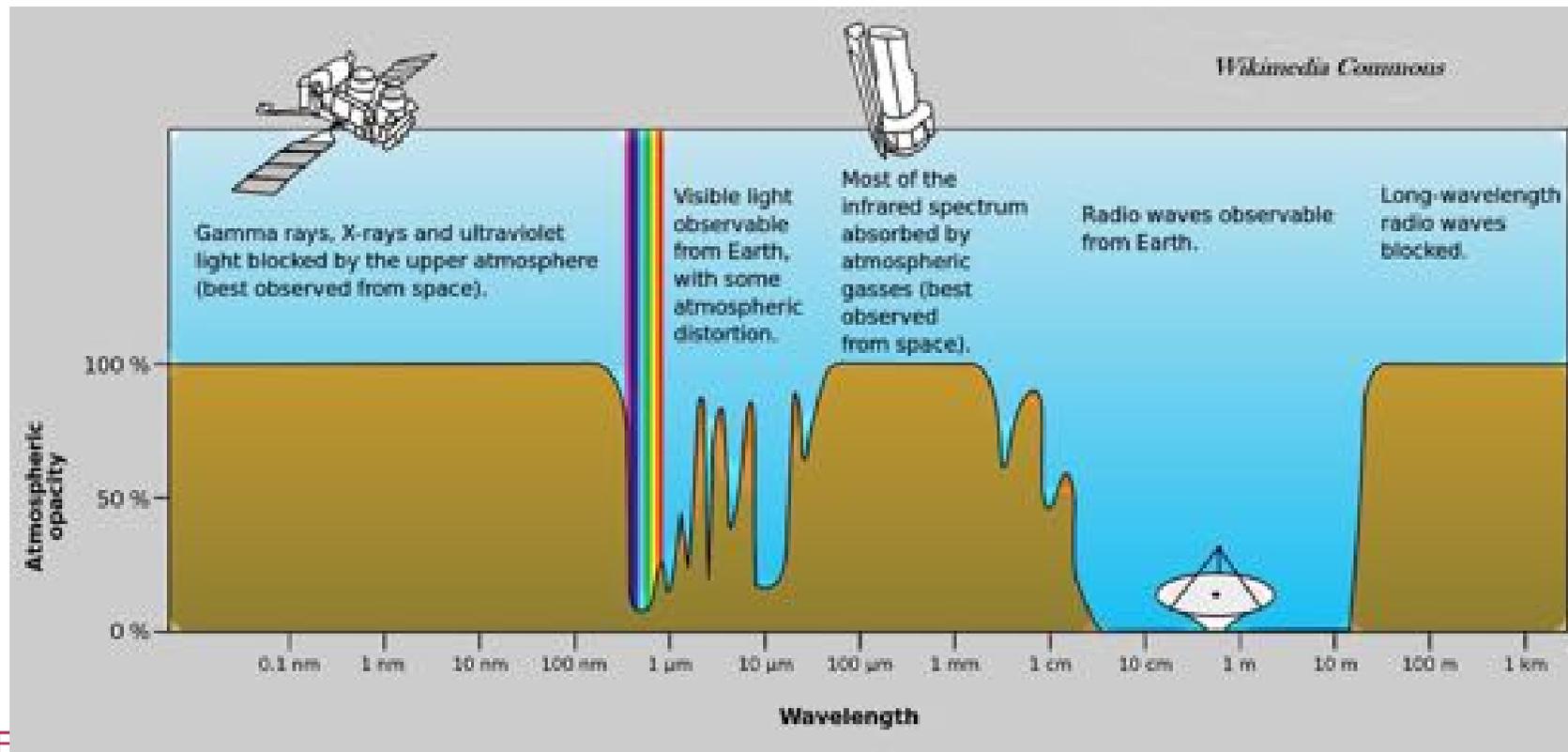
- El parámetro de longitud de onda λ y su parámetro de frecuencia “gemelo” f son de suma importancia
- Su valor determina la interacción específica entre la radiación y los “objetivos”
- Este hecho es un hito BÁSICO en el conocimiento de la Teledetección

*diferentes
interacciones
con el objetivo*



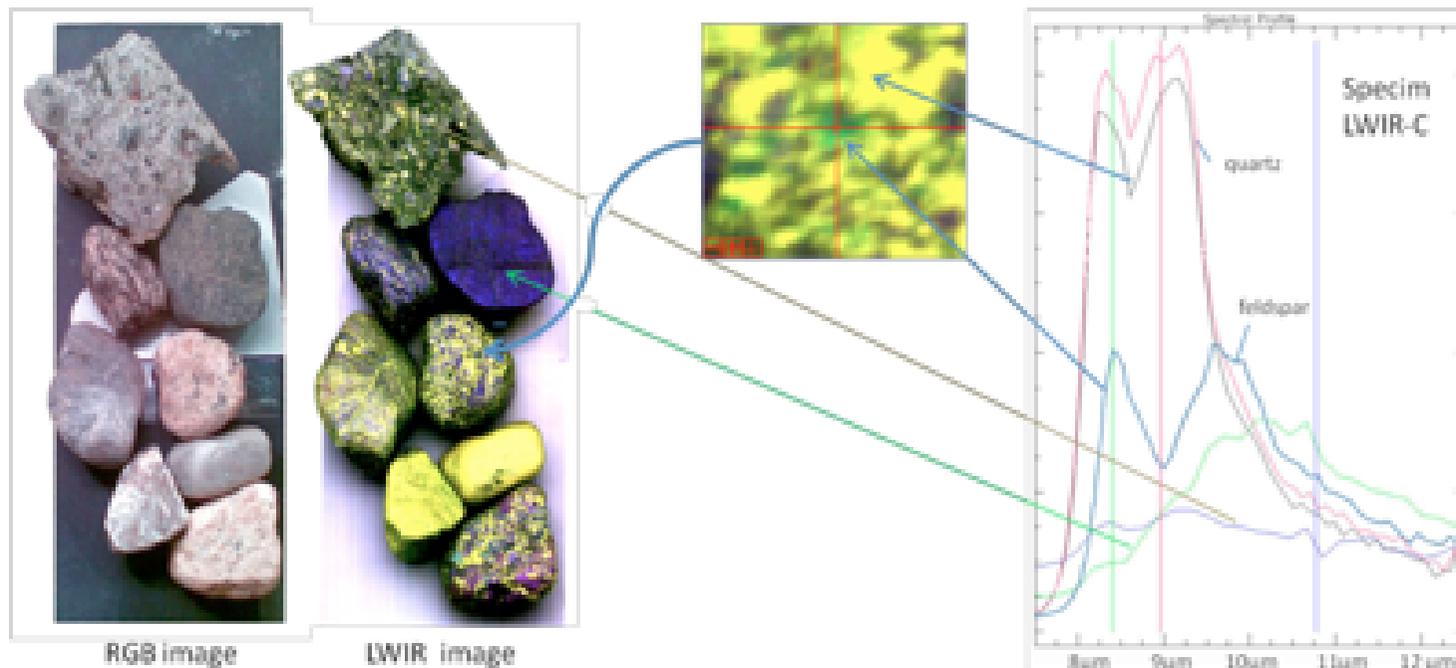
Longitud de onda

- Importante por las “ventanas” atmosféricas ...



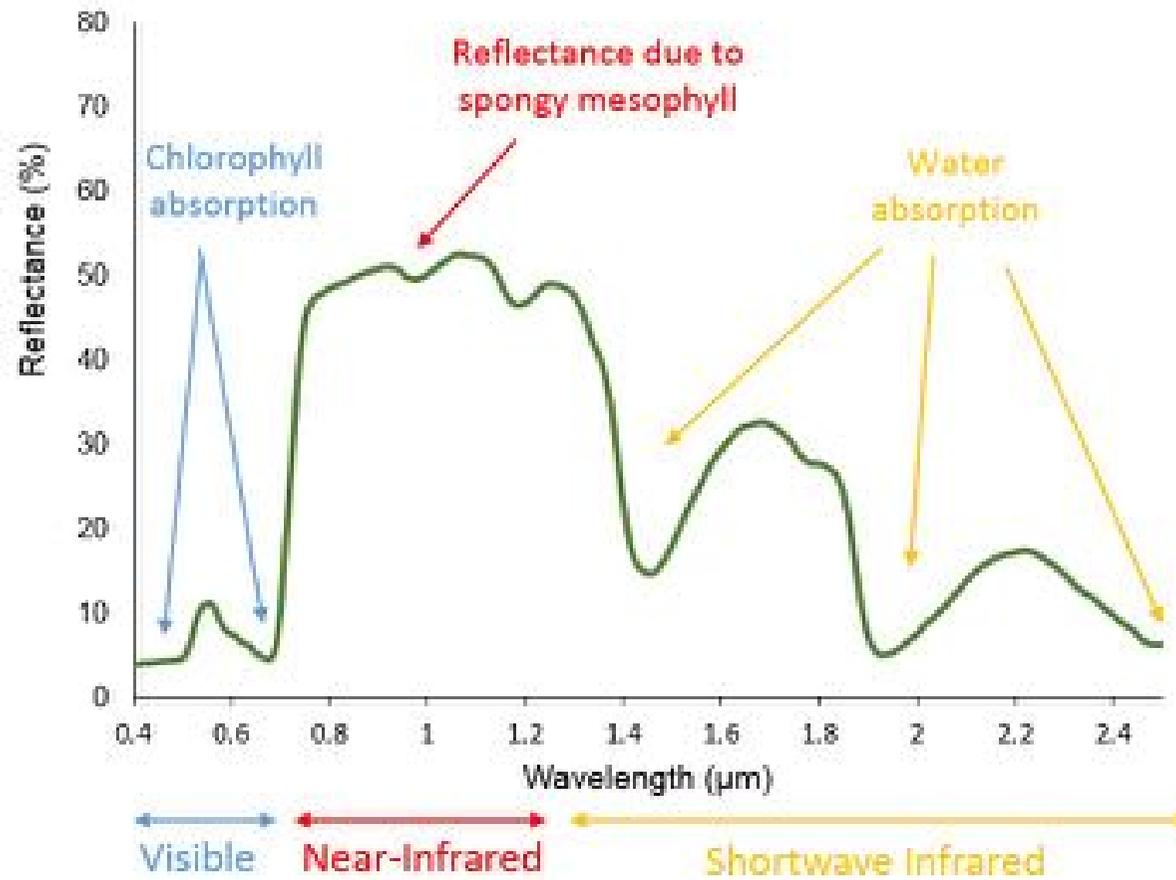
Reflectancia espectral

- ... ¡pero especialmente debido al comportamiento dependiente de λ de los objetivos!



Curva de reflectancia de la vegetación

http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/images/veg-reflect.PNG



Fuentes electromagnéticas

- Todos los cuerpos por encima de los 0°K, debido al movimiento térmico microscópico, emiten radiación electromagnética de forma espontánea
- La emitancia asociada se denomina exitancia [$W \cdot m^{-2}$]
- División por longitud de onda: exitancia espectral [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]



La ley de Planck

- Consideremos un CUERPO NEGRO, es decir, un cuerpo que absorbe toda la radiación entrante: es posible calcular su exitancia espectral.:

Planck Law:

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

M_{λ} = emitancia espectral [W m^{-3}]

λ = longitud de onda [m]

T = temperatura [$^{\circ}$ K]

h = 6.626068×10^{-34} [$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]



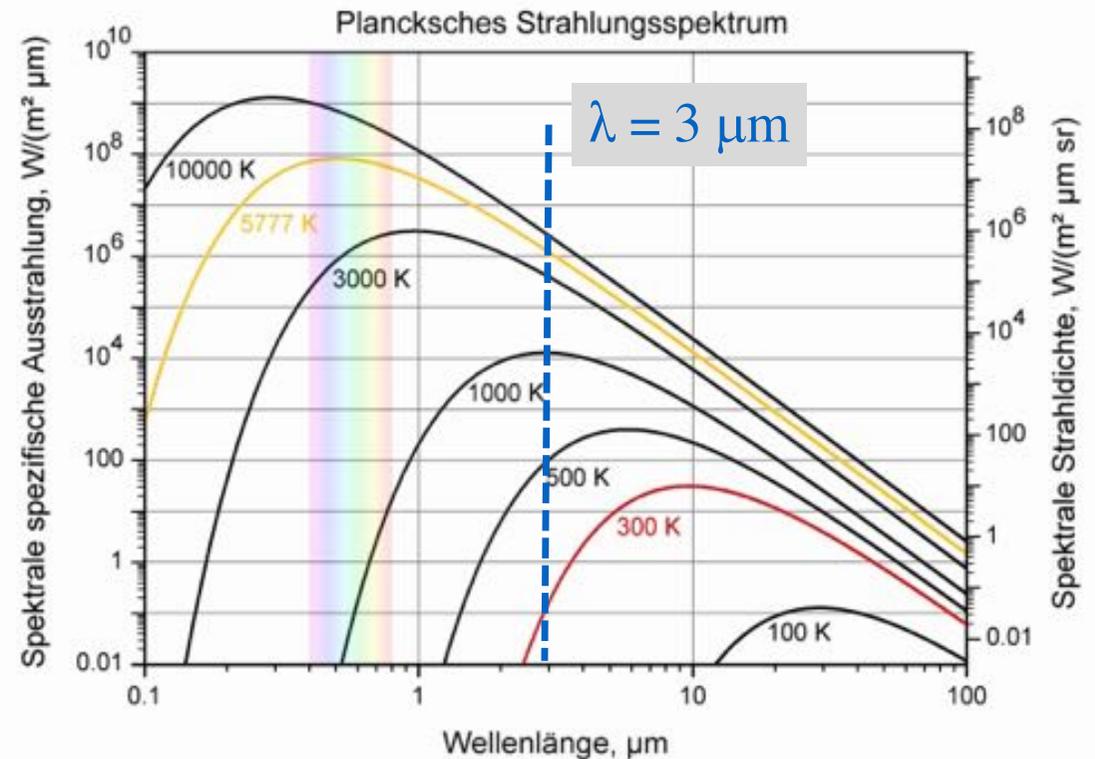
Fuentes de radiación electromagnética ambiental

- Excitación espectral de dos cuerpos negros a temperaturas promedio (superficiales) de la Tierra (rojo) y el Sol (amarillo)

Se puede colocar un límite (suave) a $3 \mu\text{m}$, que separe las áreas con:

Radiación producida únicamente por el sol

Una mezcla de radiación producida por el sol y la Tierra



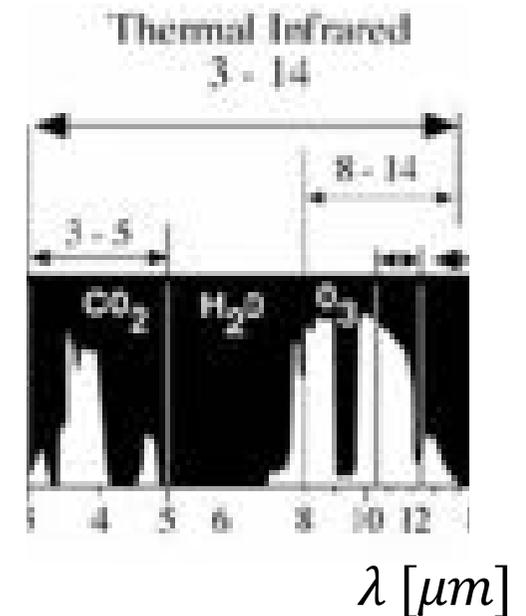
IR diferentes

- Infrarrojo REFLEJADO:

- **El infrarrojo cercano (NIR)** se comporta igual que la luz visible, se refleja en la superficie de la Tierra y, como tal, lo detectan los instrumentos de observación de la Tierra.
0,75-1,4 μm
- **Infrarrojo de onda corta (SWIR)**. 1,4-3 μm

- Infrarrojo EMITIDO:

- **Infrarrojo de longitud de onda media (MWIR o IIR)**: 3-8 μm
- **Infrarrojo de longitud de onda larga (LWIR)**: 8-15 μm



Valores de ToA y del nivel del mar

- La atmósfera tiene un efecto de filtrado sobre la radiación que pasa a través de ella
- Debe quedar claro si se hace referencia a la situación por encima o por debajo de la atmósfera
- Las variables físicas se denominan de forma diferente, por ejemplo, radiancia:
 - Radiancia en la parte superior de la atmósfera (ToA)
 - Radiancia a nivel del mar



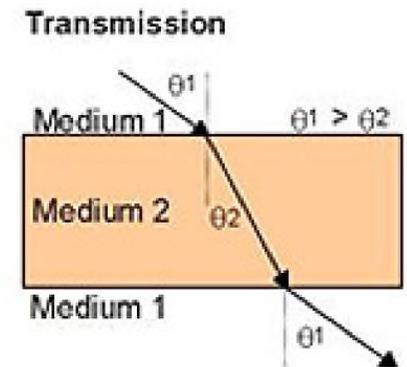
Interacción con los medios y los destinatarios

- Durante su recorrido desde la fuente hasta el objetivo y luego hasta el sensor, la radiación electromagnética interactúa de diversas maneras con:
 - el medio que atraviesa y
 - los objetos que encuentra
- Podemos distinguir al menos 4 fenómenos relevantes para analizar:
 - Transmisión
 - Dispersión
 - Absorción
 - Reflexión
- Todos estos fenómenos son, en principio, dependientes de λ



Transmisión

- La radiación pasa a través de un medio (en la EO generalmente la atmósfera, pero también puede ser agua) hasta el siguiente medio
- Desde el punto de vista de la EO, un fenómeno de dos facetas:
 - La transmisión atmosférica es útil (permite que la señal útil sobreviva)
 - La transmisión al objetivo es indeseable (destruye la información)
- En la atmósfera, la transmisión es complementaria a la absorción
- ¡DEPENDE de λ ! Los materiales transparentes no lo son en ninguna longitud de onda; por ejemplo, el agua es opaca a la luz IR.



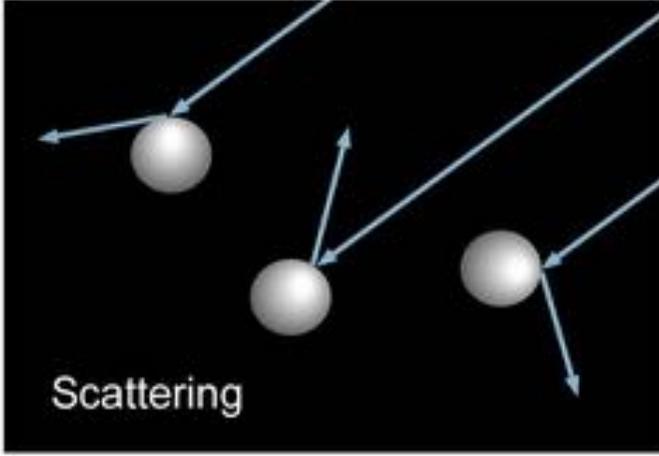
Dispersión

- Un medio con variación aleatoria y microscópica de parámetros genera fenómenos de dispersión, es decir, redirección aleatoria de una fracción de la radiación
- En función de las características de la no homogeneidad, la dispersión puede ser dependiente de λ
- La atmósfera contiene tales no homogeneidades (por ejemplo, gotitas suspendidas que alteran localmente el coeficiente de refracción) y, por lo tanto, genera fenómenos de dispersión
- En la EO, el efecto de la dispersión es generalmente una pérdida no deseada de contraste y un filtrado selectivo de λ



Dispersion

<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/images/scattering.jpg>



https://dsx.weather.com/util/image/w/Sunlight_CedarRiver_iWft_980x551.jpg?v=ap&w=980&h=551&api=7db9fe61-7414-47b5-9871-e17d87b8b6a0



<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/d0/e7/2e/d0e72e762b2b2535f167ec062b5c0681.jpg>



Partículas suspendidas

- Las principales partículas que contribuyen a la dispersión atmosférica son:
 - moléculas de gas (0,01 μm)
 - aerosoles (0,1 – 1 μm)
 - gotas de nubes (1-10 μm)
 - cristales de hielo suspendidos (1-100 μm)
 - granizo (hasta 10 cm)
- La relación entre el tamaño de las partículas y la longitud de onda es fundamental para el comportamiento de dispersión.



Relación entre el radio y la λ

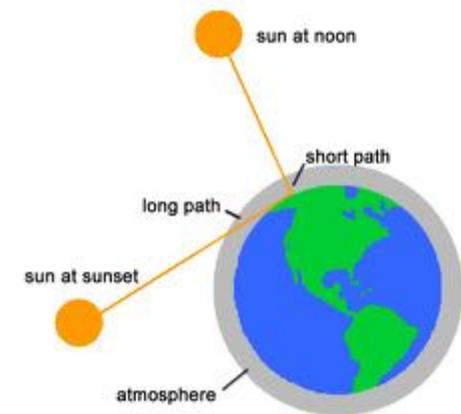
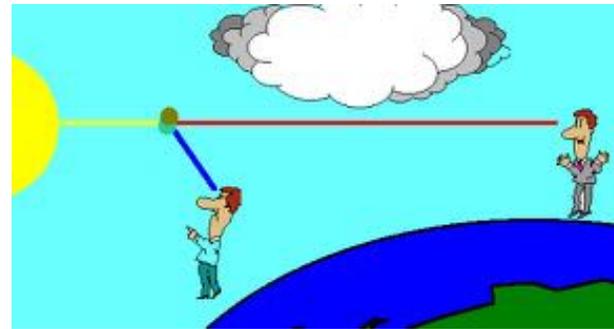
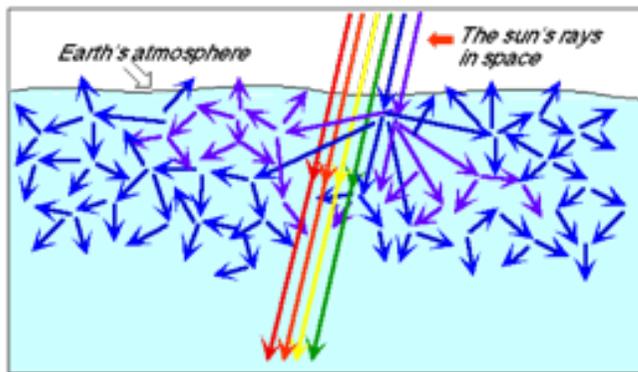
- Definamos: $\alpha = 2\pi r / \lambda$
- Entonces, los efectos de dispersión se informan para:
 - $\alpha < 0,1$ dispersión despreciable
 - $0,1 < \alpha < 1$ dispersión de Rayleigh
 - $1 < \alpha < 10$ dispersión de Mie
 - $\alpha > 10$ óptica geométrica



Dispersión de Rayleigh

- Patrón de radiación isotrópica
- más eficaz en longitudes de onda más cortas:
- explica el color azul del cielo y el aspecto rojizo del sol al atardecer:

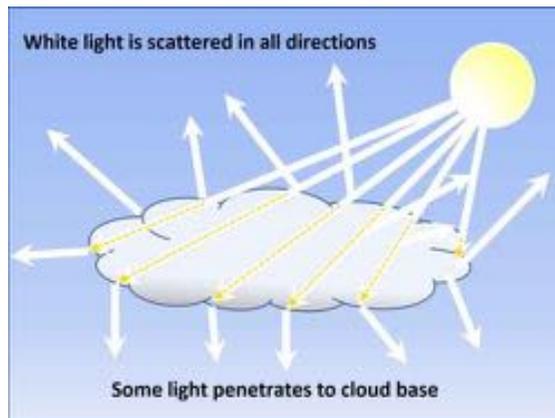
$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$



<http://atopos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/images/scattering.gif>

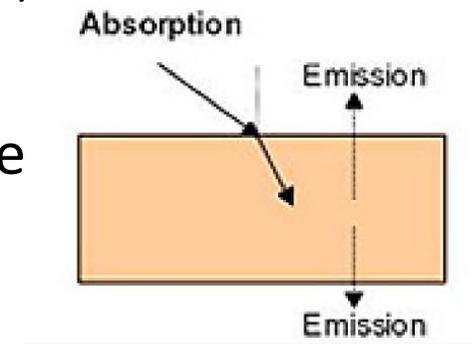
Efectos de dispersión de Mie

- Dispersión anisotrópica, lóbulo principal en dirección de tránsito
- Casi ninguna sensibilidad a la longitud de onda
- La dispersión de Mie hace que las nubes sean blancas y opacas

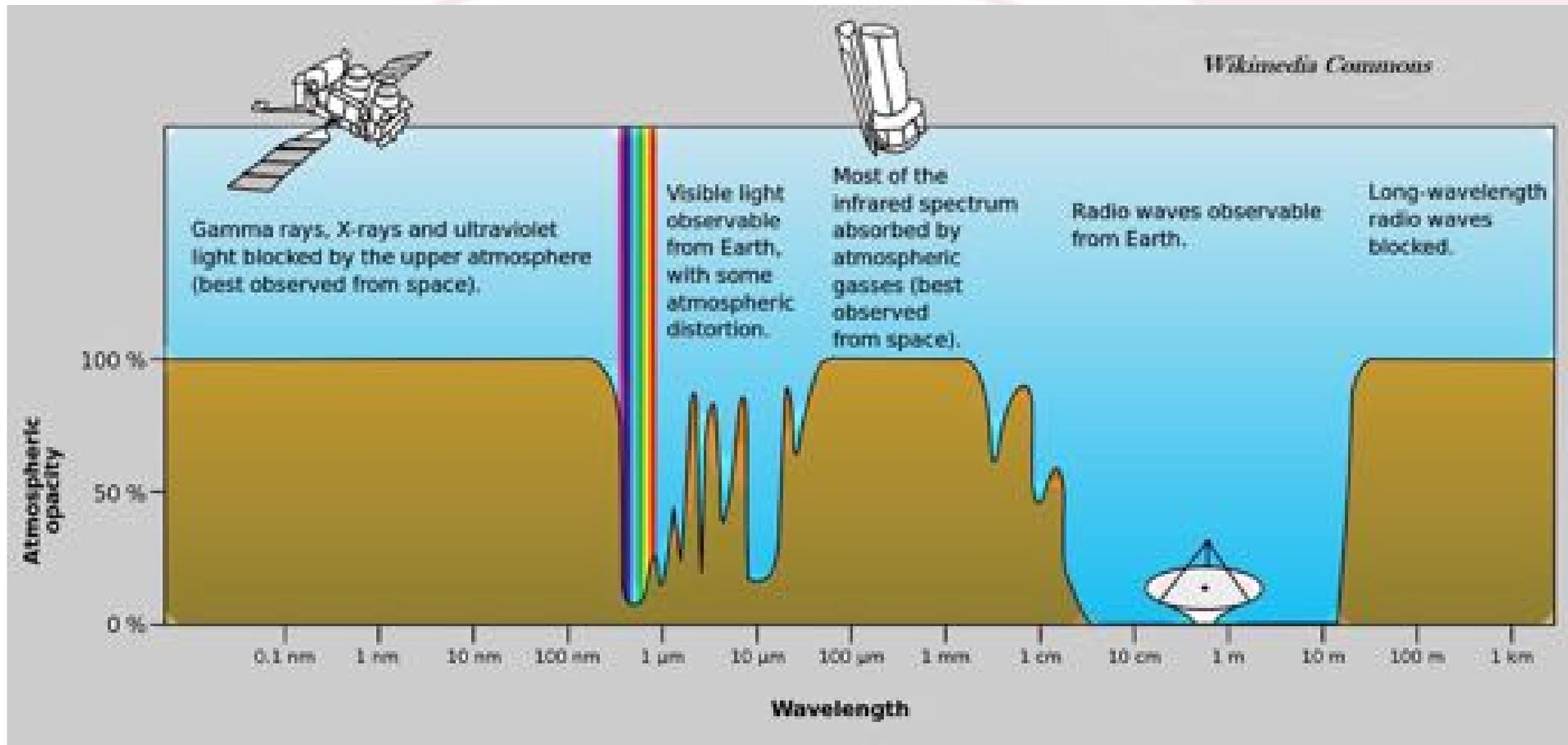


Absorción

- La radiación es absorbida por el objeto o medio y posiblemente convertida en otras formas de energía (normalmente calor) o reemitida con un λ diferente
- Desde el punto de vista de la EO, un fenómeno de dos facetas:
 - [?] La absorción atmosférica es indeseable (debilita la señal útil)
 - [?] La absorción del objetivo es útil (recopila información)
- Dispersión atmosférica \approx absorción, porque reduce llega al objetivo o al sensor

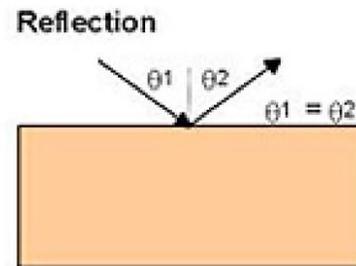


Absorción atmosférica (+ dispersión)



Reflexión

- Reemisión de la radiación entrante en el mismo lado.



- La radiación saliente tiene características que dependen de las características del objetivo => lleva INFORMACIÓN sobre el OBJETIVO



Balance energético

- La potencia electromagnética que incide sobre una superficie determinada sólo puede ser absorbida, reflejada o transmitida:

$$R_i = R_a + R_r + R_t$$

- Las relaciones adimensionales entre cada término de la derecha y la potencia incidente se denominan absorbancia (α), reflectancia (ρ) y transmitancia (τ), respectivamente.
- ¡La absorbancia está vinculada a las características físicas y químicas del objetivo!



Balance de potencia espectral

- Suponiendo que no se produce ningún fenómeno no lineal (lo que en general es razonable), el equilibrio puede especializarse en cada $d\lambda$
- las razones adimensionales citadas se convierten en:
 - absorbancia espectral,
 - reflectancia espectral y
 - transmitancia espectral
- siendo su dimensión la de los números puros

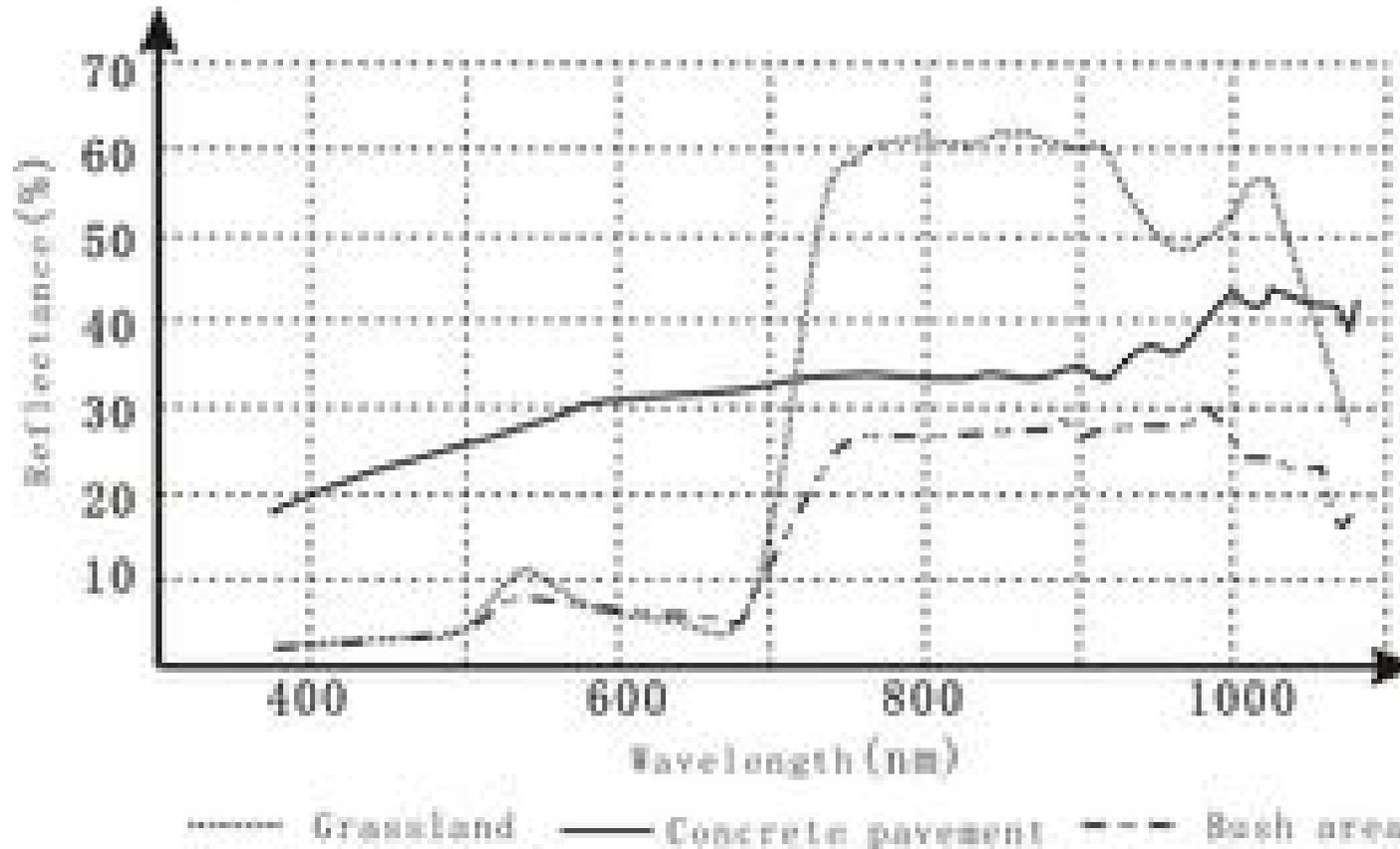


“Curvas de reflectancia”

- La reflexión, que se debe a interacciones electromagnéticas microscópicas entre la onda incidente y el material iluminado, generalmente dependerá de λ
- Para cualquier material dado, la reflectancia dependerá de la longitud de onda incidente
- Si se dispone de un número razonable de adquisiciones, es posible delinear la reflectancia como una función de λ , obteniendo así las llamadas "curvas de reflectancia"
- En EO, el intervalo considerado es generalmente de 0,4 a 2,5 μm .



Curvas de reflectancia en EO

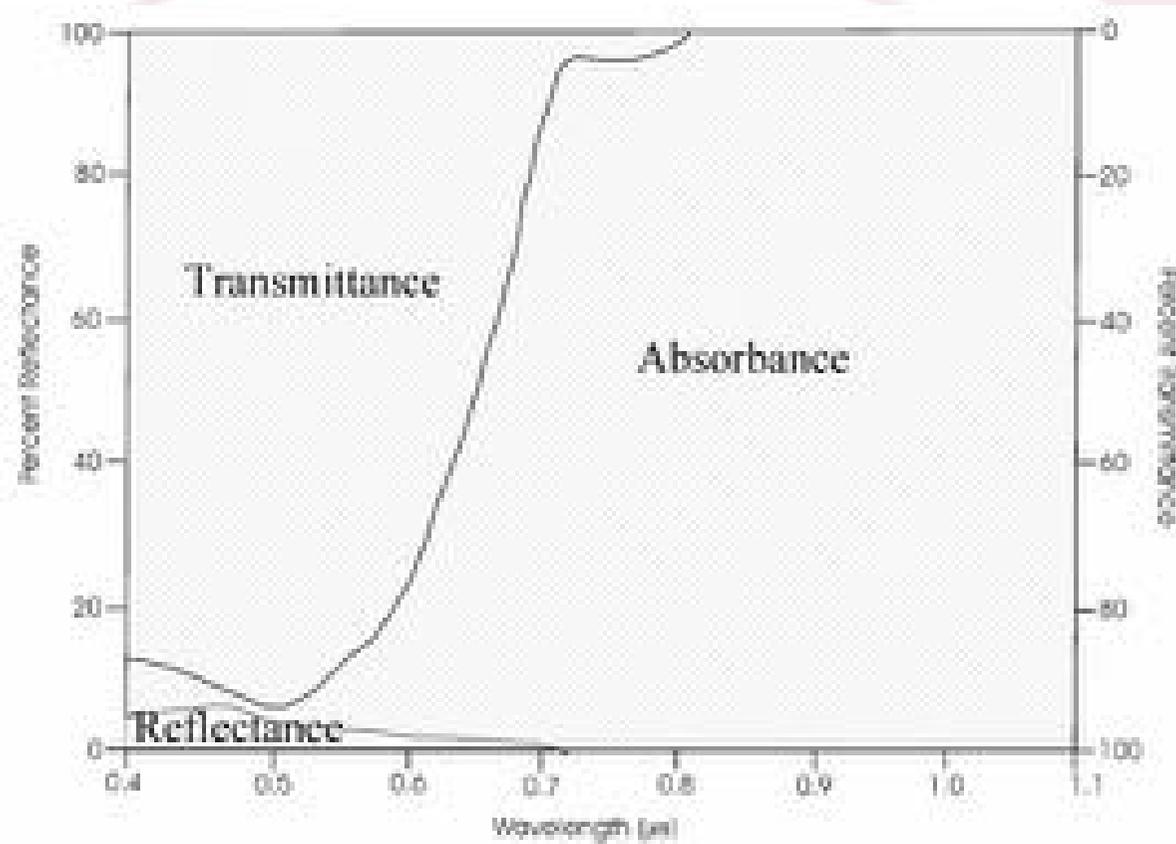


Agua

- El agua es un caso especial:
 - El agua transmite radiación, lo que significa que la reflectancia y la absorbancia ya no están estrechamente vinculadas: ya no se puede estimar de manera confiable una curva de reflectancia
 - La superficie lisa del agua provoca una reflexión especular: esto puede traducirse en saturación para el instrumento de adquisición
 - Se utilizan diferentes enfoques para analizar los cuerpos de aguas



Acqua chiara



<http://www.geol-amu.org/notes/m1r-1-8.htm>

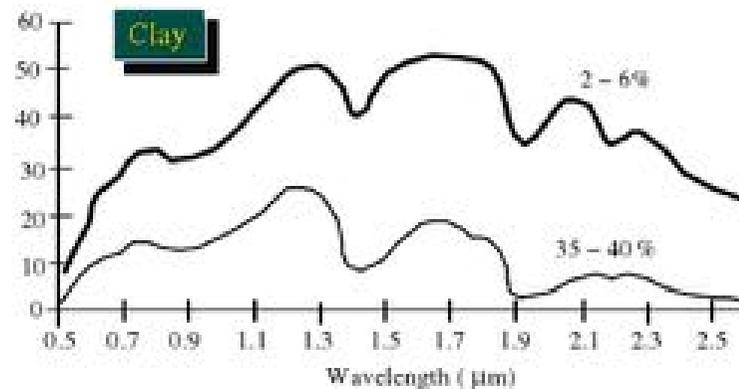
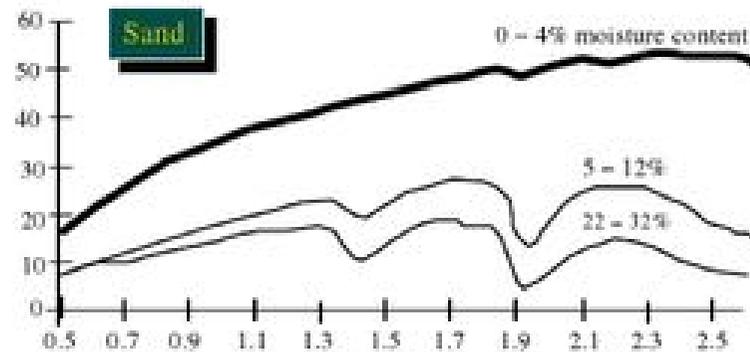


Reflectancia del suelo

From “remote sensing for soil science”, Harm Bartholomeus, Wageningen university

Water absorption features at:

- 1.4 μm
- 1.9 μm



Plataformas de observación de la Tierra

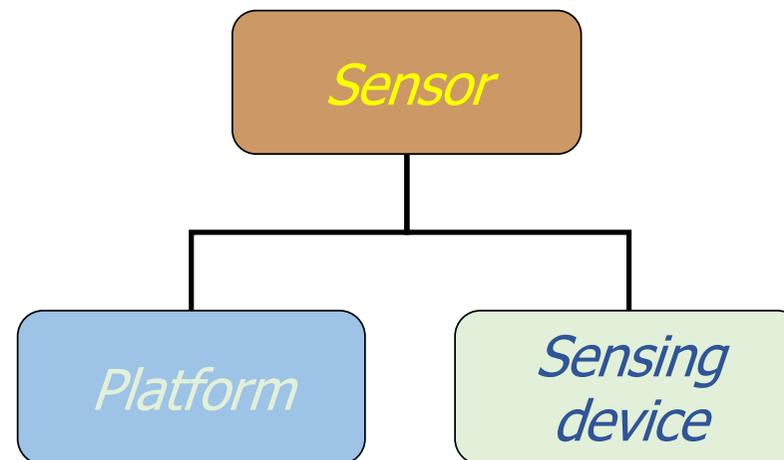


UNIVERSITÀ DI PAVIA



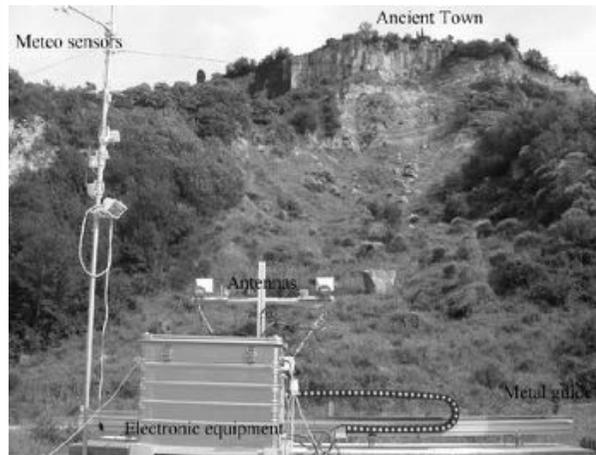
Plataforma versus instrumento

- El “sensor remoto” puede representarse idealmente como un instrumento de detección transportado y sostenido por una plataforma.



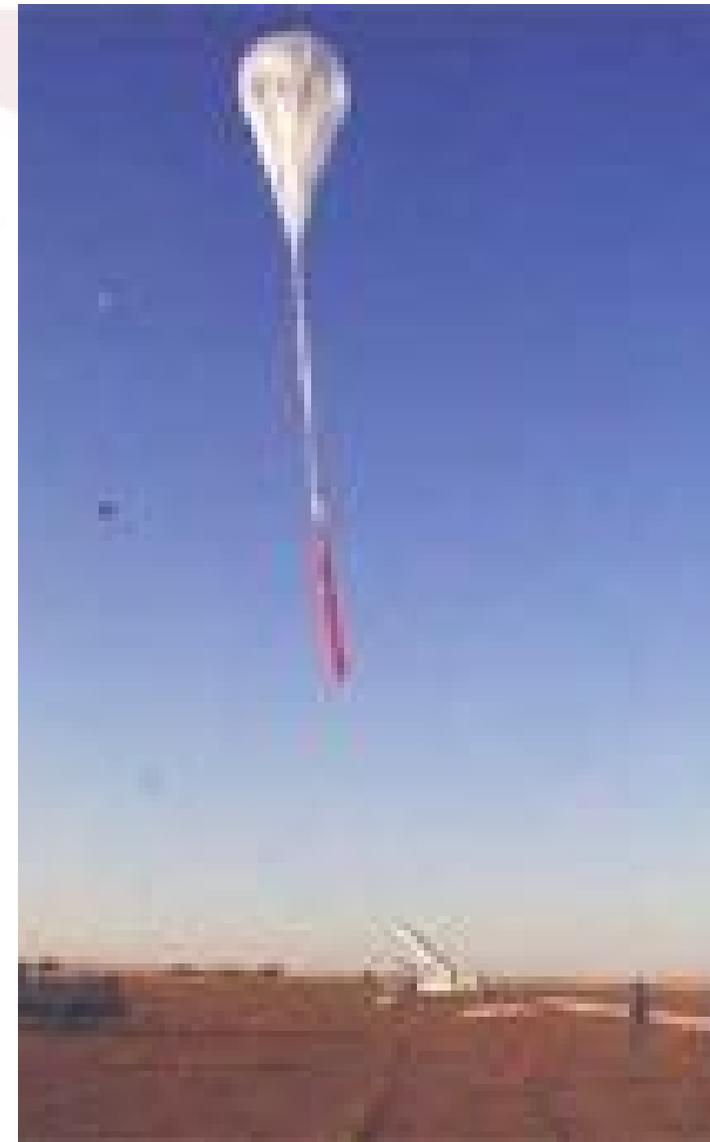
Teledetección terrestre

- La plataforma está unida a la superficie terrestre.
- Ejemplos: radar, radar meteorológico, GPR, GB-SAR, espectrómetros portátiles



<https://www.nssl.noaa.gov/tools/radar/>





RS aerotransportado

- Plataforma de vuelo: avión, UAV, helicóptero, cometa, globo...
- altitud: unos pocos m – 30/40 km
- p. ej. radar aerotransportado



Teledetección espacial

- Principalmente satélites artificiales, pero también otras naves espaciales (p. ej., transbordador espacial, para la misión SRTM).
- Altitud: 150 – 36.000 km
- Adquisición periódica
- Costos de diseño, producción y lanzamiento de altos a muy altos
- Costo por dato bajo



Sentinel-3 scans Earth's colour



RS espacial: dos segmentos

- Segmento espacial

- adquisición
- almacenamiento (temporal)
- enlace descendente



- Segmento terrestre

- control de misión
- recepción de datos
- corrección
- procesamiento



https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/01/Tinkerer_s_lab



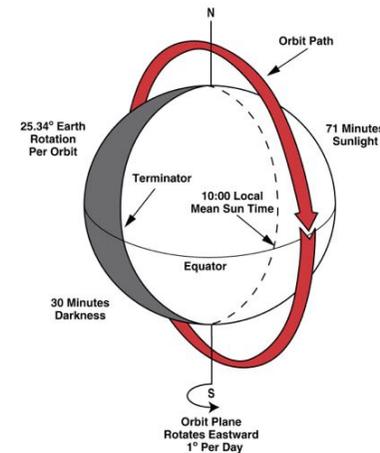
Órbitas de satélites



UNIVERSITÀ DI PAVIA

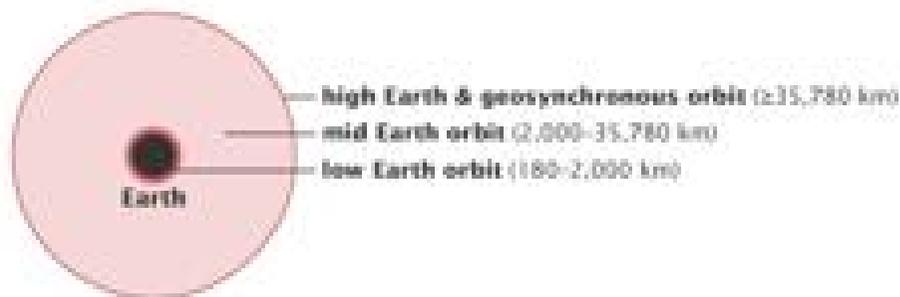
Geocentric Orbit

- Trayectoria repetitiva de un satélite alrededor de la Tierra, debido al equilibrio entre el peso y la fuerza centrífuga (debido a su movimiento)
- La atracción de la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la Tierra, mientras que la fuerza centrífuga es proporcional a la velocidad tangencial
- órbitas a mayor altitud → revolución más lenta



Tipos de órbita

- En términos de altura, es decir, distancia del satélite a la superficie de la Tierra:
 - Órbitas terrestres bajas (150 – 2000 km): satélites de observación de la Tierra (EO)
 - Órbitas terrestres medias (2000 – 35780 km)
 - Órbitas terrestres altas (≥ 35780 km): satélites de observación de la Tierra geostacionarios



<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/>



Repetición de adquisiciones

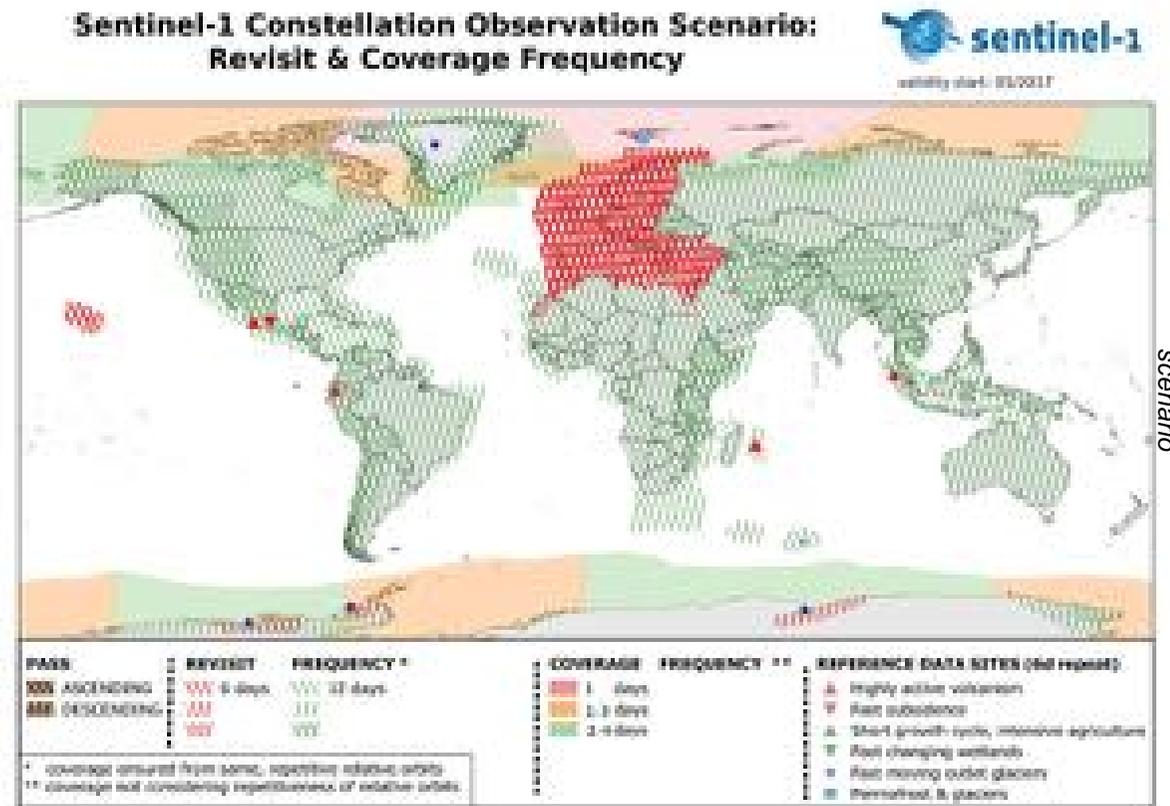
- **Ciclo de repetición:** después de una serie de órbitas, el punto subsatelital vuelve a recorrer su trayectoria (p. ej., para ENVISAT: 35 días)
- **Período:** tiempo necesario para completar una órbita (decenas de minutos para satélites LEO EO)
- **Frecuencia de revisión:** con qué frecuencia el satélite observará el mismo punto de la Tierra en las mismas condiciones de observación
- **Frecuencia de cobertura:** la frecuencia con la que el satélite adquirirá el mismo punto de la Tierra, en cualquier condición de observación



Ejemplo: Sentinel-1

The map describes the overall Sentinel-1 constellation observation scenario, in terms observation geometry, revisit and coverage frequency.

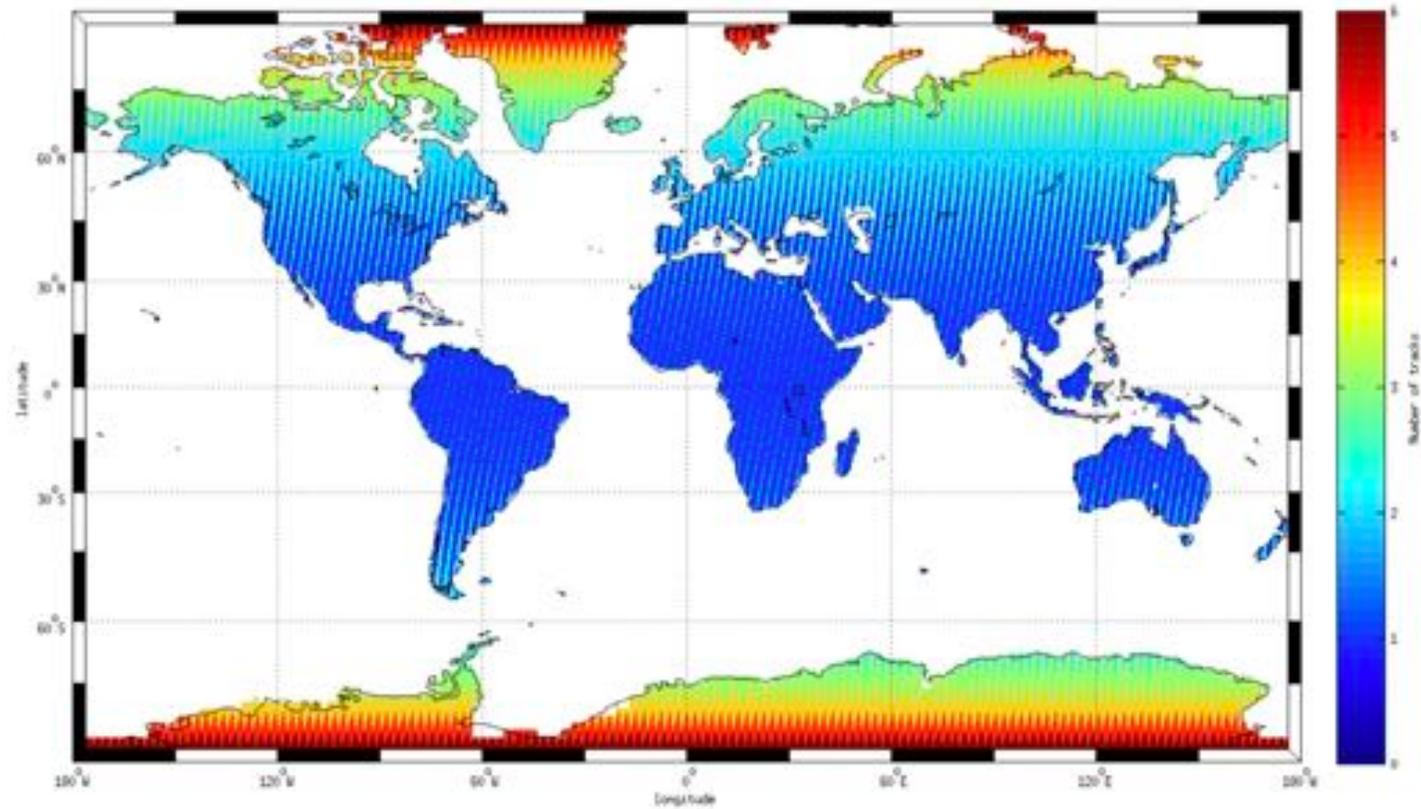
The situation is set to change (improve) as the European Data Relay System (EDRS) and new receiving stations are activated



<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>

Ejemplo: Sentinel-2

The figure shows the geometric revisit frequency due to the overlap between adjacent orbits (Credits: Pascal Lacroix)

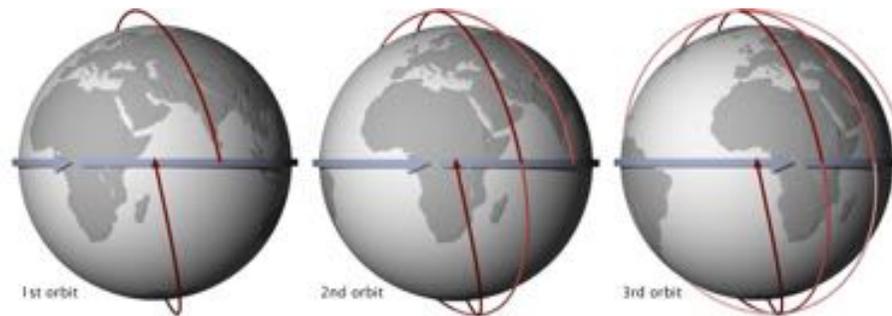


<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage>



Órbitas heliosincrónicas

- Órbitas de satélites casi polares que cubren cada área del mundo en un tiempo solar local constante ($l \approx 98^\circ$)

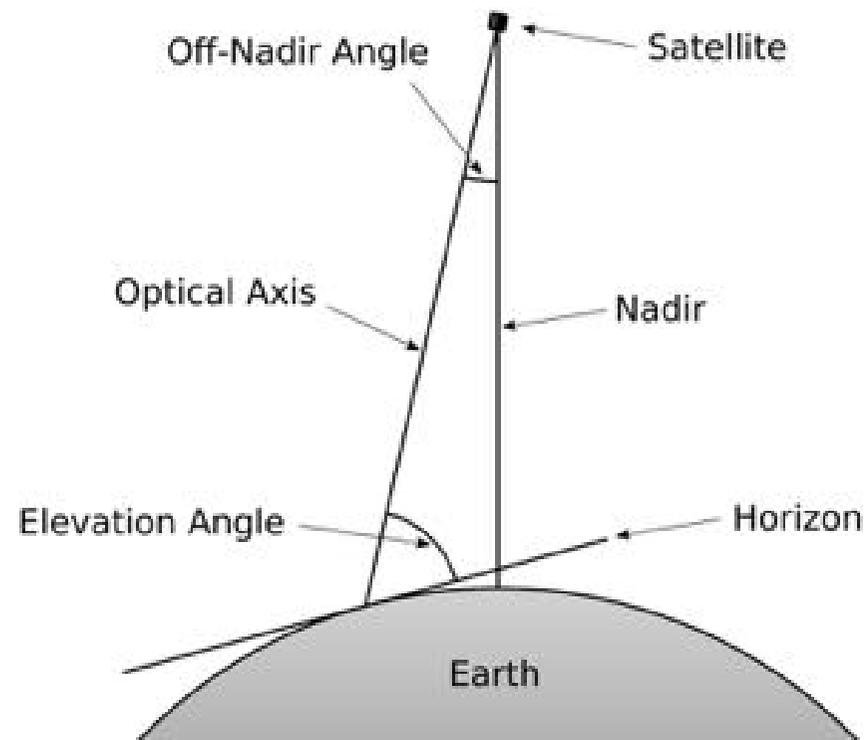


- En cualquier latitud dada, la posición del sol en el cielo cuando el satélite pasa por encima será la misma dentro de la misma estación (☑ consistencia de la iluminación)
- Esto también favorece el correcto funcionamiento de los paneles solares



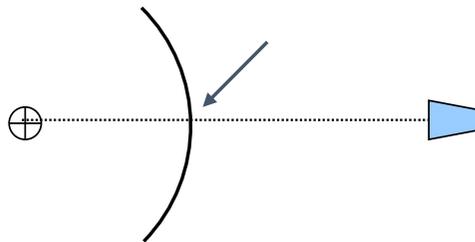
Definiciones de geometría satelital

https://3.bp.blogspot.com/-Bh0IE3LihtU/V4_i0loGIII/AAAAAAAAAAMA/GUJtbskkaXASuw3286VIEpC9sej3reZgwCKgBIs1600/offnadir2.png
<http://factsversustruthers.blogspot.it/>



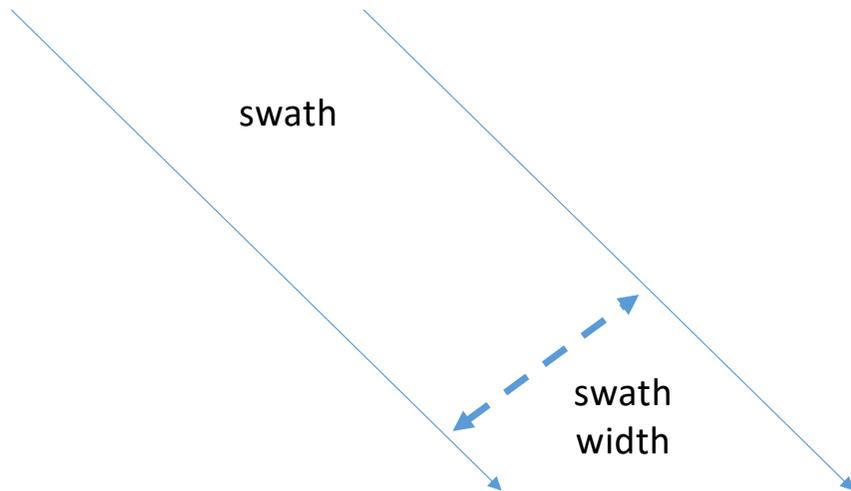
Nadir

- **Dirección del nadir:** hacia el centro de la Tierra
- **Punto nadir:** intersección entre la superficie de la Tierra y la línea que une el sensor con el centro de la Tierra
- **Imágenes “nadirales”:** el sensor apunta al nadir



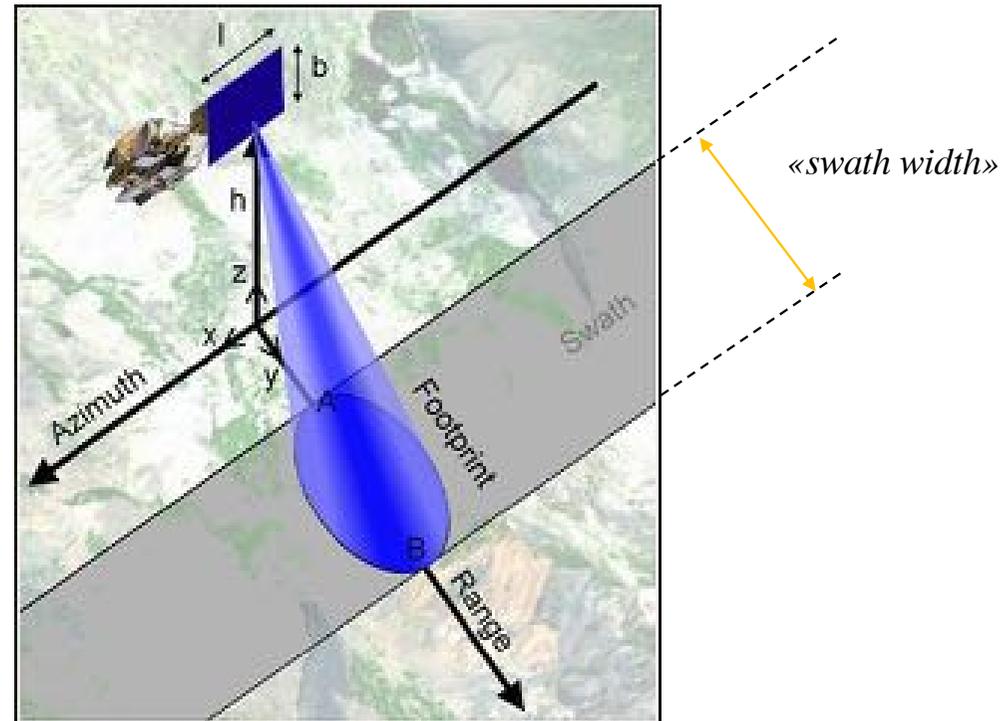
Swath

- **Swath** es la franja de la superficie de la Tierra detectada por un satélite EO y el ancho de la franja en sí



Range y azimuth

- Cuando sea relevante:
- la dirección del azimuth es la dirección del movimiento de la plataforma
- la dirección del range es perpendicular a la dirección del azimuth



Instrumentos de observación de la Tierra



UNIVERSITÀ DI PAVIA

Sensores

- En teledetección, un **sensor** es un dispositivo que puede registrar la potencia radiante entrante (o la radiancia entrante)
- El mismo término puede usarse en un sentido más amplio para identificar todo lo que sirve para “adquirir datos detectados de forma remota” (por ejemplo, puede incluir la plataforma junto con el sensor)
- Diferentes categorías, según las características de los sensores:
 - Diferentes mecanismos de funcionamiento
 - Diferentes características de los datos generados
 - Diferentes piezas de información recopiladas



Sensores pasivos

- El sensor depende de emisiones externas de ondas electromagnéticas
- Requiere un emisor externo (el Sol o el propio objetivo)
- Menor complejidad y consumo de energía
- Ejemplos: óptico multiespectral, óptico hiperespectral, dispersómetros de microondas, sensores de luz nocturna

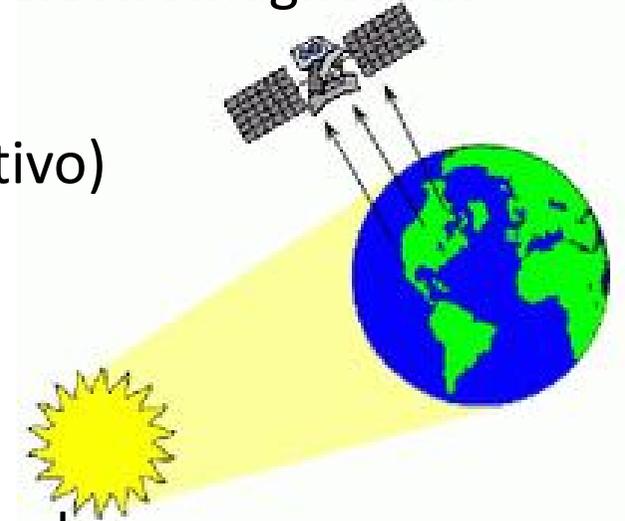


Photo camera

- CCD-based
- $400 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$
- Aplicaciones: fotogrametría, cartografía.



<http://www.vexcel-imaging.com/products/ultracam-eagle/>



<https://ultracam.wordpress.com/2014/04/03/updated-ultracam-osprey-nadiroblique-digital-aerial-camera-introduced-at-asprs-2014/>



UNIVERSITÀ DI PAVIA

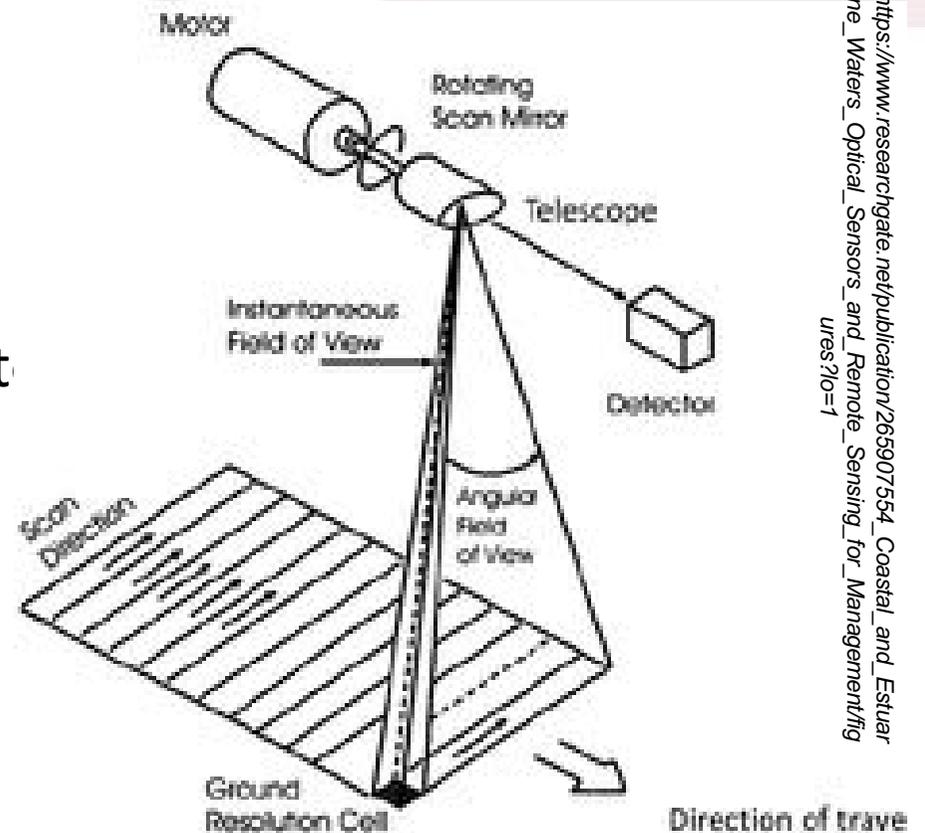
Scanning

- **scanning** es una alternativa a lo **framing**:
 - un píxel o un pequeño grupo de píxeles a la vez frente a
 - la adquisición simultánea de toda la escena
- En la observación de la Tierra, existen dos estrategias de escaneo principales:
 - Escaneo transversal a la trayectoria (**across-track**)
 - Escaneo a lo largo de la trayectoria (**along-track**)



Cross-Track / Whiskbroom scanning

- Uno o varios sensores
- Espejo giratorio
- Adquisición secuencial
- Aprovecha el movimiento hacia adelante



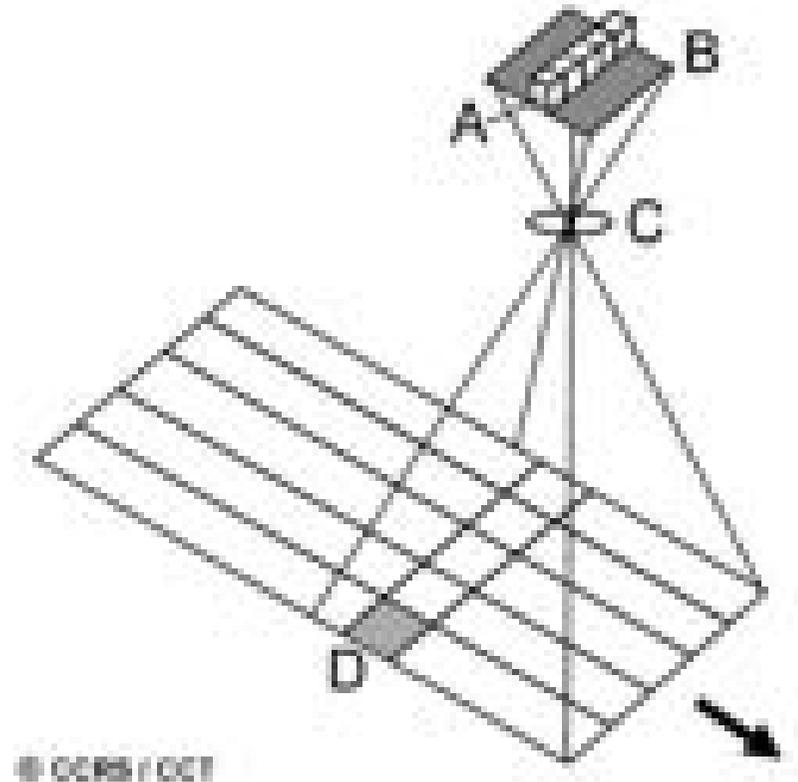
Angular field of view:

Airborne scanners: 90° - 120°

Satellite sensors: 10° - 20°

Along-track / pushbroom scanning

- Una fila de píxeles a la vez
- Estado sólido: movimiento hacia adelante debido únicamente a la plataforma



<http://www.nrcan.gc.ca/node/9337>



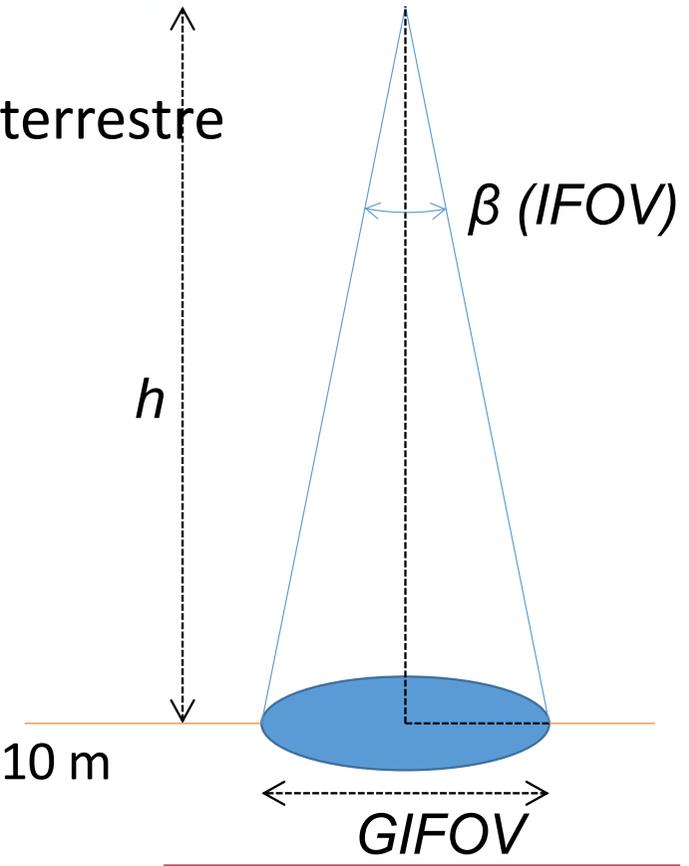
Tamaño del área observada

- GIFOV = Campo de visión instantáneo terrestre
- h = elevación del instrumento sobre la superficie terrestre

- $GIFOV = 2 \cdot h \cdot \tan(\beta/2)$

- Ejemplo por Sentinel-2:
 - Orbit height: 786 km (h)
 - Resolution 10, 20, 60 m

$$\rightarrow \beta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{GIFOV}{2h}\right) = 6.36132316 \times 10^{-6} \text{ rad @ 10 m}$$



Ejemplo LANDSAT ETM+

Picture and table from:
Introduction To The Physics and Techniques of Remote Sensing
 by Charles Elachi, Jakob J. van Zyl

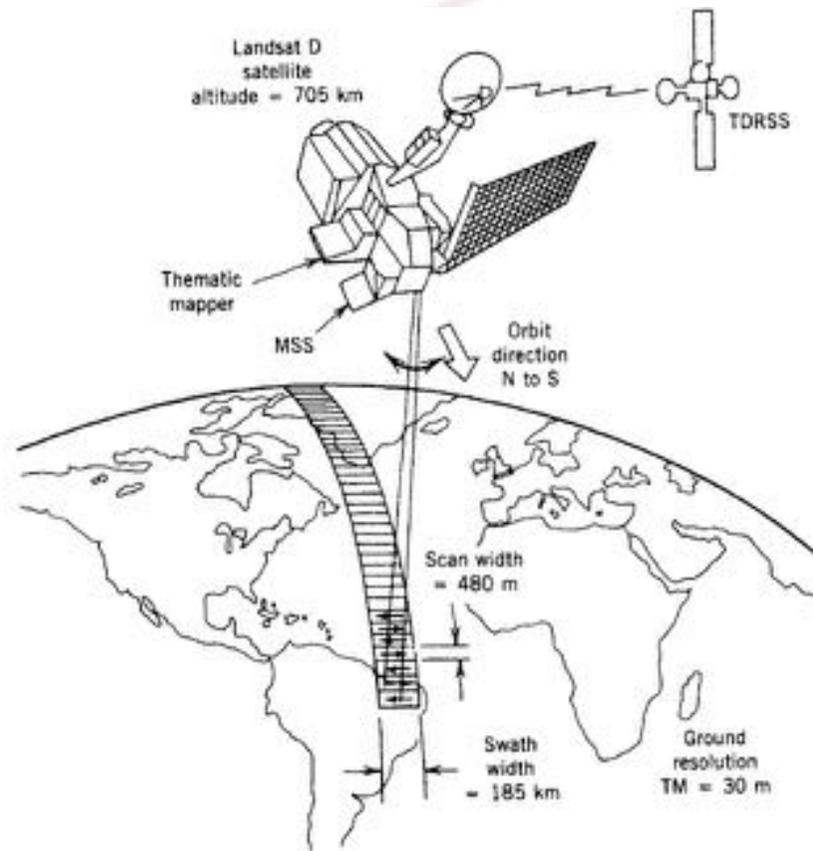


Figure 3-39. Landsat-D mapping geometry. (From Blanchard and Weinstein, © 1980 IEEE.)

Table 3-5. Significant ETM+ Parameters

| | |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Orbit | Sun synchronous 705.3 km altitude 98.9 min period 98.2° inclination 16 day repeat cycle |
| Scan | 185 km swath 7.0 Hz rate 85% efficiency |
| Optics | 40.6 cm aperture f/6 at prime focus 42.5 μ rad, IFOV, bands 1-4 f/3 at relay focus 43.8 μ rad IFOV, bands 5, 7 170 μ rad IFOV, band 6 |
| Signal | 52 kHz, 3 dB, bands 1-5, 7 13 kHz, 3 dB, band 6 1 sample/IFOV 8 bits/sample 84.9 Mbps multiplexed output |

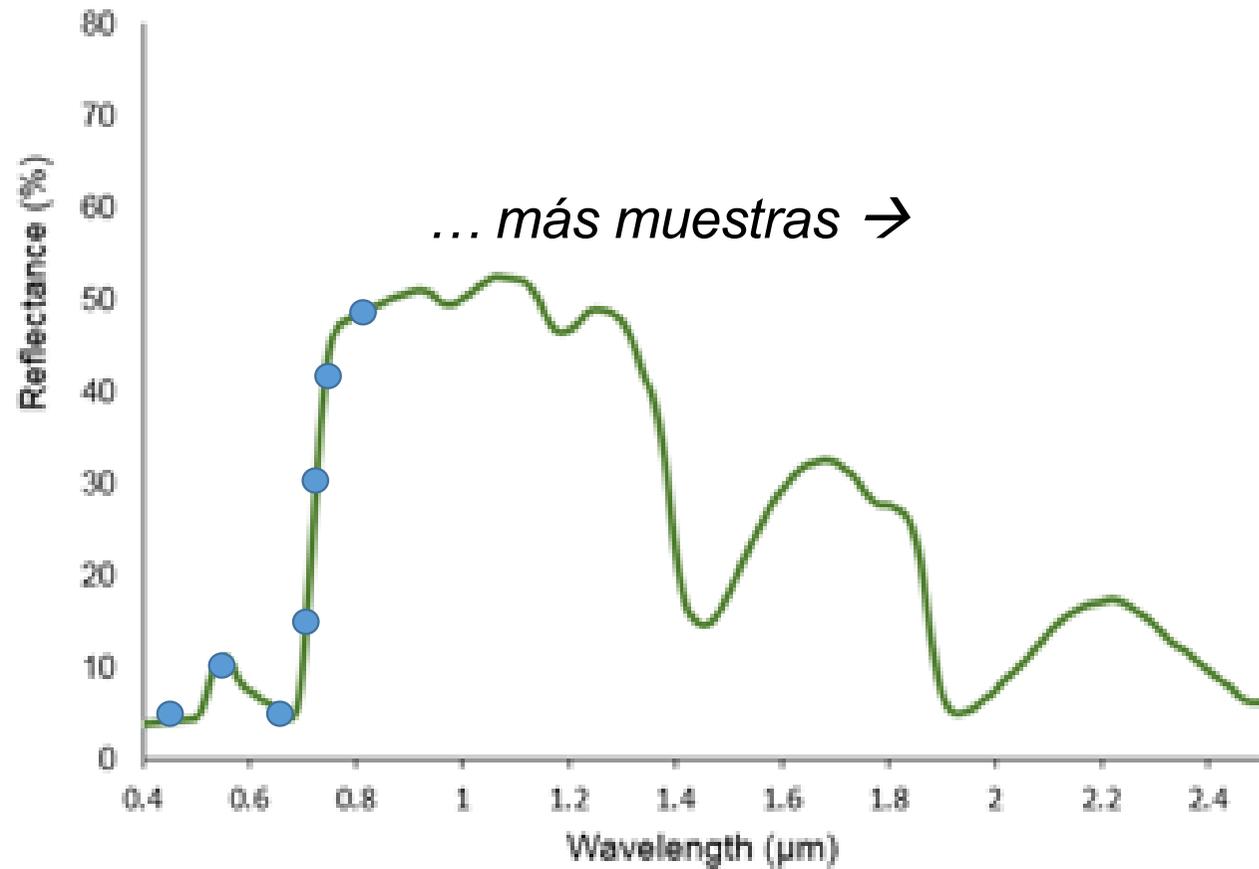
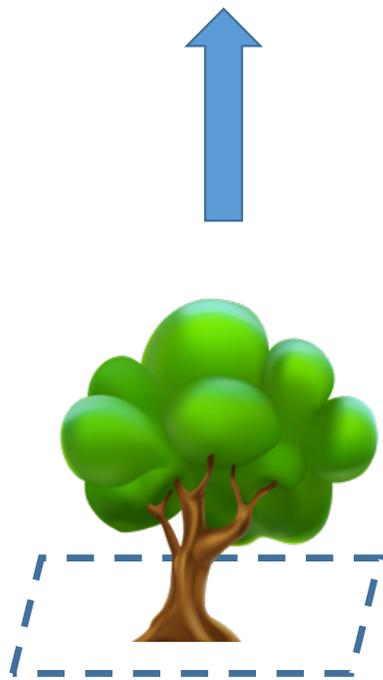


Sensores multispectrales

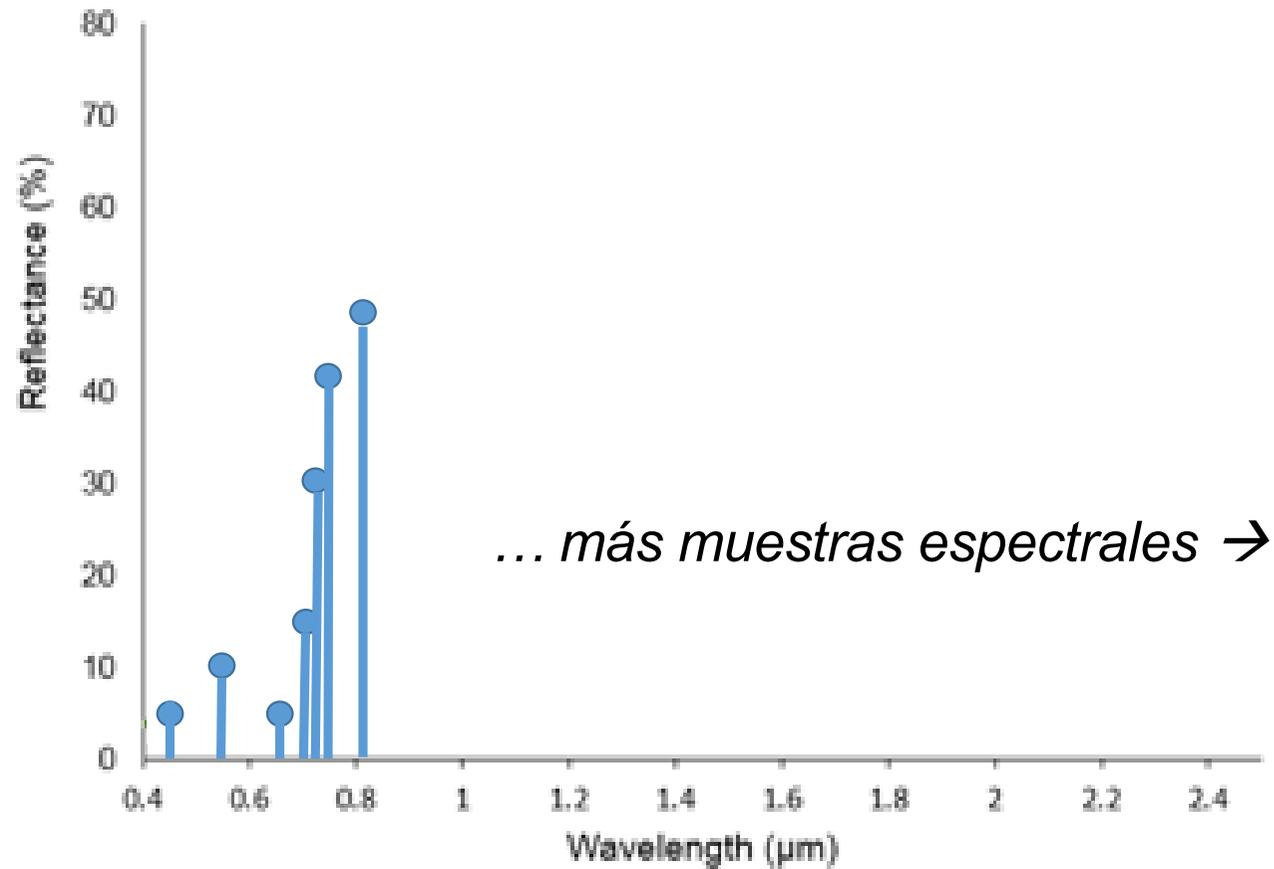
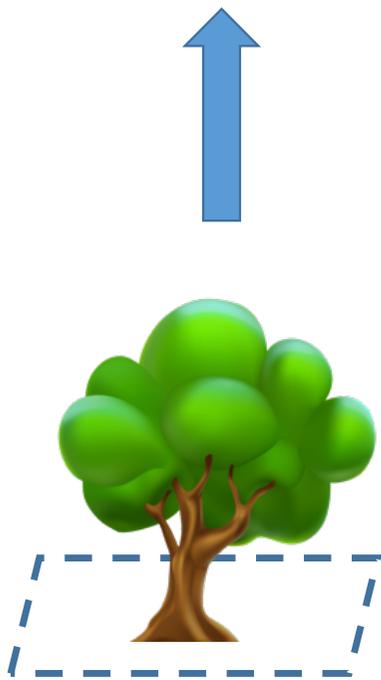
- Medición puntual de la radiancia incidente en diferentes longitudes de onda
- Diferentes longitudes de onda -> multispectral
- Características típicas:
 - pocas bandas (4-8)
 - ancho de banda de alrededor de 100 nm (¡3 bandas en el rango visible!)



Reflectancia de la vegetación

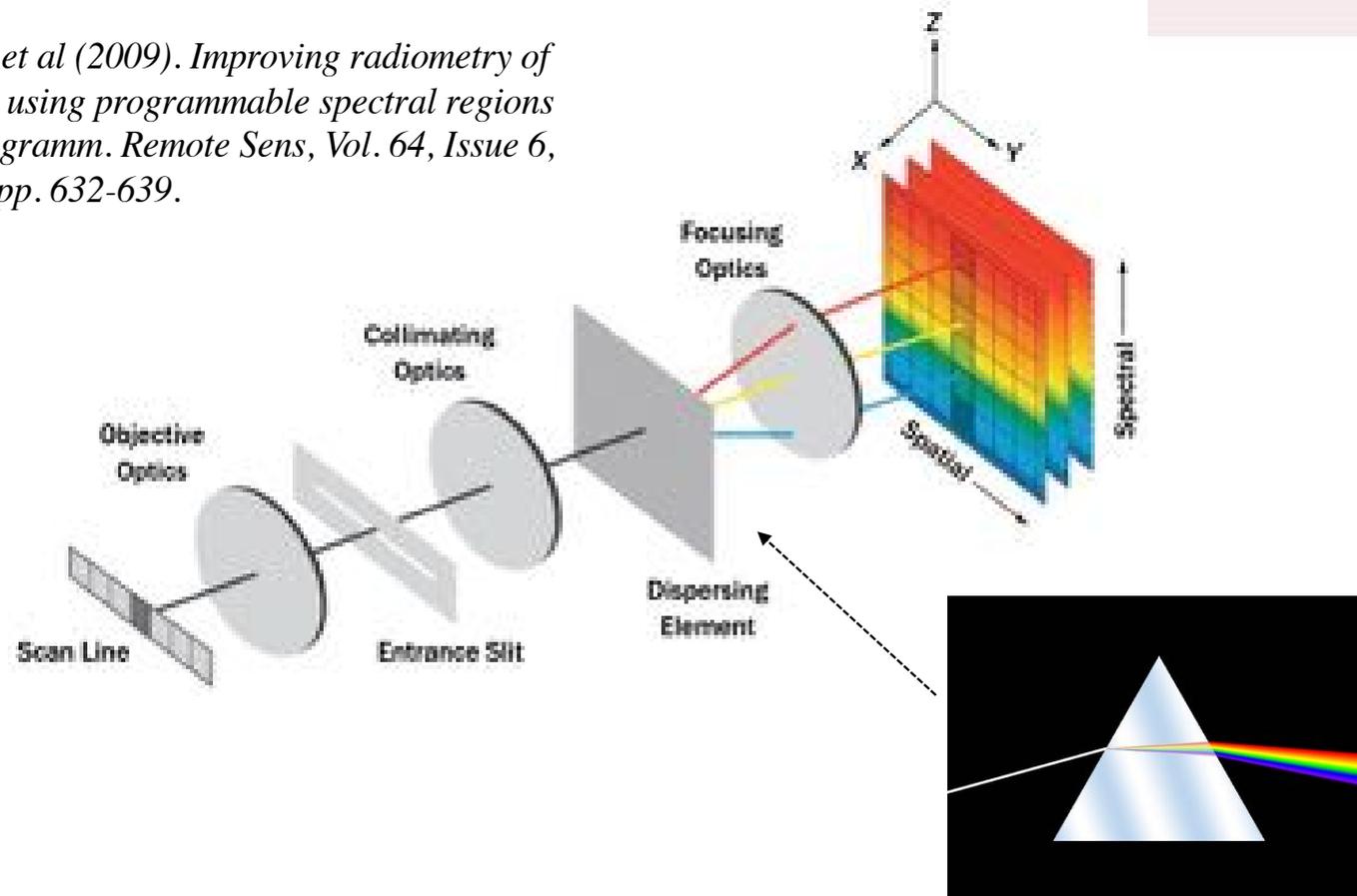


Reflectancia de la vegetación



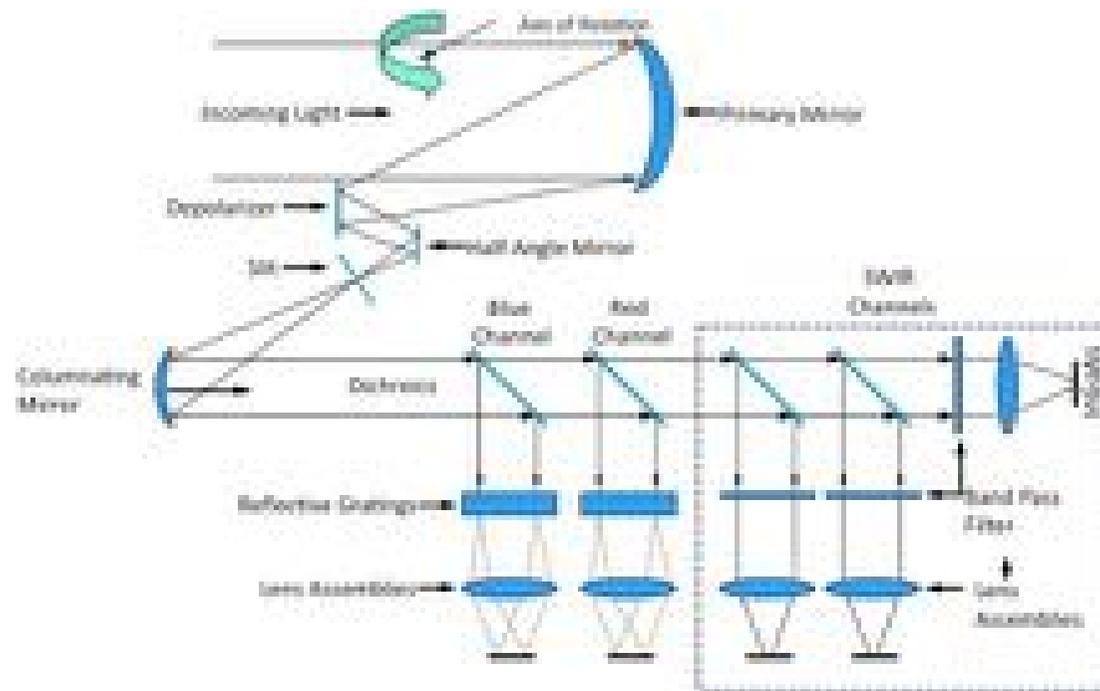
Scanning multispectral

Figura de F. Dell'Endice et al (2009). Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest. ISPRS J Photogramm. Remote Sens, Vol. 64, Issue 6, pp. 632-639.



Pocas bandas

- Si sólo se van a generar unas pocas bandas, se pueden utilizar espejos dicroicos en lugar de prismas dispersores:



Sentinel-2 MSI

- Instrumento multispectral (MSI):
 - 13 bandas espectrales desde VNIR hasta SWIR
 - diseñado y construido por Airbus Defence and Space, Francia, y basado en un concepto de barrido en serie
 - el diseño óptico se ha optimizado para lograr una calidad de imagen de vanguardia en su amplio campo de visión (20,6° y 290 km)
- La estructura del telescopio y los espejos están hechos de carburo de silicio, que proporciona una relación estabilidad óptica/masa muy alta y minimiza la deformación térmica



Bandas S-2 A / S-2

| Band Number | Central wavelength (nm) | Bandwidth (nm) | Central wavelength (nm) | Bandwidth (nm) | Spatial resolution (m) |
|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 443.9 | 27 | 442.3 | 45 | 60 |
| 2 | 496.6 | 98 | 492.1 | 98 | 10 |
| 3 | 560.0 | 45 | 559 | 46 | 10 |
| 4 | 664.5 | 38 | 665 | 39 | 10 |
| 5 | 703.9 | 19 | 703.8 | 20 | 20 |
| 6 | 740.2 | 18 | 739.1 | 18 | 20 |
| 7 | 782.5 | 28 | 779.7 | 28 | 20 |
| 8 | 835.1 | 145 | 833 | 133 | 10 |
| 8a | 864.8 | 33 | 864 | 32 | 20 |
| 9 | 945.0 | 26 | 943.2 | 27 | 60 |
| 10 | 1373.5 | 75 | 1376.9 | 76 | 60 |
| 11 | 1613.7 | 143 | 1610.4 | 141 | 20 |
| 12 | 2202.4 | 242 | 2185.7 | 238 | 20 |



Imaging spectrometers

- Similar a los sensores multispectrales, pero
- muchas más bandas (decenas, centenas)
- ancho de banda más estrecho (5-20 nm)
- investigación de la composición química de la materia
- Clasificación temática detallada de la cobertura terrestre
- Detección de sustancias químicas específicas



PRISMA (Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa)

Carga útil óptica con un generador de imágenes hiperespectrales y una cámara pancromática de resolución media.



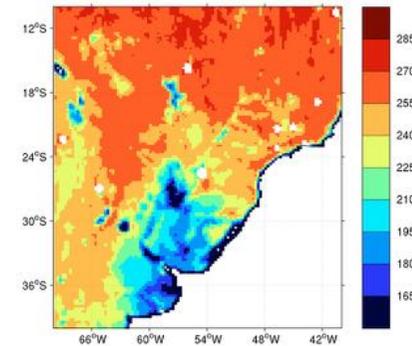
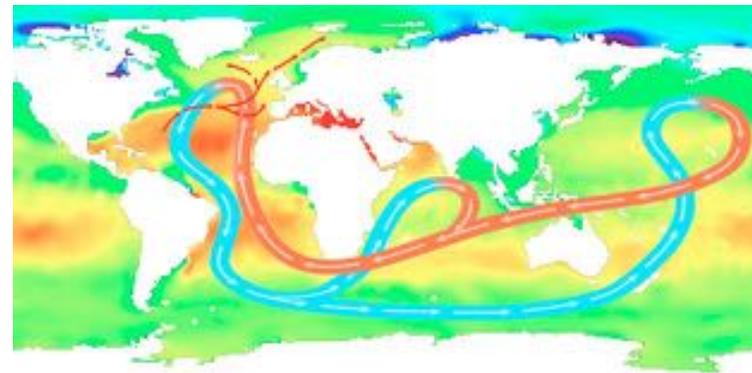
Radiómetros

- El suelo emite espontáneamente una radiación débil en longitudes de onda entre 1 cm y 1 m
- La intensidad y la distribución de la intensidad de la radiación emitida dependen de las características del terreno, incluida la humedad
- La información derivada puede utilizarse para el mapeo de minerales, el mapeo de la humedad del suelo, etc. En el caso del agua, puede utilizarse para estimar la salinidad



SMOS

- ESA Mission “Soil Moisture and Ocean Salinity”

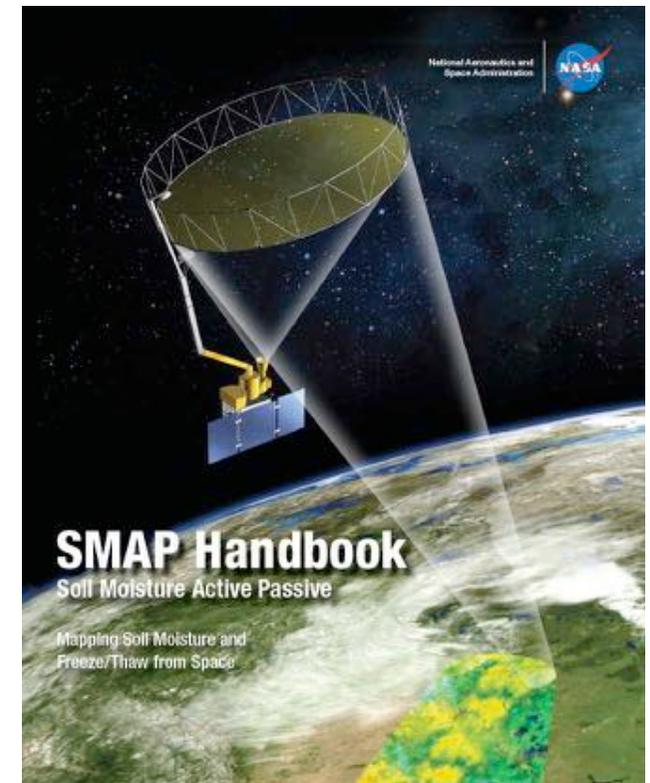


SMAP

- Misión de detección de humedad del suelo activa y pasiva (SMAP) de la NASA
- Sistema de radiómetro y SAR desenfocado de banda L, reflector de malla desplegable ligero de 6 m con alimentación descentrada.

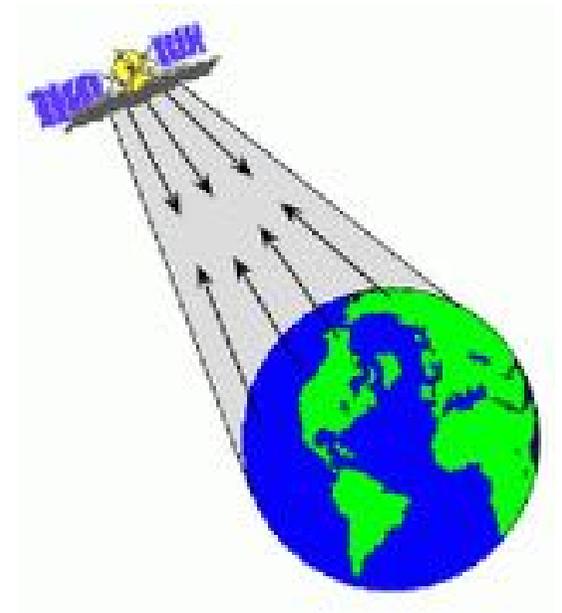
Alimentación compartida para

- Radar de \emptyset 1,2 GHz 1-3 km (30 % de brecha en el nadir) HH, VV y HV
- Radiómetro de \emptyset 1,4 GHz a 40 km (-3 dB) H, V, 3.^o y 4.^o Stokes
- Barrido cónico, ángulo de incidencia fijo a 40°
- Franja contigua de 1000 km, revisión de 2-3 días
- Órbita heliosincrónica de 6 a. m./6 p. m. (680 km)



Sensores activos

- El sensor viene con un dispositivo emisor de EM que ilumina el objetivo
- No necesita fuentes externas
 - Puede funcionar día y noche
- Mayor complejidad y consumo de energía
- Ejemplos: radar, LIDAR, sensores de fluorescencia



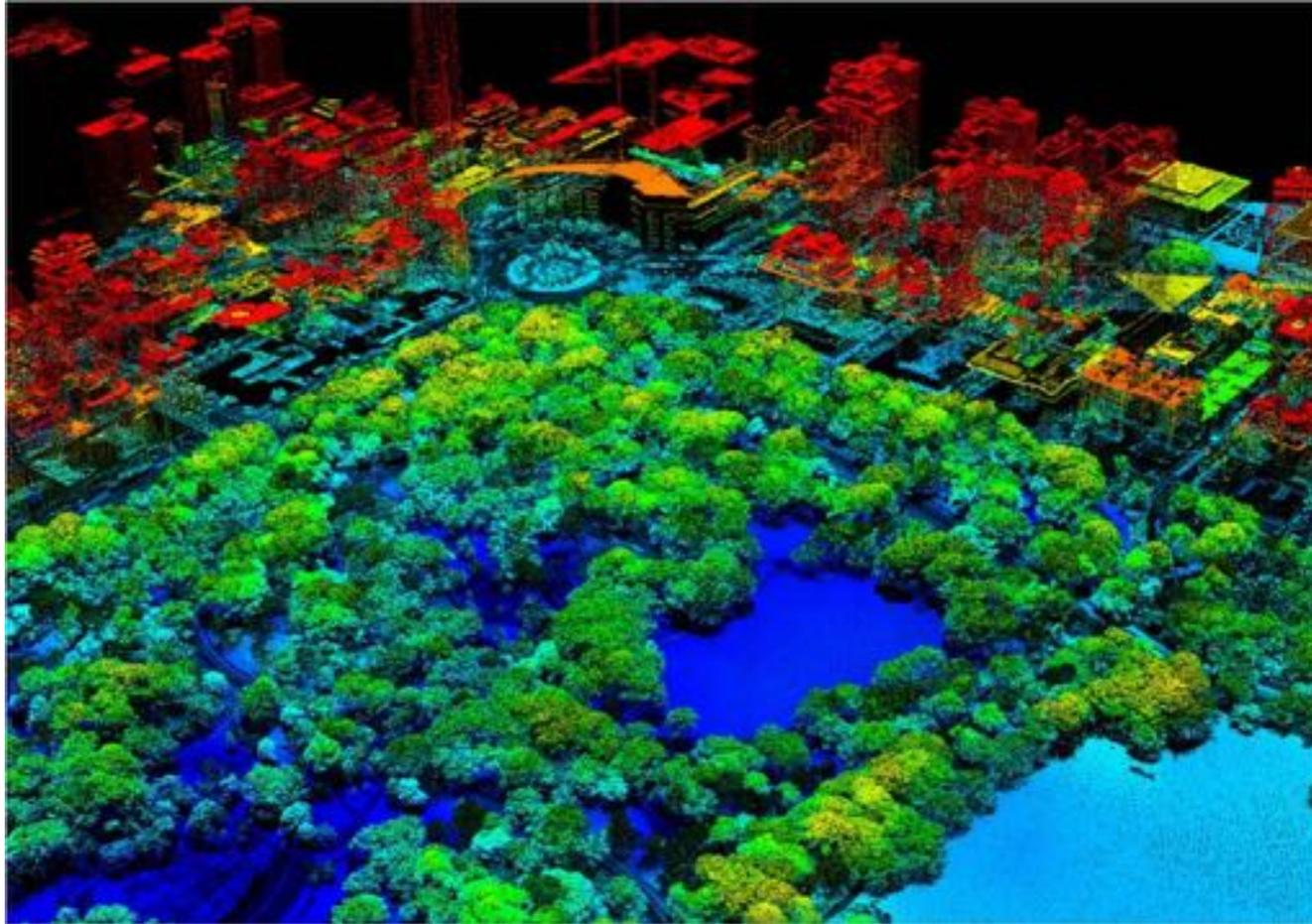
LIDAR aerotransportado

- Tiempos de ida y vuelta convertidos en distancia y, por lo tanto, en ubicación
- Creación de un modelo digital del terreno (DTM) o un modelo digital de la superficie (DSM)
- Mapeo de paisajes naturales y culturales en 3D



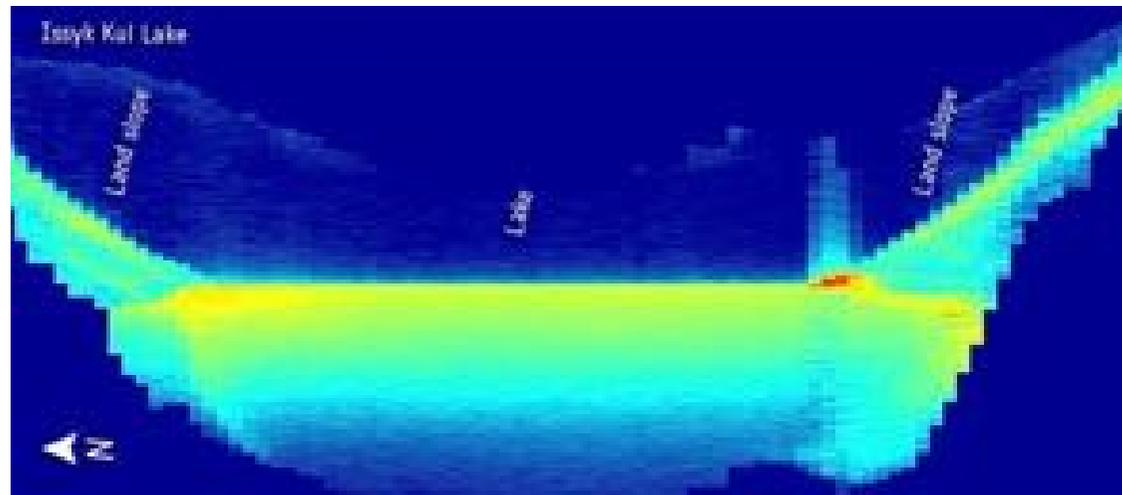
Nube de puntos de Nueva York codificada por colores

<http://eros.usgs.gov/topographic-research/structures>



Altímetros radar

- Se utilizan para medir el perfil altimétrico a lo largo de la trayectoria del satélite
- Funcionan en longitudes de onda de entre 1 y 6 cm y miden la elevación con una precisión de entre 2 y 4 cm.
- Perfil altimétrico de gran escala (sin DSM, complementario al LIDAR).



Radars de imagen

- Operan en longitudes de onda entre 1 cm y 1 m
- Diferentes λ reaccionan a distintas características del objetivo (humedad, conductividad, tamaño, rugosidad)
- Penetran en las nubes, funcionan en cualquier clima
- Detección 3D (interferometría, tomografía)
- Detección polarimétrica



Ejemplo: Sentinel-1

Ships queuing along the Danube river near the Romanian town of Zimnicea, captured by Sentinel-1A on 2 August 2015.



RADAR

- El sensor de microondas activo principal:
- emite ondas electromagnéticas, ráfagas y chirridos y
- detecta el campo retrodispersado.

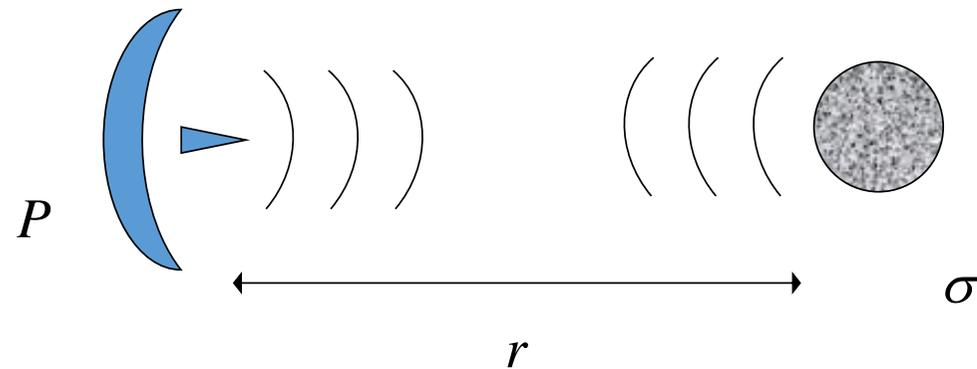
- A partir del campo retrodispersado, se pueden detectar/estimar las características del objetivo.

- La interpretación de las "imágenes" de radar es menos obvia que la interpretación de las imágenes ópticas, porque la interacción entre energía y materia es muy diferente del caso de la longitud de onda óptica.



Introduction

- Configuración de radar simple (monoestática):



*Potencia
retrodispersada:*

$$|\rho| \propto P \cdot \frac{\sigma}{r^4}$$

Alcance objetivo:

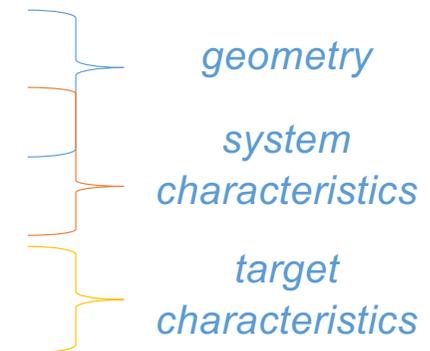
$$r = \frac{c\Delta t}{2}$$



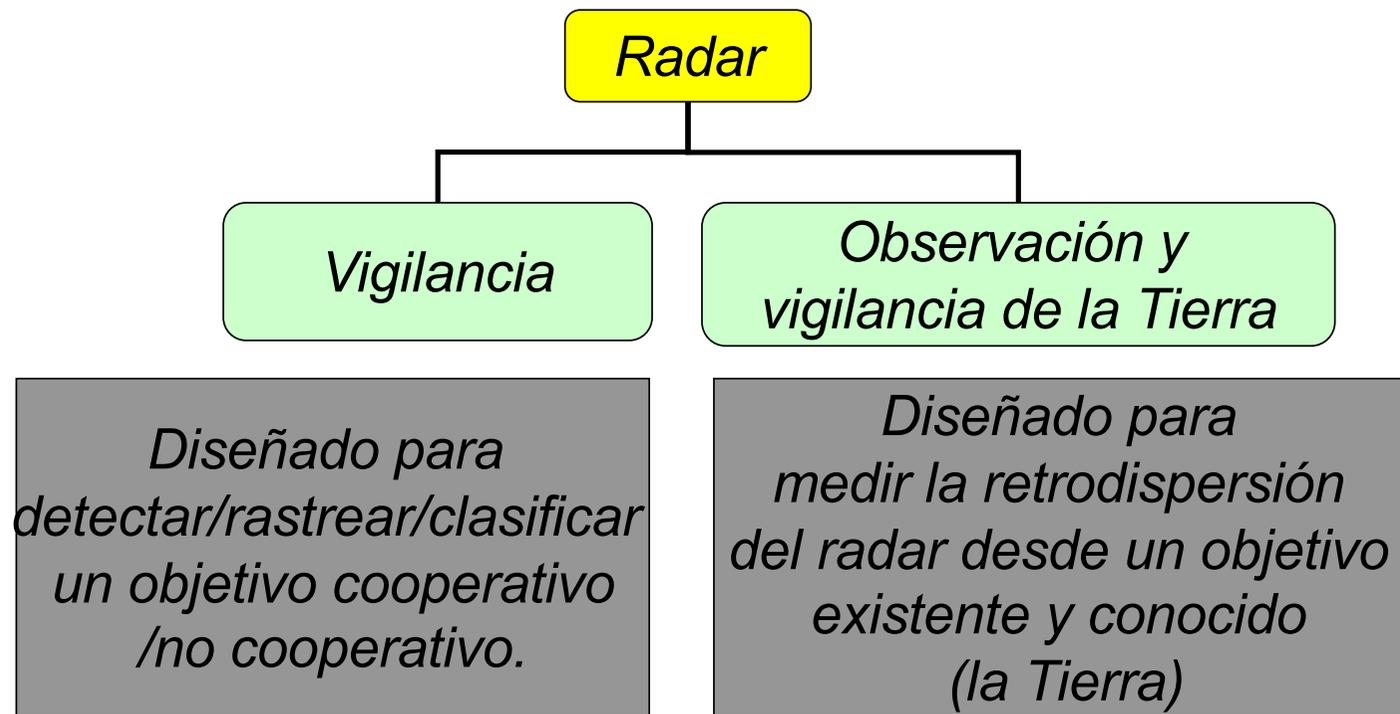
La ecuación de RADAR más simple

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2 P_t \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

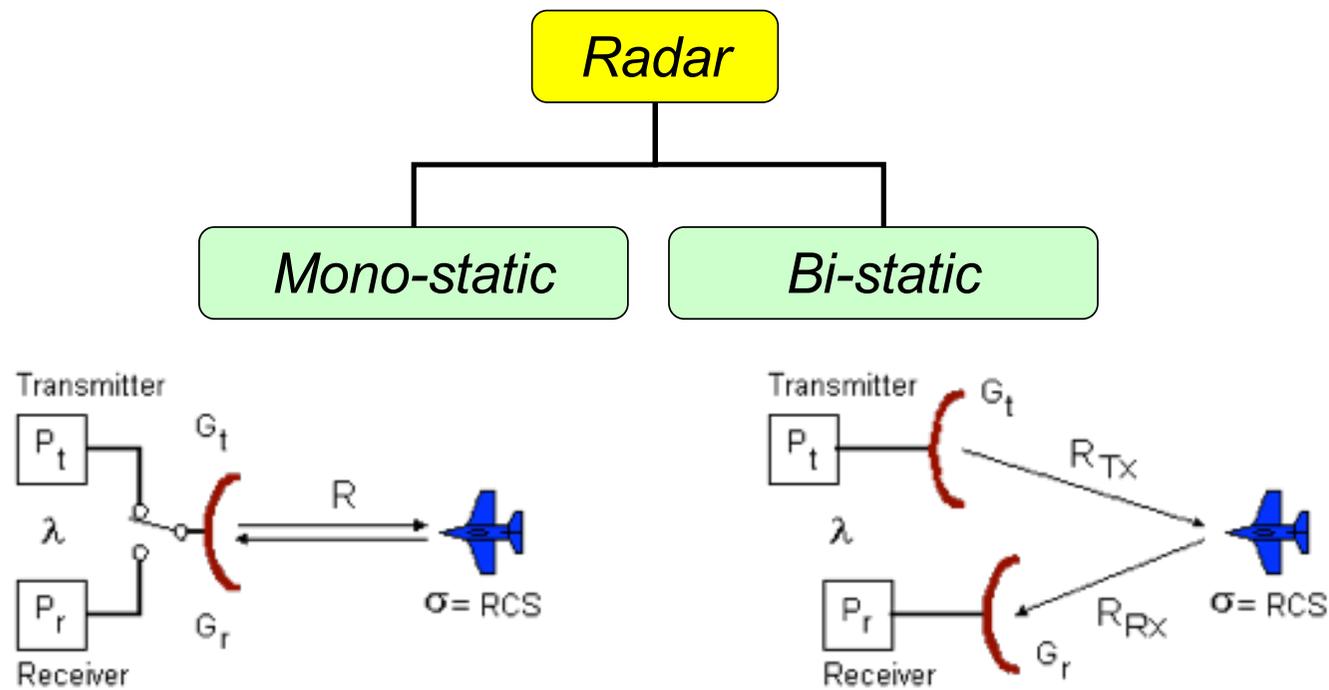
- P_r = antenna-received power;
- P_t = antenna-emitted power;
- R = sensor-to-target distance (TX \equiv RX)
- G = antenna gain (TX \equiv RX)
- λ = operational wavelength;
- σ = “radar cross section” of the observed target



Tipos de radar



Monoestático vs. Biestático



<http://www.rfcafe.com/>



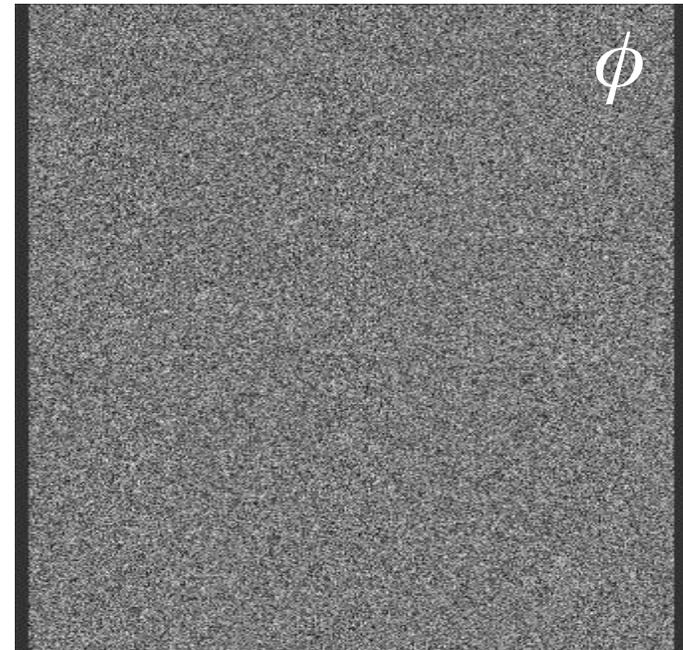
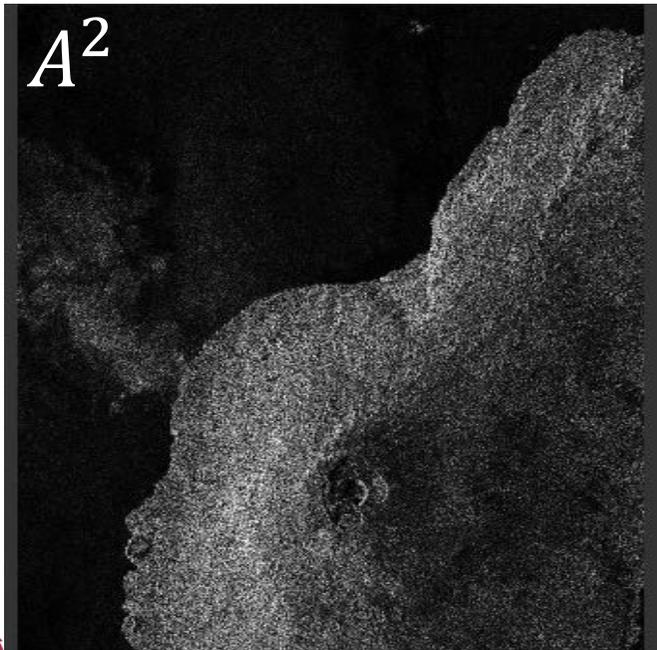
EO radar

- En este curso, analizaremos la detección por radar a bordo de vehículos espaciales (satélites)
 - Radares monoestáticos (excepto TanDEM-X)
 - Radar pulsado
- Para cada pulso, el radar mide:
 - **distancia** del objeto retrodispersado (tiempo transcurrido desde la emisión del pulso; el radar es muy inteligente para medir la distancia)
 - **intensidad** de la sección transversal del radar/retrodispersión (estimada a partir de la potencia de la onda incidente)
 - **fase** (necesaria para el radar de apertura sintética, menos importante para el radar de apertura real)
 - **polarización**



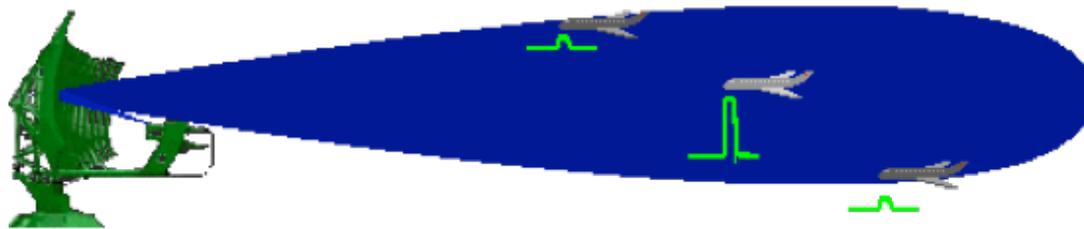
Fase y amplitud de respuesta

- En una IMAGEN ÚNICA:
 - La amplitud de la retrodispersión es interpretable
 - La fase presenta un comportamiento similar al ruido

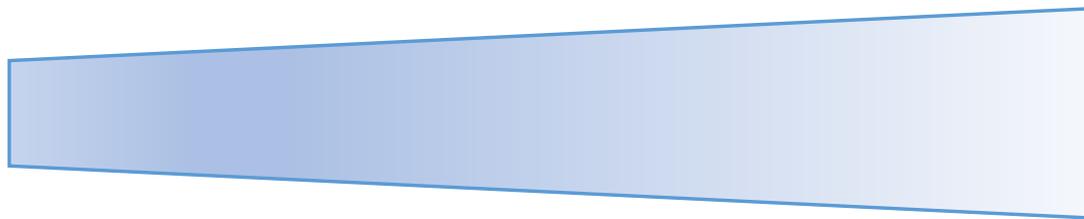


Discriminación de dirección

- En los radares de vigilancia/ATC, la dirección está implícita en la orientación del haz estrecho:

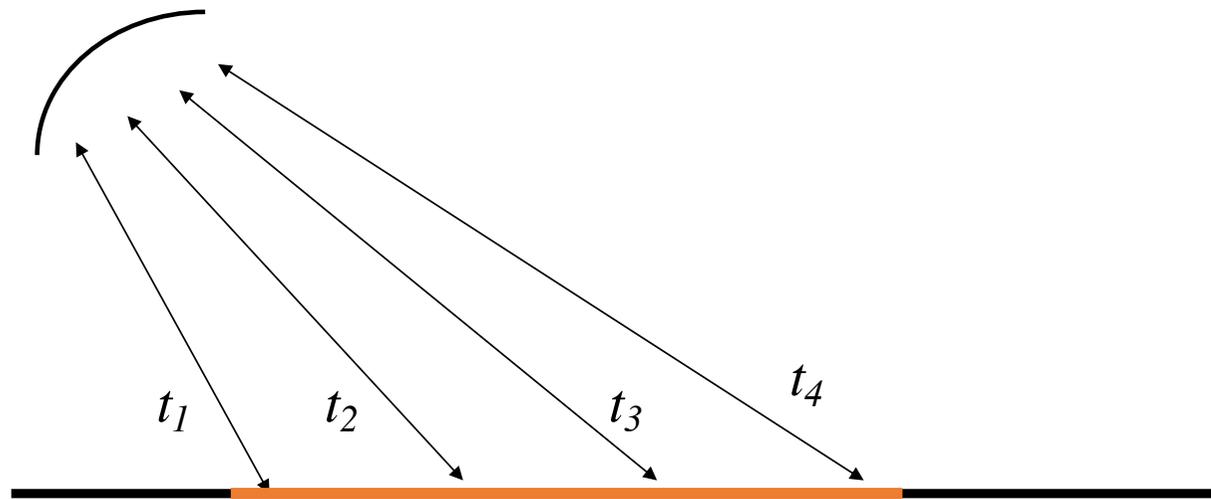


- En la observación de la Tierra, la superficie terrestre está demasiado lejos de un satélite para aprovechar el ancho del haz, se requiere un enfoque diferente



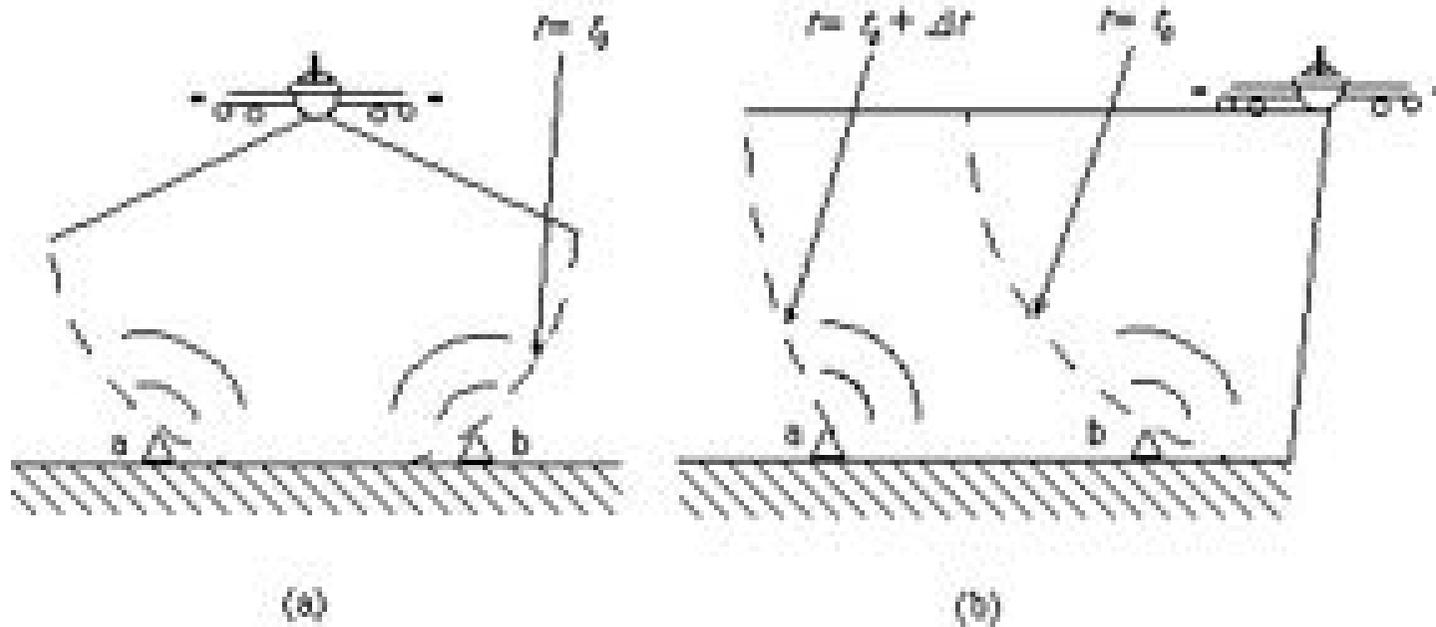
Discriminación de dirección (II)

- En el radar EO (haz ancho), la dirección generalmente se resuelve mediante observación lateral:
≠ tiempos → ≠ distancias → ≠ ubicaciones



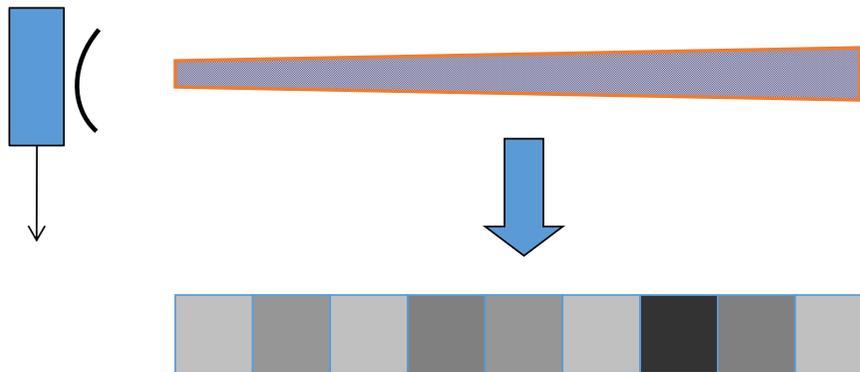
El radar EO mira lateralmente

- La mirada nadiral implicaría ambigüedad



Distancia = dimensión transversal

- Un único pulso de radar adquirirá una franja en el terreno
- Vista esquemática desde arriba:

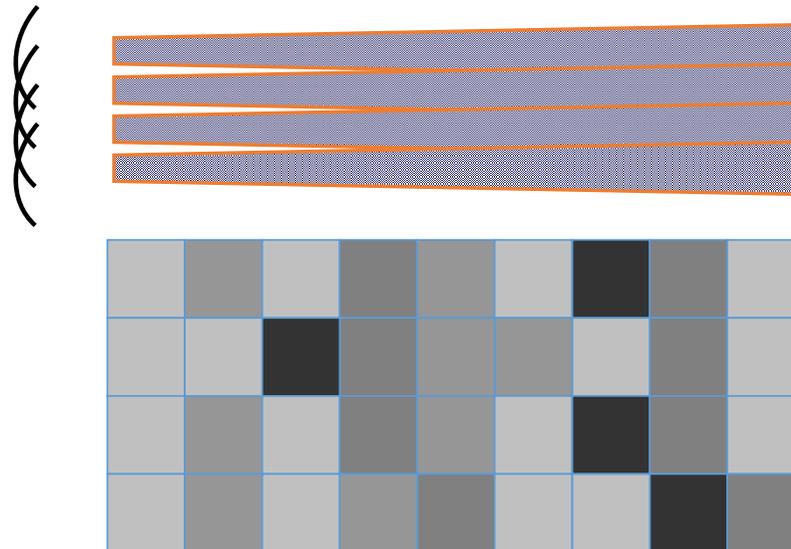


Se genera una “fila de la imagen” con el campo retrodispersado

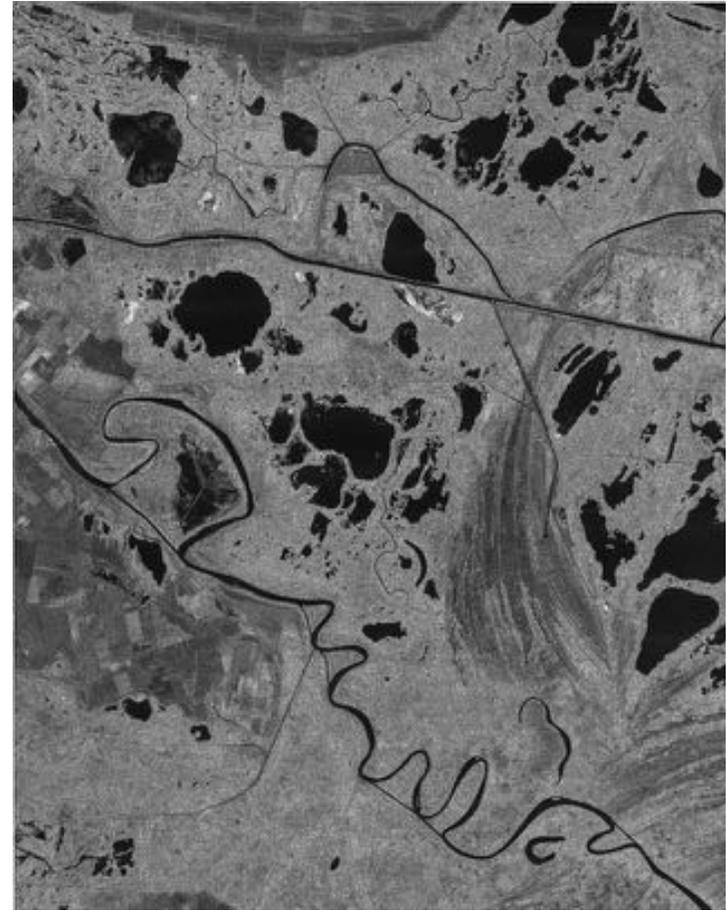
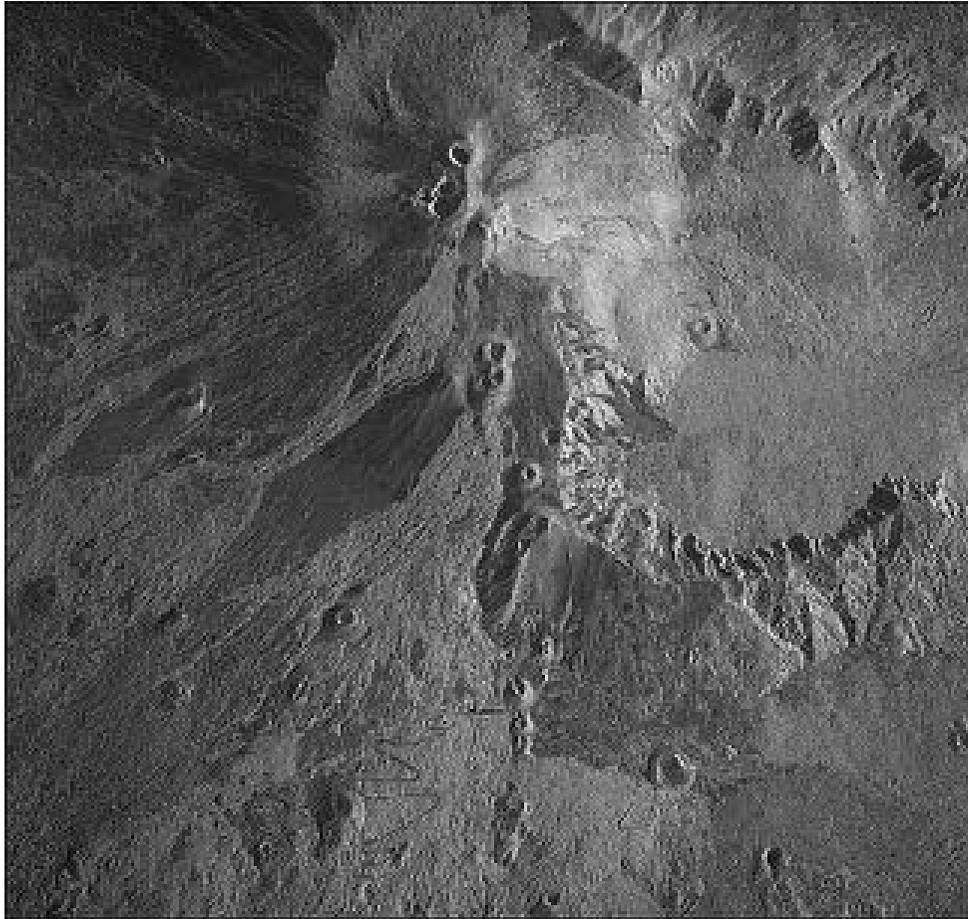


Movimiento de plataforma = segunda dimensión

- El movimiento físico de la plataforma, sincronizado con la emisión de pulsos, generará la segunda dimensión.



Ejemplos de imágenes de radar EO

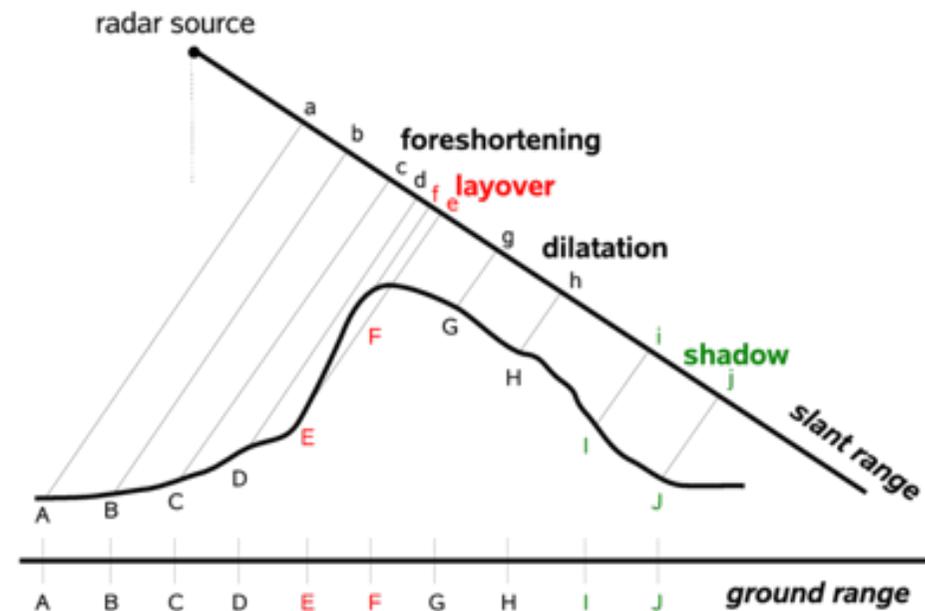


Proyección inclinada al suelo

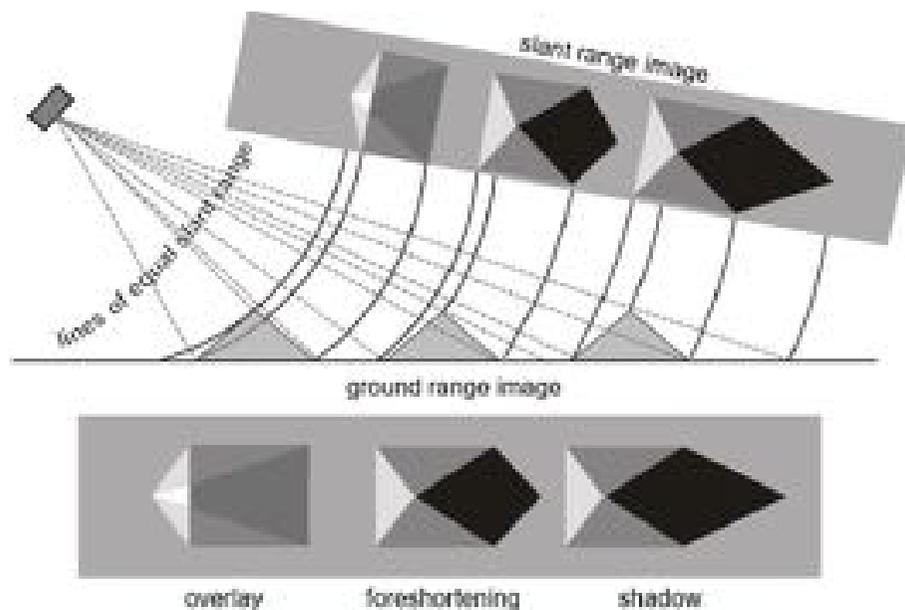
- Las retrodispersiones se proyectan sobre la superficie de la Tierra en su intersección con la línea de isodistancia correspondiente (círculo o línea aproximada)

El resultado puede distorsionarse en áreas no planas si no se utiliza un DTM

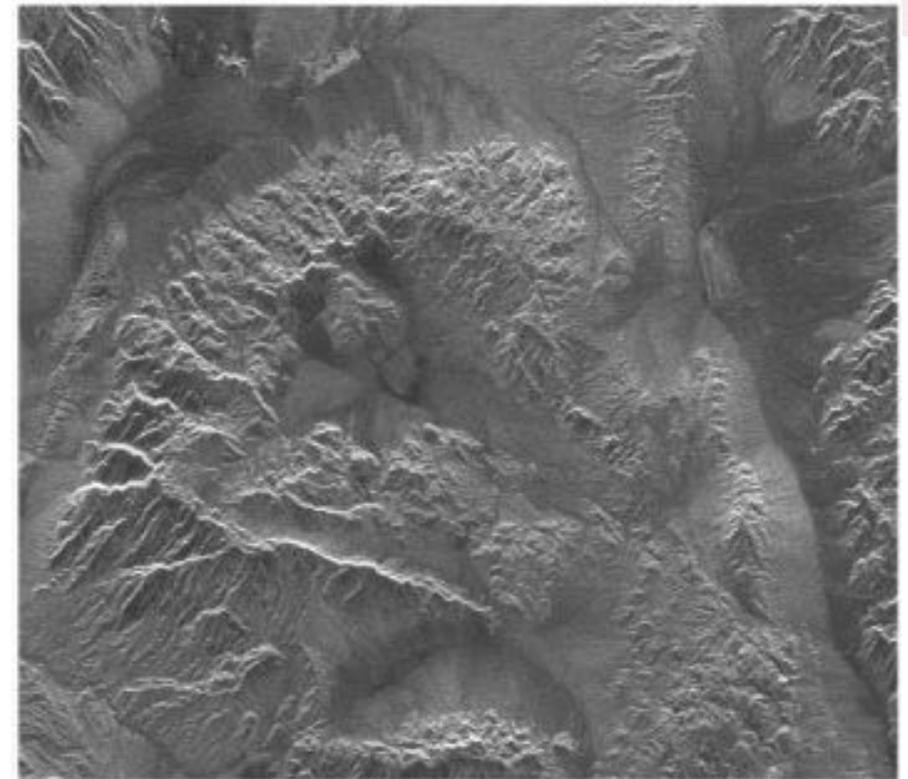
www.esa.int



Ejemplos visuales



https://www.researchgate.net/figure/Geometric-distortions-in-radar-images-Adapted-from-Lillesand-et-al-2008_fig12_338698920



ERS SAR image (intensity) of a mountain range in the Mojave Desert, CA, USA. Size $\sim 40 \times 40$ km. Coordinates: range \downarrow , azimuth \rightarrow . Data \copyright ESA.

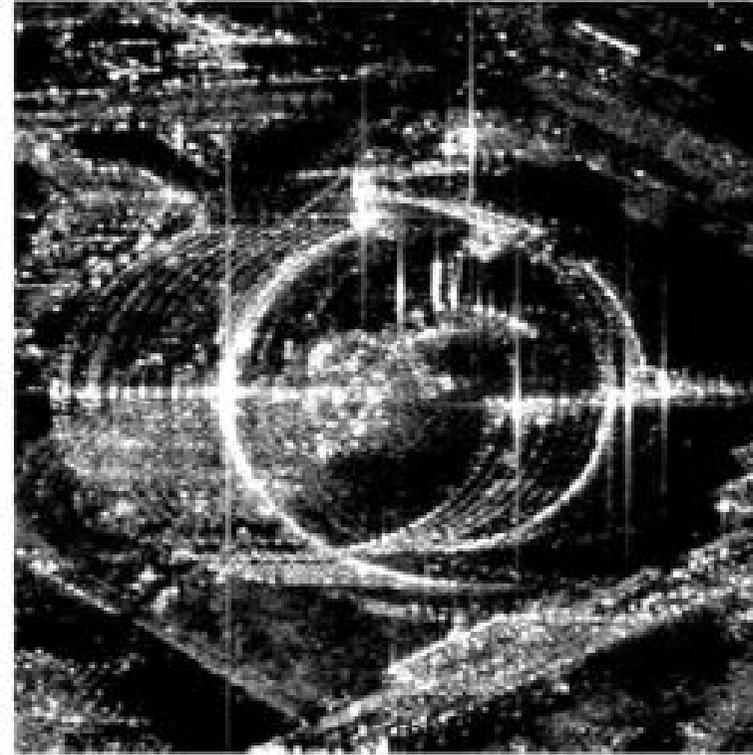
Principles Of Synthetic Aperture Radar - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/ERS-SAR-image-intensity-of-a-mountain-range-in-the-Mojave-Desert-CA-USA-Size-40_fig4_224794714 [accessed 15 Nov, 2021]



Distorsiones en los datos del SAR VHR



(a) Birds eye view; ©Google Earth



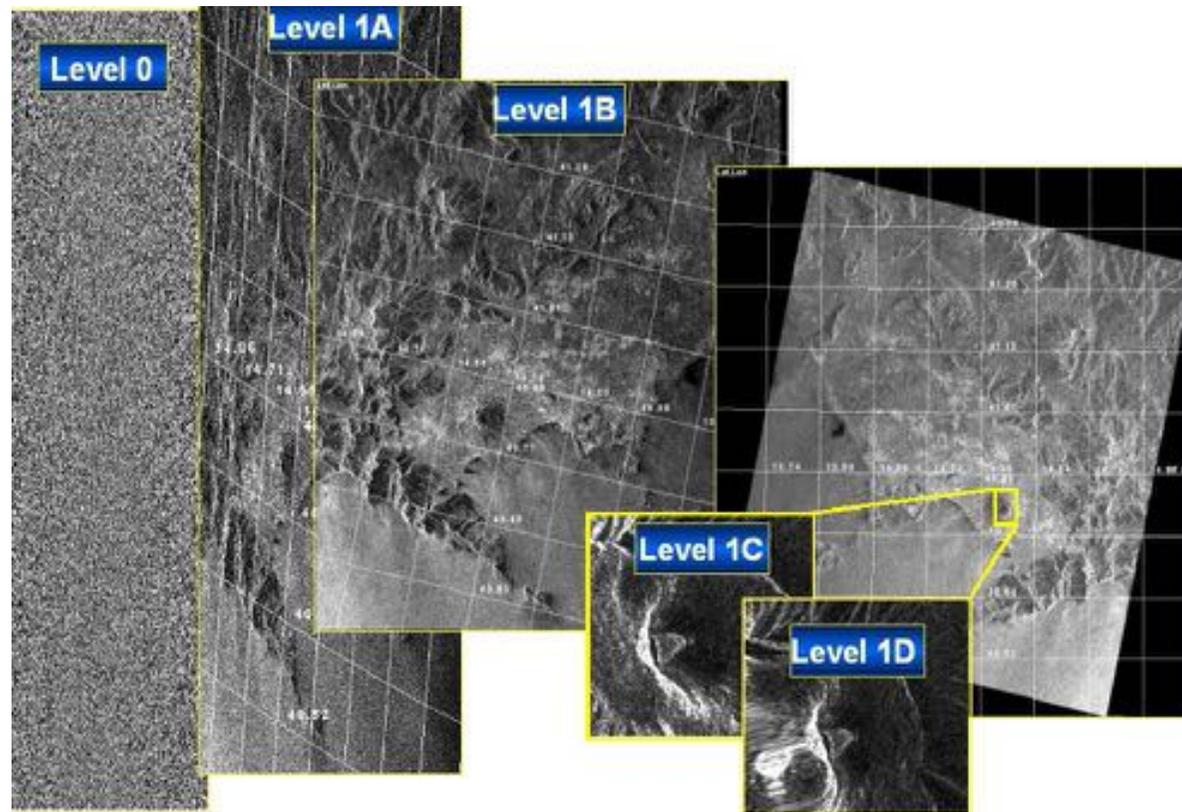
(b) SAR mean map

Maison de Radio France (Paris): obvious geometry in optical image; challenging interpretation in TerraSARX mean map (spotlight mode, azimuth direction bottom-up; range direction from left to right)

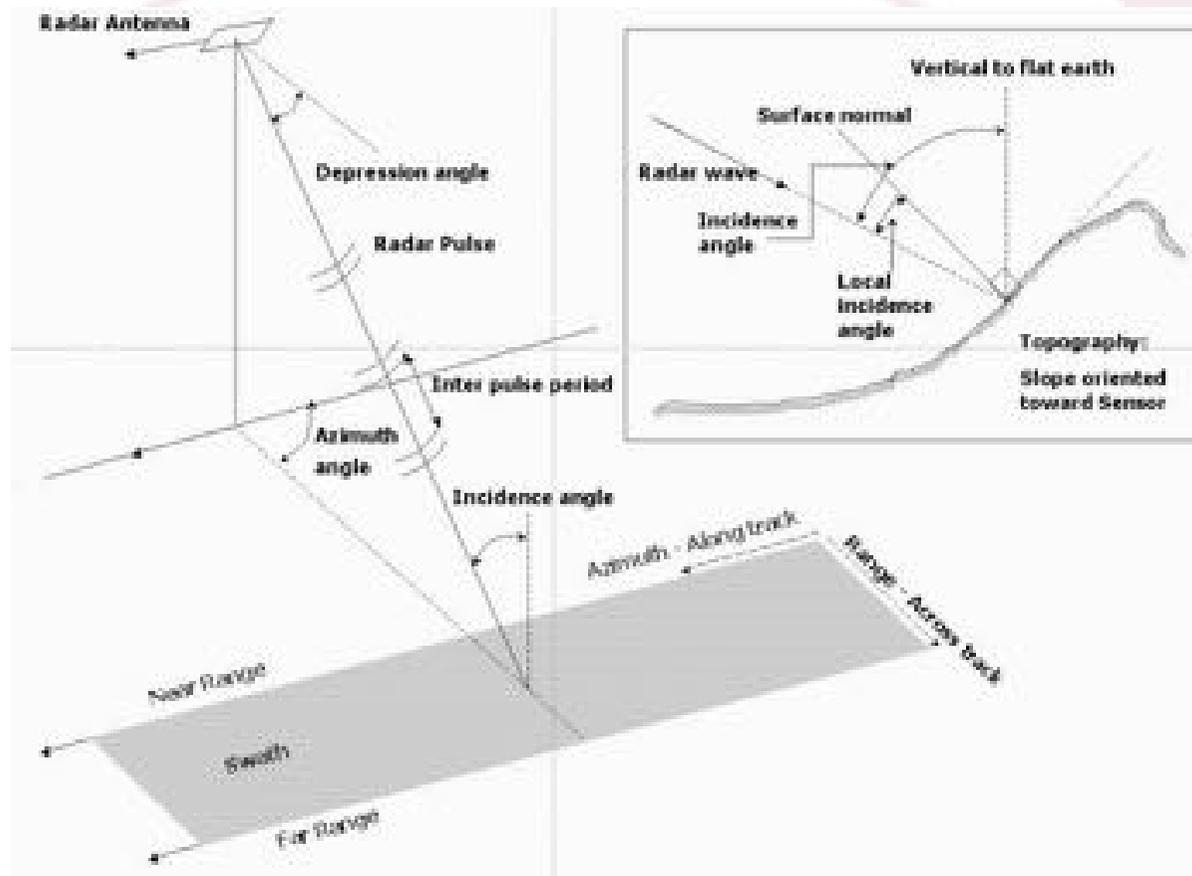


Corrección geométrica

- Ver niveles de datos del radar COSMO/SkyMed



Geometría del radar EO



http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remote_sensing/radar/radar_pulse_martin.jpg



Range resolution

- Esta resolución es la mitad de la longitud física de un pulso:

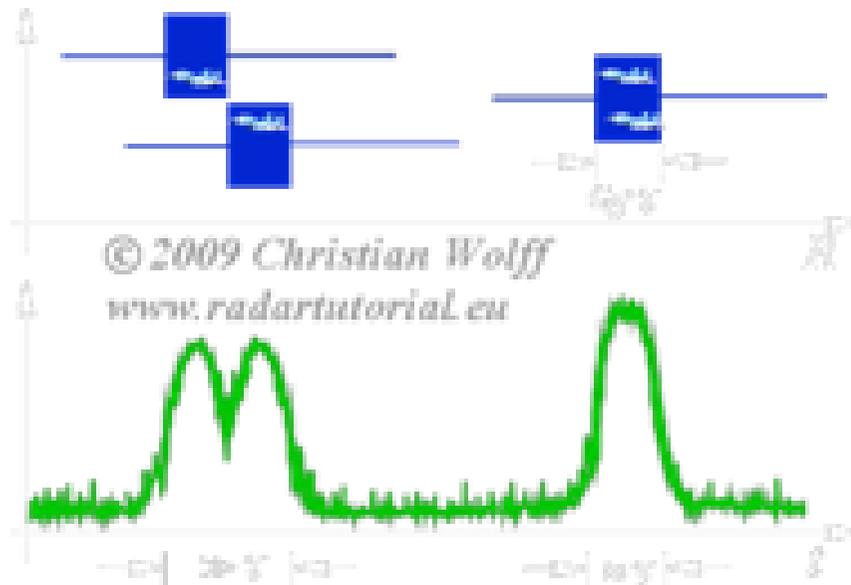
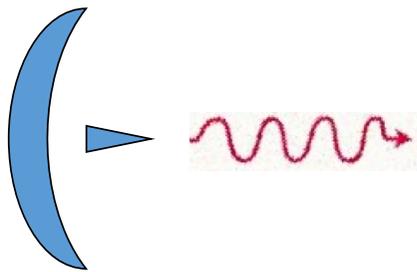
$$\delta r = \frac{c\tau}{2}$$

- Esta es la distancia mínima entre dos dispersores para que se puedan visualizar claramente (retrodispersión desde los extremos más cercanos antes de que comience la retrodispersión desde el siguiente)



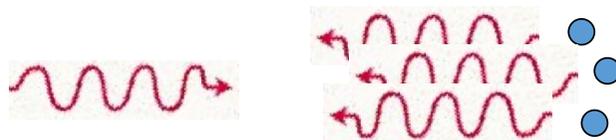
Range resolution

- Las ondas retrodispersadas se superponen → los objetivos están demasiado cerca
- la resolución es independiente de la distancia

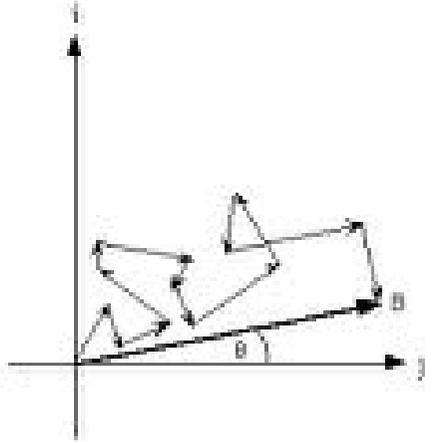


Range resolution y speckle

- Los objetivos cercanos generan retrodispersiones superpuestas
- iluminación coherente → suma coherente de retrodispersión → speckle noise



Speckle, Coherent Summing of Radar Backscatter



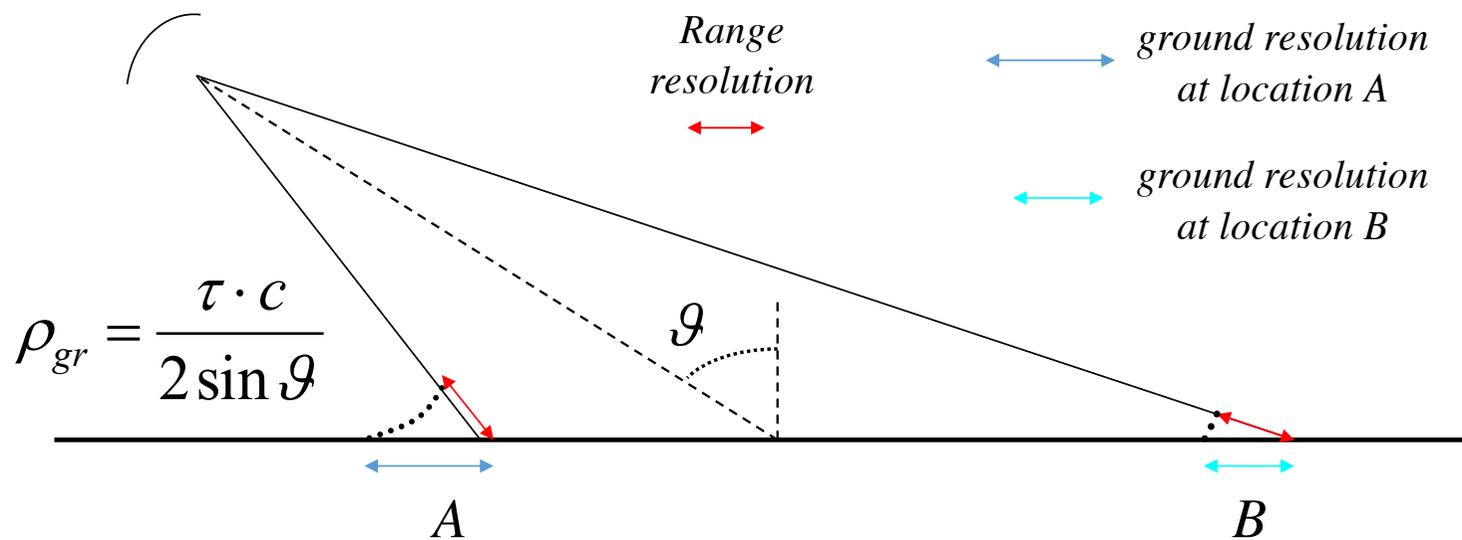
Many backscattered responses from within one grid cell are coherently summed to obtain the phase and brightness of the cell's overall radar response. Sometimes the cell's many small responses randomly combine to a large resultant at a particular phase. The grid cell is then assigned a brightness value which is inappropriate to the actual response, since no one object was truly a strong reflector. Speckle is often reduced by dividing the grid cell's responses into separate groups and then processing each group. The brightness estimates obtained from each group are combined near the end of the SAR processing sequence.

<http://envisat.esa.int/>



Ground resolution

- El alcance inclinado es constante, pero el ground resolution no lo es.



Compresión de pulso

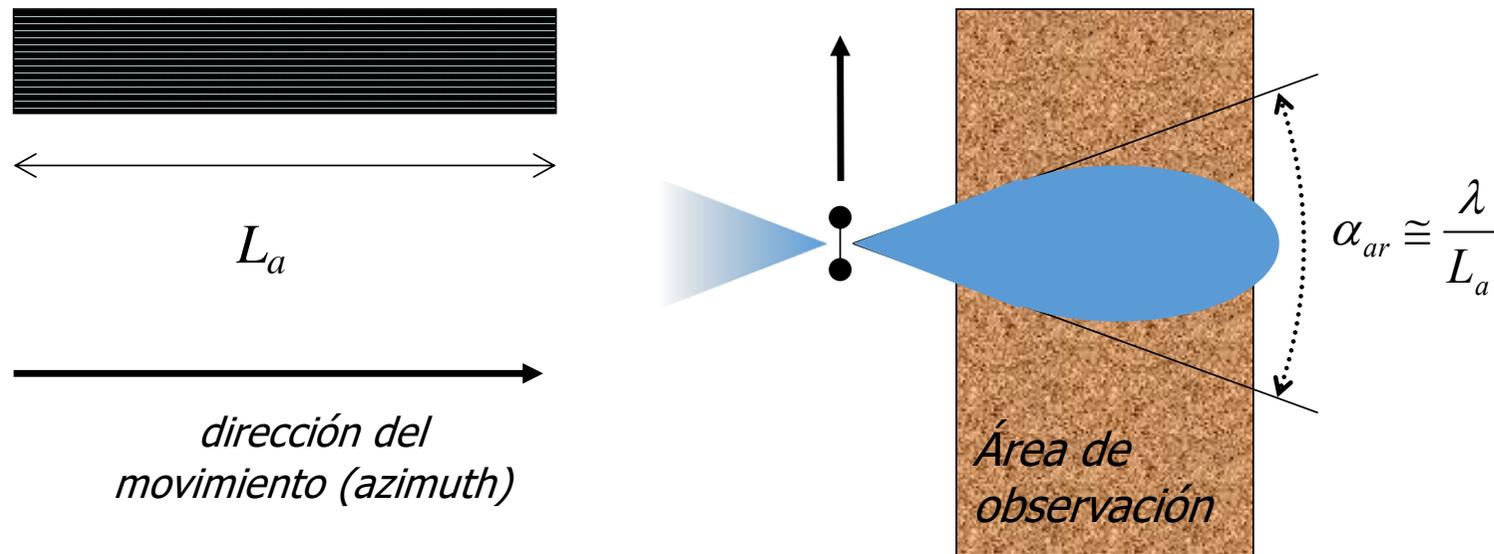
- La range resolution se puede mejorar acortando los pulsos, pero:
 - pulsos más cortos → menos energía → peor relación señal/ruido;
 - pulsos más cortos Y misma energía → mayor amplitud → mayor costo, problemas de compatibilidad.
- Las técnicas de “compresión de pulsos”, básicamente FM + filtro de adaptación, vinculan la resolución de rango al ancho de banda en lugar de a la duración:

$$\delta r = \frac{c}{2B} \quad , \quad B = \text{pulse bandwidth}$$

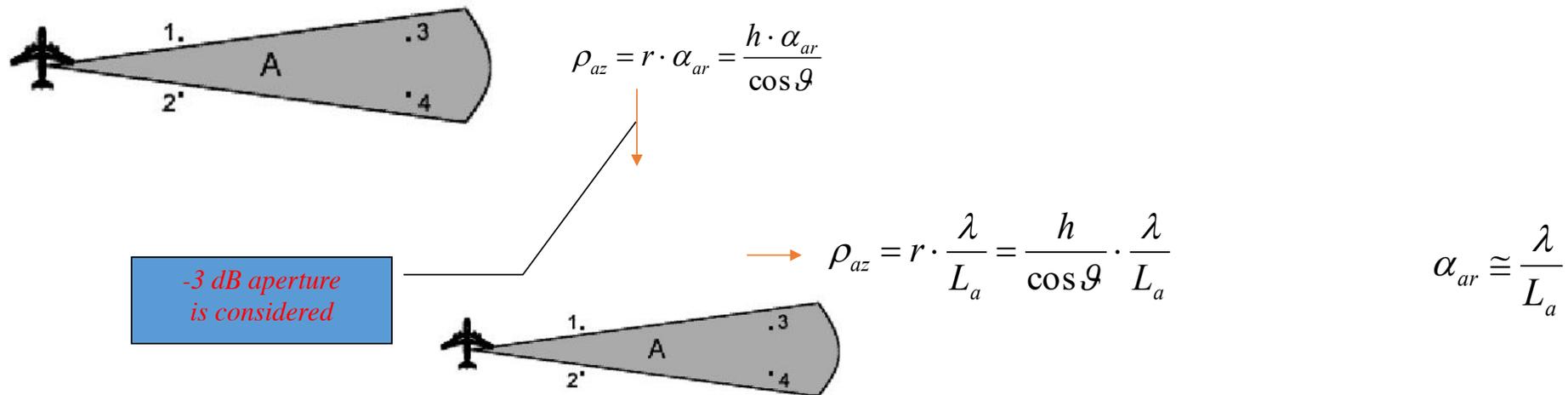


Azimuth resolution

- Que es azimuth resolution?
- Depende del ancho del haz en acimut. La antena suele estar formada por un dipolo orientado en acimut.



Azimuth resolution

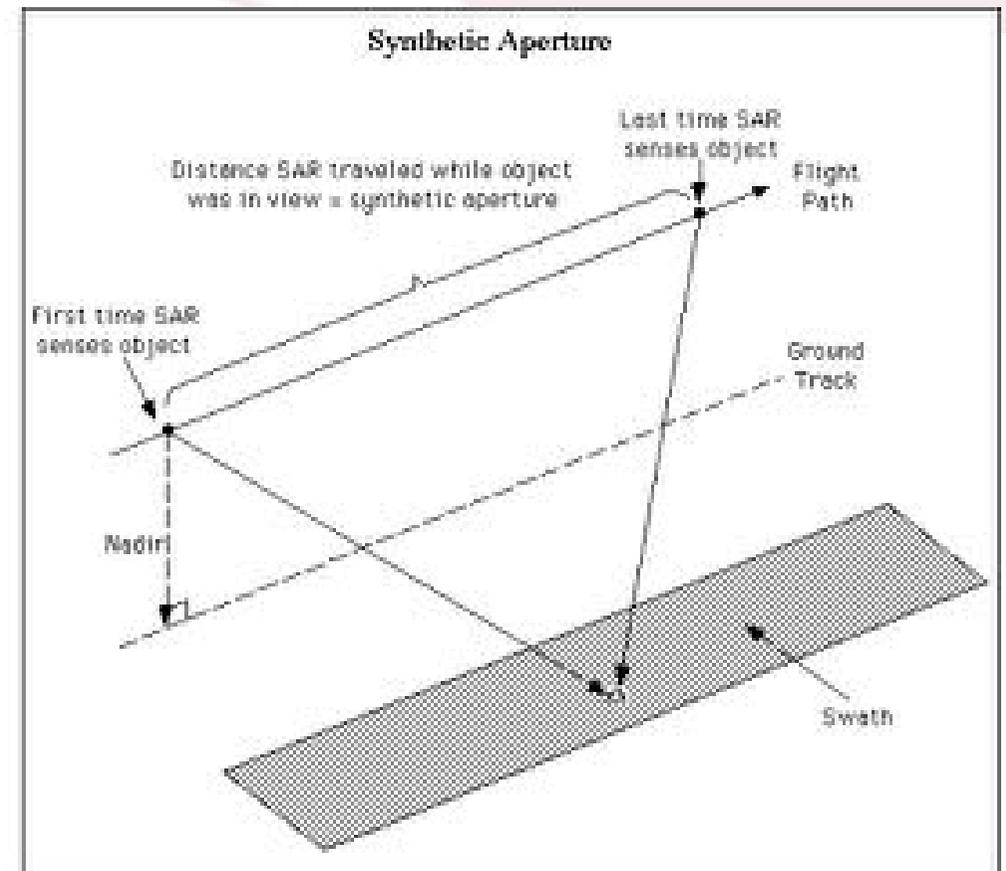


- azimuth resolution is determined by beam aperture and distance
- larger antenna \rightarrow narrower beam \rightarrow better resolution
- inherent limits on antenna size ...

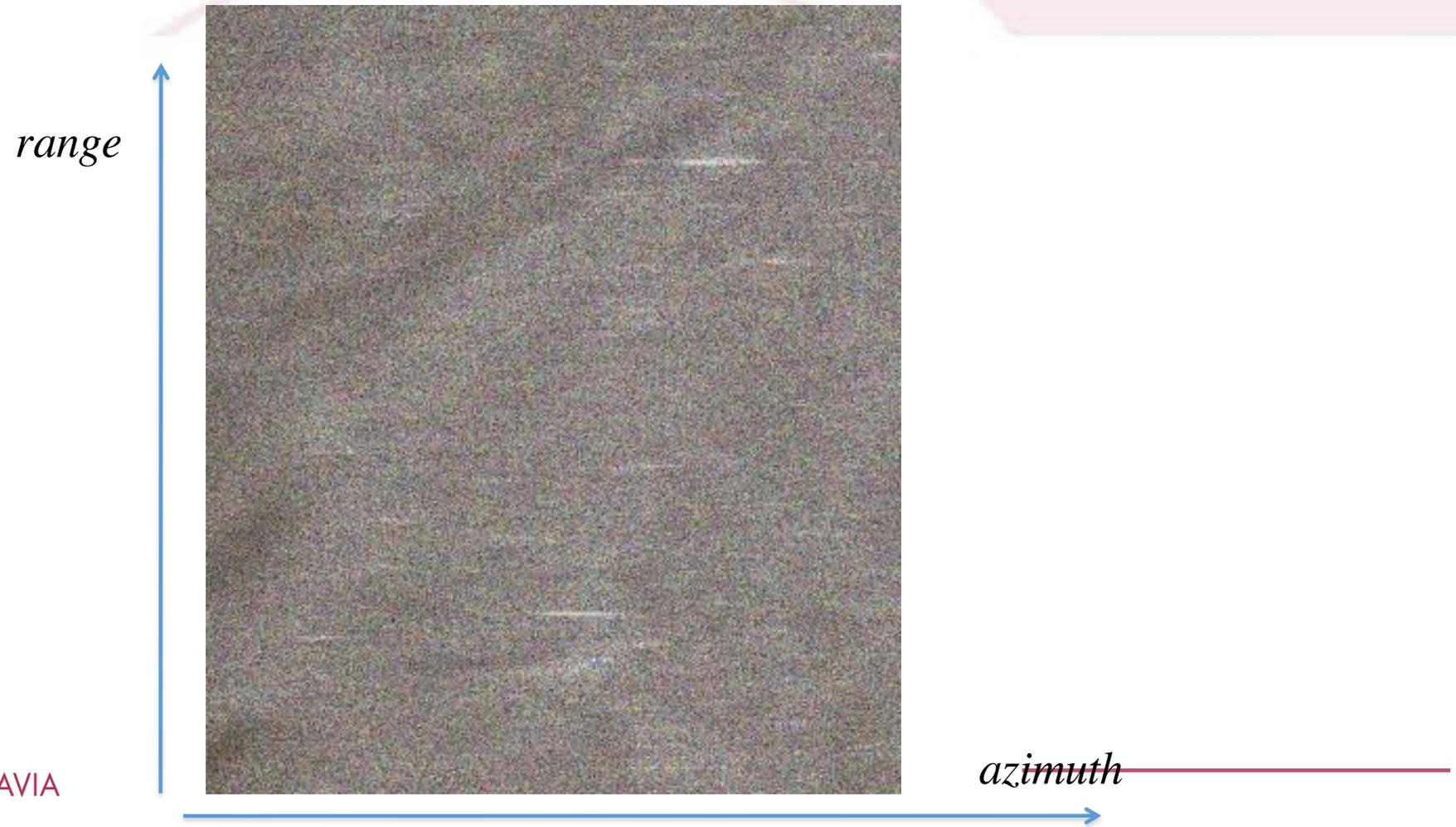


Apertura sintética

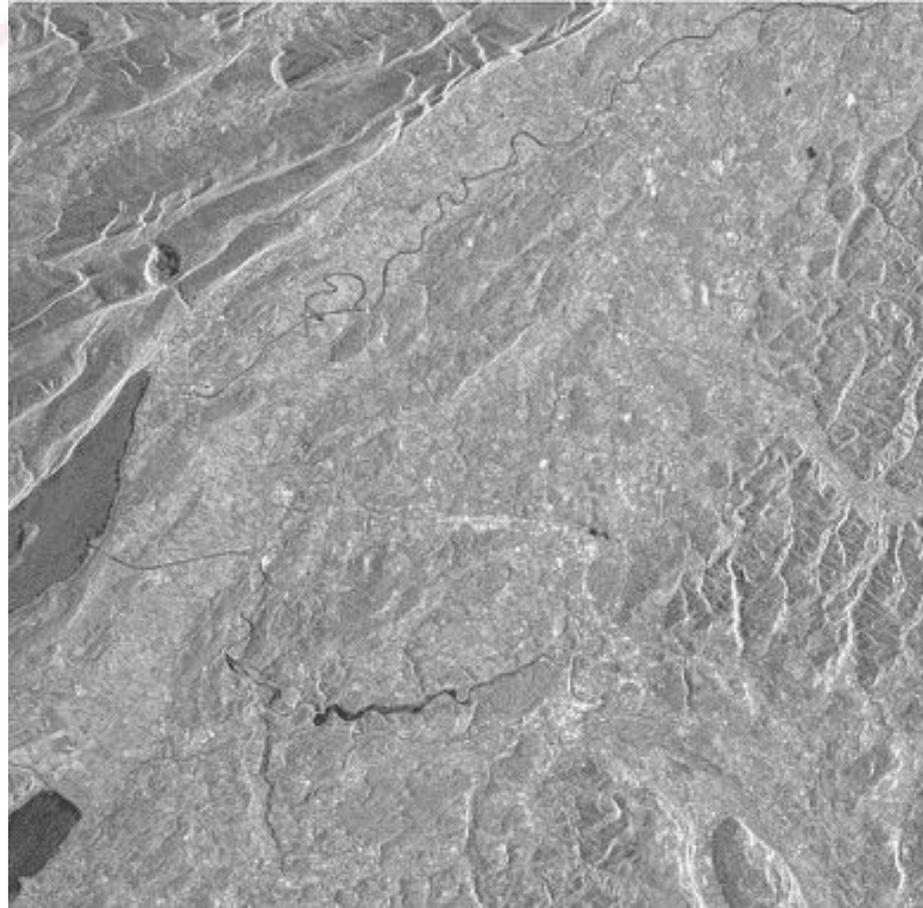
- **La apertura sintética** es un método alternativo para mejorar la resolución
- El tamaño del píxel ya no está vinculado al área iluminada por el haz
- La información sobre un único objetivo se recopila a través de varios pulsos electromagnéticos
- Radar de apertura sintética (SAR)



Datos SAR sin procesar



SAR «imagen»



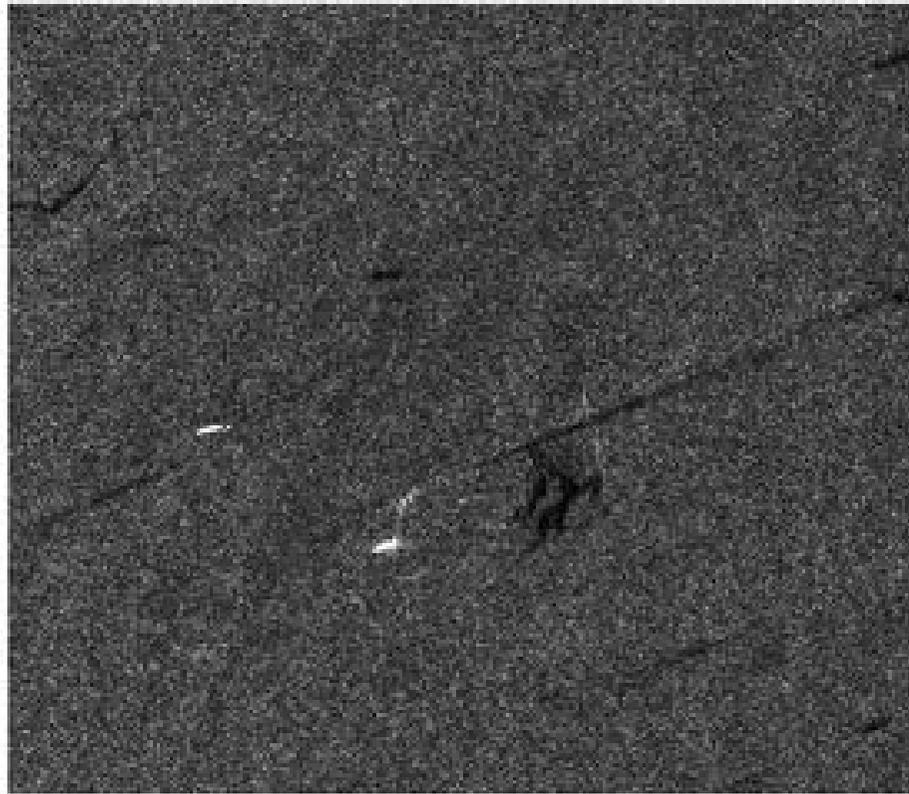
SAR

- Radar de apertura sintética
- La resolución azimutal equivale teóricamente a la mitad del tamaño de la antena azimutal.
- Es el único medio para lograr una alta resolución en sistemas espaciales, pero también se utiliza ampliamente en sistemas aéreos.
- Desventajas:
 - Gran carga computacional, demora en la entrega de resultados;
 - Los objetos en movimiento se desplazan (MTI o indicación de objetivo móvil).



Desplazamiento de velocidad

- Buques en movimiento desplazados respecto de su estela...



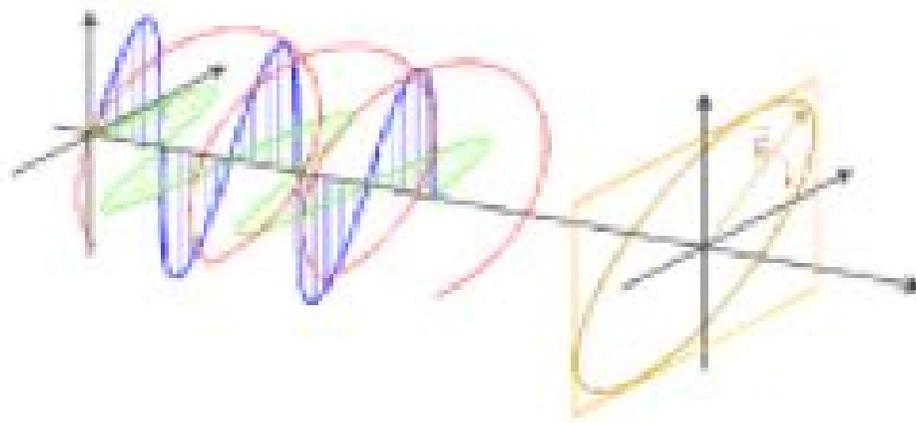
<http://what-when-how.com/> - original data © European Space Agency



UNIVERSITÀ DI PAVIA

Polarization in EM waves

- Polarization: path of the tip of E vector in an EM wave
- M vector behaves consequently (\rightarrow no need to define both)
- Polarization can be described using its horizontal (H) and vertical (V) components



Radar polarimétrico

- Cualquier polarización, tanto en transmisión como en recepción, se puede sintetizar utilizando los componentes H y V con una relación bien definida entre ellos.
- Cuatro combinaciones posibles:
 - HH: para transmisión horizontal y recepción horizontal
 - VV: para transmisión vertical y recepción vertical
 - HV: para transmisión horizontal y recepción vertical, y
 - VH: para transmisión vertical y recepción horizontal
- HH, VV: canales “copolarizados”
- HV, VH: canales “polarizados cruzados” (nótese que en EO: $HV=VH$)



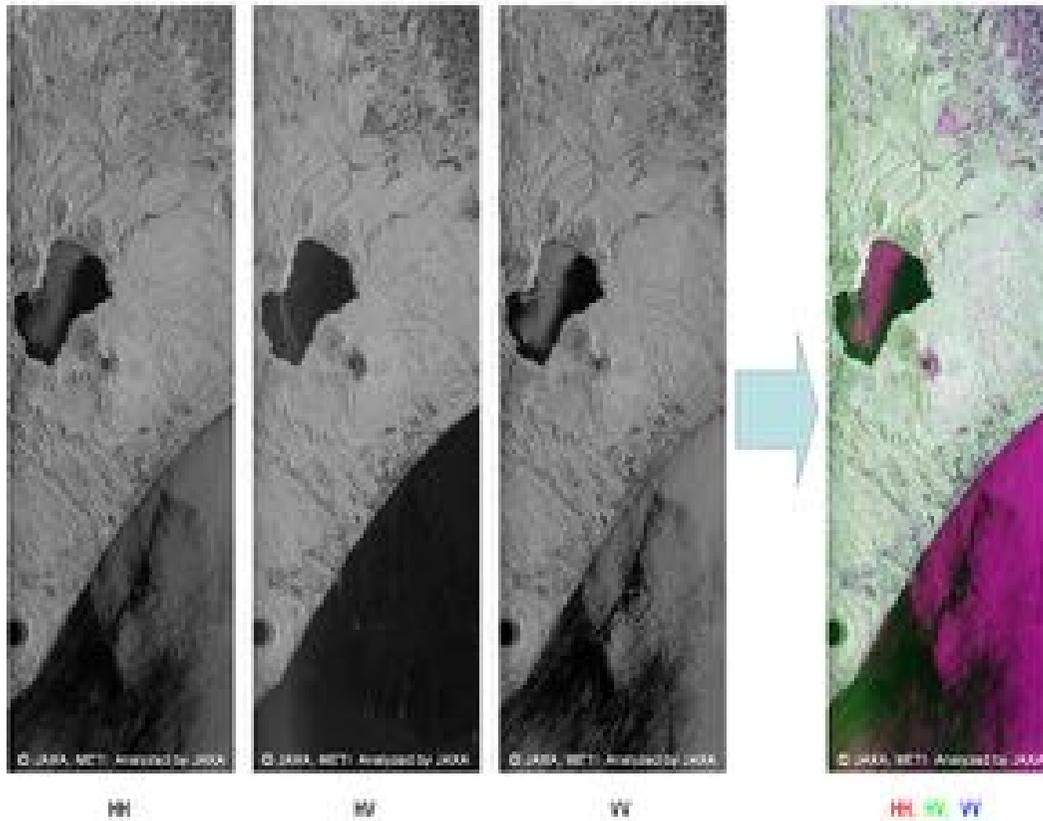
¿Diferentes polarizaciones?

- Los cultivos orientados en V, como el trigo y la cebada, permiten una penetración más profunda y permiten que las ondas HH interactúen con el suelo
- Canal HV → rotaciones de pol., generalmente relacionadas con:
 - ramas y hojas de árboles; las hojas más grandes dan como resultado una retrodispersión con polarización cruzada más fuerte → clasificación
 - las estructuras de los barcos generan dispersión múltiple → los barcos son visibles tanto en amplitud como en polarización
 - las fracturas y las no homogeneidades en el hielo se pueden detectar a partir de la dispersión de volumen
- VV se refleja fuertemente en el agua → mar/océano:
 - análisis de ondas capilares
 - recuperación del campo de viento



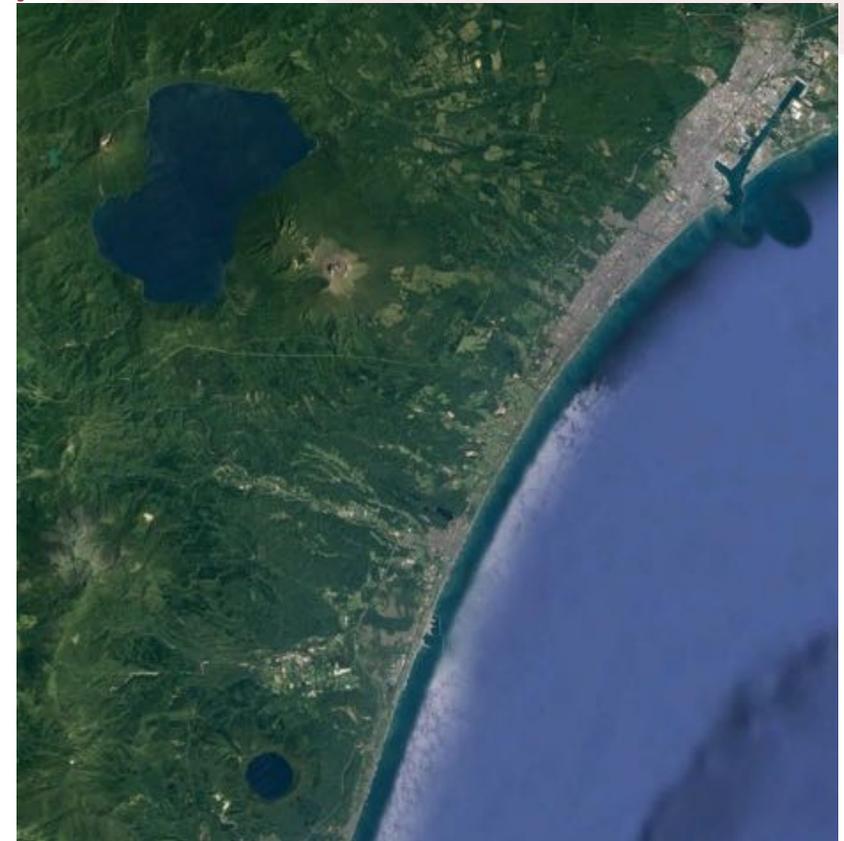
Imágenes a partir de datos polarimétricos

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/img_up/pal_polarization.htm



2006/08/19 01:17 UT ALOS PALSAR POLARIMETRY

Tomakomai, Japan, 19th August, 2006.



Real-colour optical satellite image



UNIVERSITÀ DI PAVIA

Bandas de radar (estándar IEEE)

| Band | Frequency (GHz) |
|------|-----------------|
| HF | 0.003 - 0.03 |
| VHF | 0.03 - 0.3 |
| UHF | 0.3 - 1 |
| L | 1 - 2 |
| S | 2 - 4 |
| C | 4 - 8 |
| X | 8 - 12 |
| Ku | 12 - 18 |
| K | 18 - 27 |
| Ka | 27 - 40 |
| V | 40 - 75 |
| W | 75 - 110 |
| mm | 110 - 300 |

*"IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands," IEEE Std 521-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984) , vol., no., pp.0_1-3, 2003
doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94224*

URL:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1160089&isnumber=26011>



Misma zona, diferentes bandas

X



L



P



JPL



UNIVERSITÀ DI PAVIA



Datos de radar

- Una “imagen” de radar (un mapa de reflectividad de radar) informa los valores de los píxeles vinculados al campo retrodispersado
- El campo retrodispersado depende de la interacción onda-objetivo, con diferentes factores relevantes para él:
 - combinación coherente dentro del píxel;
 - rugosidad de la superficie;
 - orientación de la superficie con respecto al radar;
 - propiedades eléctricas y contenido de humedad del objetivo



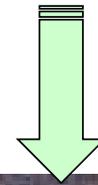
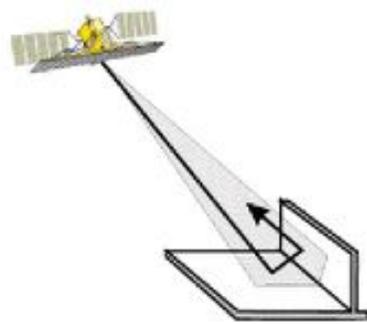
Rugosidad

- La rugosidad de la superficie es un factor importante para determinar la retrodispersión:
 - las superficies lisas reflejan las ondas electromagnéticas como si fueran un espejo y las alejan del sensor;
 - las superficies rugosas dispersan las ondas electromagnéticas, incluso hacia el sensor.
- La rugosidad es relativa a λ . Las variaciones promedio para superficies “rugosas” son mayores que la mitad de la proyección de λ en la normal de la superficie

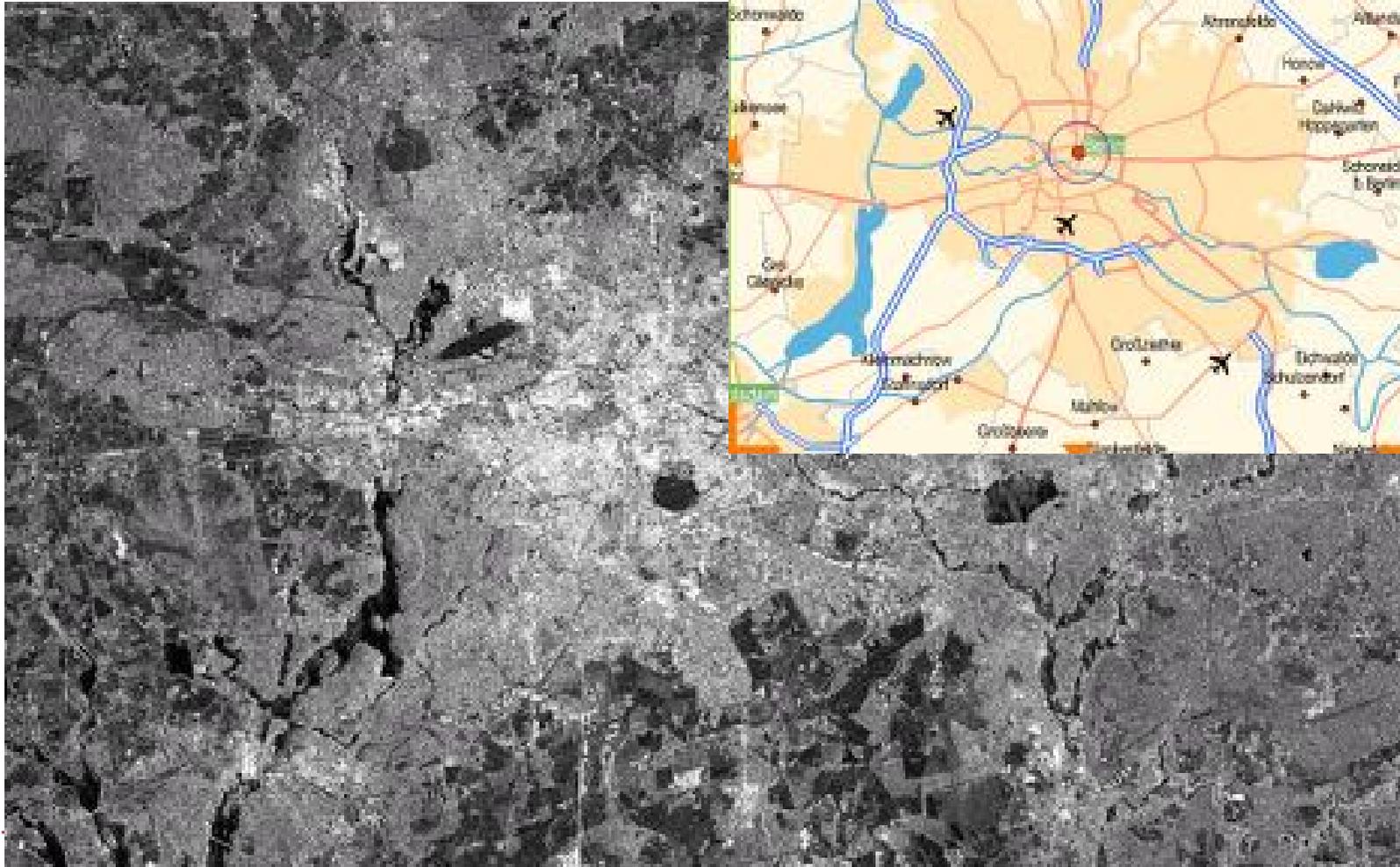


Corner reflection

- Fuerte reflexión, típica de las estructuras artificiales.

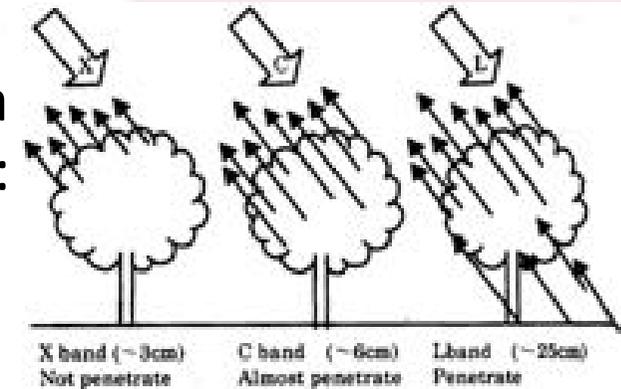


Areas urbanas



Dispersión de volumen

- La dispersión de volumen está relacionada con la la dispersión en un medio no homogéneo, como:
 - vegetación
 - suelo seco, arena
 - hielo



- La presencia de humedad altera las propiedades de retrodispersión de un objetivo:
 - Los objetivos húmedos tienden a reflejar más desde su superficie y menos desde su volumen

