

Utilización de la coherencia interferométrica SAR para monitorización de cultivos

Juan Manuel López Sánchez

Arturo Villarroya Carpio

Alejandro Mestre Quereda

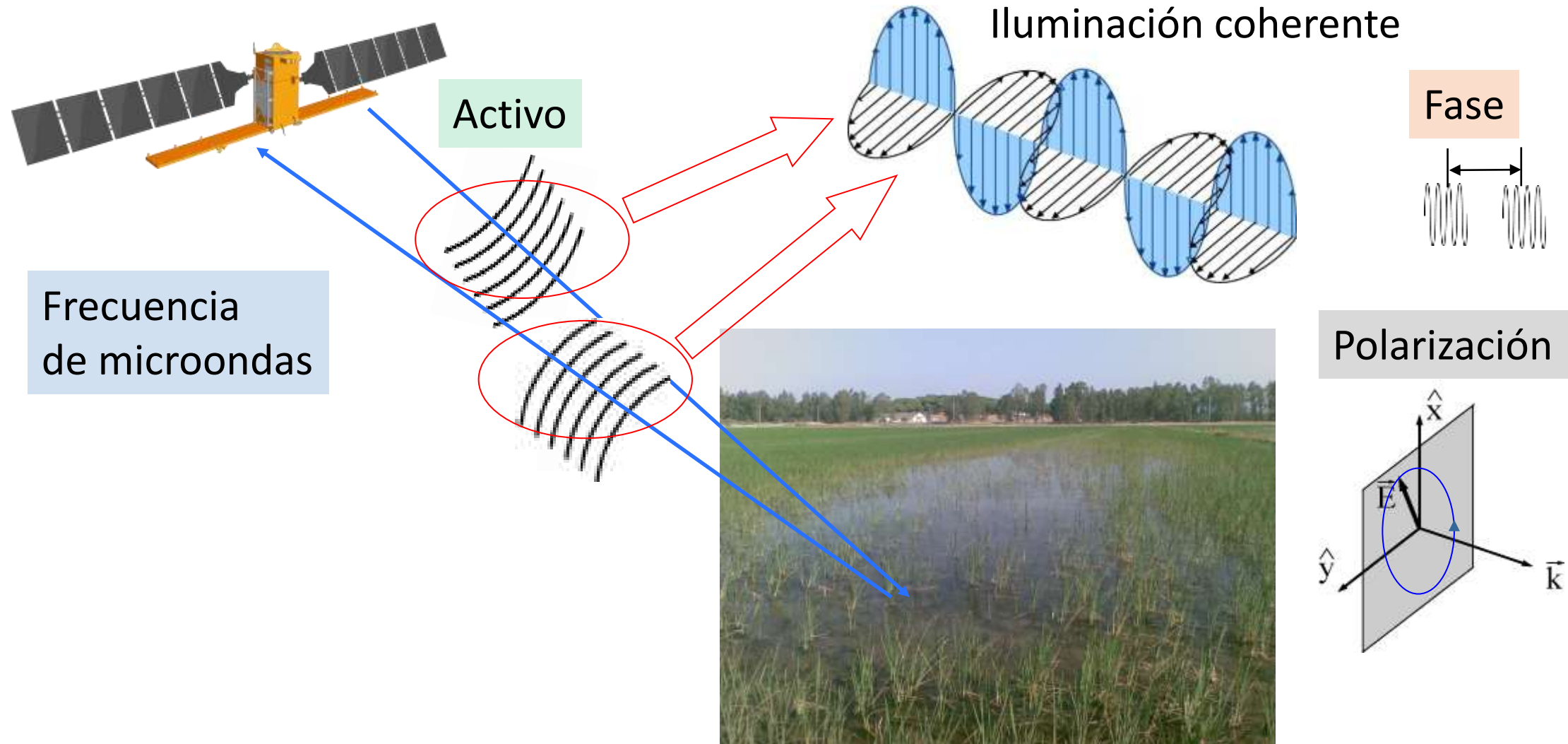


Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



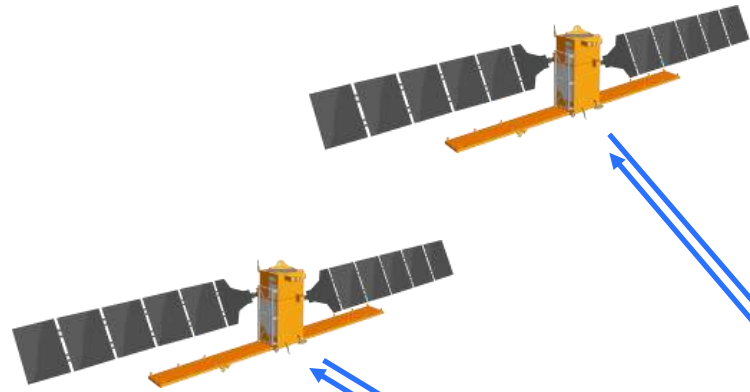
¿Por qué usar un radar en aplicaciones de agricultura?

Características específicas del radar de apertura sintética (SAR)



¿Por qué usar un radar en aplicaciones de agricultura?

- Proporciona **sensibilidad** a características físicas de la escena:
 - Propiedades dieléctricas: contenido de agua (suelo y vegetación)
 - Geometría: formas, tamaños y orientaciones de los elementos de la escena
- **Calendario fiable** de adquisición de imágenes:
 - No afectado por nubes
 - Independiente de la iluminación solar: día y noche
- Información **complementaria** a la de sensores ópticos



Combinación de imágenes tomadas...

... con diferente ángulo de incidencia

... en diferentes momentos



Interferometría SAR

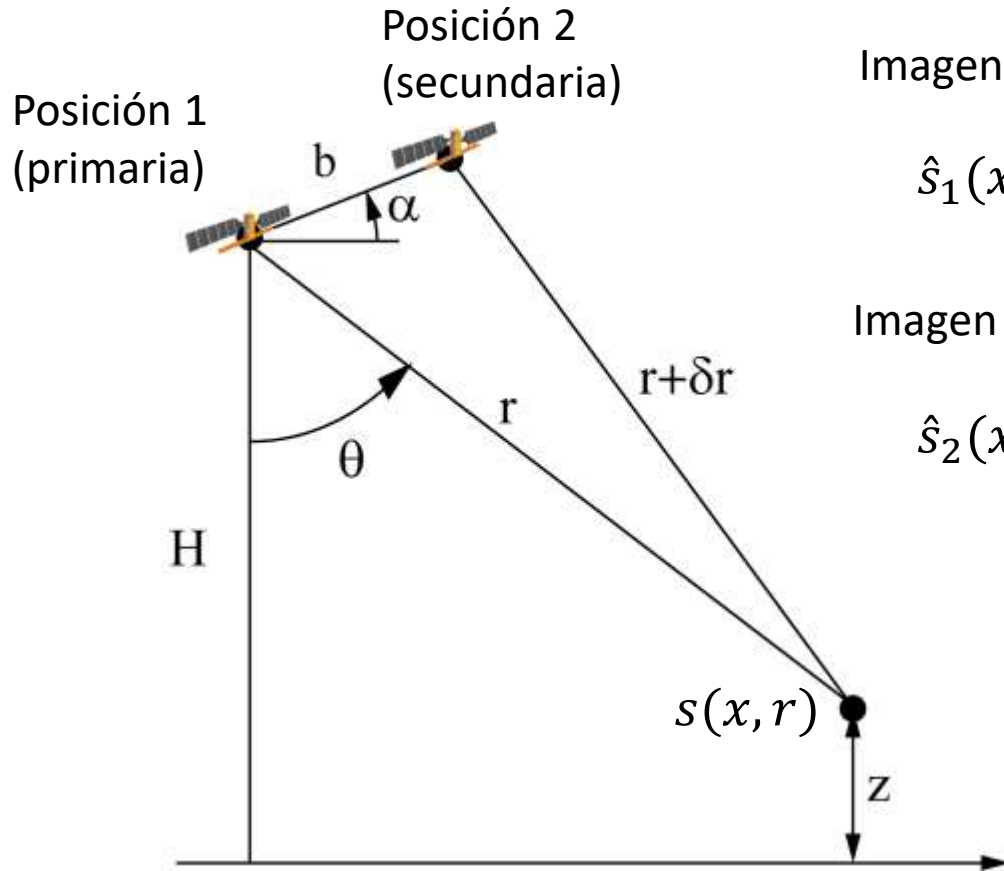


Imagen 1

$$\hat{s}_1(x, r) = s(x, r) \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r \right]$$

Imagen 2

$$\hat{s}_2(x, r + \delta r) = s(x, r) \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (r + \delta r) \right]$$

Diferencia de distancia
(camino recorrido)

Fase interferométrica

$$\varphi = \arg[\hat{s}_1(x, r) \hat{s}_2^*(x, r + \delta r)] = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r$$

Estimación de la posición vertical (p. ej., topografía)

$$\delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi \Rightarrow \sin(\alpha - \theta) = \frac{(r + \delta r)^2 - r^2 - b^2}{2rb}$$



$$z = H - r \cos(\theta)$$

b: Línea de base

Coherencia interferométrica

- La fase medida siempre se ve afectada por ruido (incertidumbre)

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r + \varphi_n$$

- ¿Calidad de la fase? Totalmente determinada por la **coherencia interferométrica**:

$$\gamma = \frac{\langle s_1 \cdot s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1 \cdot s_1^* \rangle \langle s_2 \cdot s_2^* \rangle}} = |\gamma| e^{j\varphi}$$

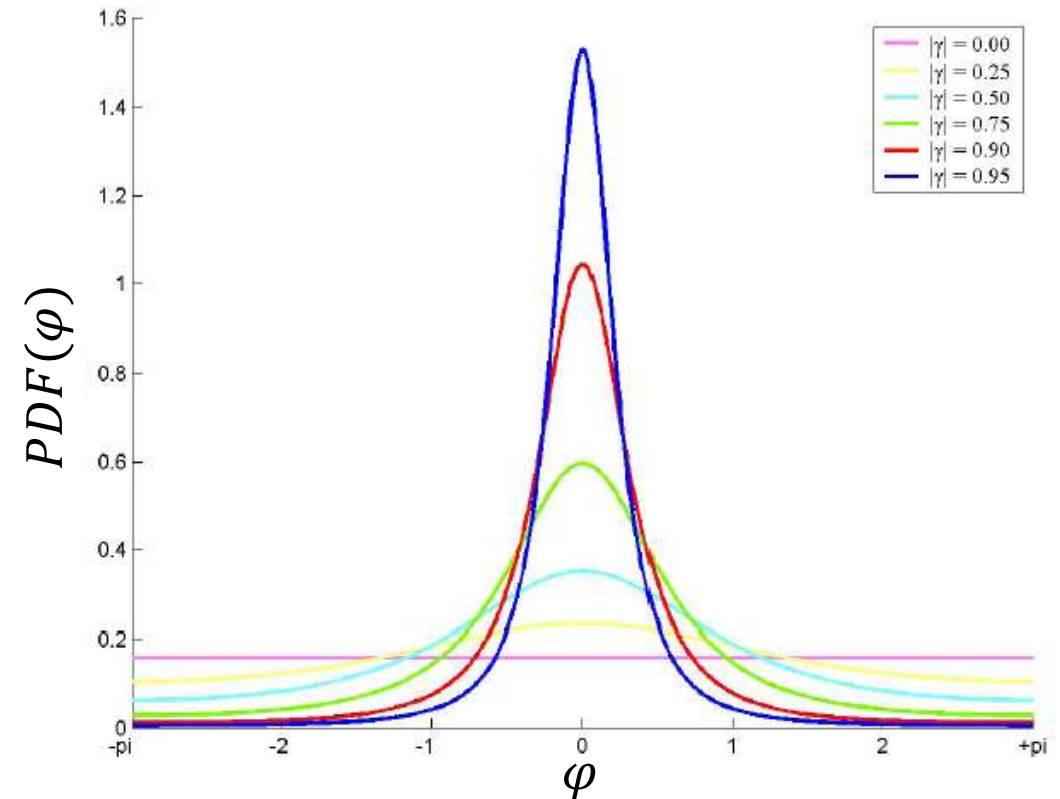
Estimación

(normalmente en una ventana espacial o filtrado paso bajo)

Fase interferométrica

Coherencia

$$0 \leq |\gamma| \leq 1$$



Coherencia interferométrica

- ¿Por qué la coherencia es menor que 1?

$$\gamma = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_B \cdot \gamma_{vol} \cdot \gamma_{temp} \cdot \gamma_{sys}$$

- Fuentes de decorrelación

- **Ruido** térmico:

- Depende de la SNR: afecta sobre todo a las zonas con bajo nivel de respuesta

- Diferencia de ángulo de incidencia entre las imágenes (decorrelación por línea de base o **geométrica**):

- Se puede compensar mediante **geometría**

- Decorrelación **volumétrica**:

- Siempre que haya dos o más objetos dentro del píxel (por ejemplo, vegetación)

- Decorrelación **temporal**:

- Debida a cambios en la escena entre las imágenes de adquisición

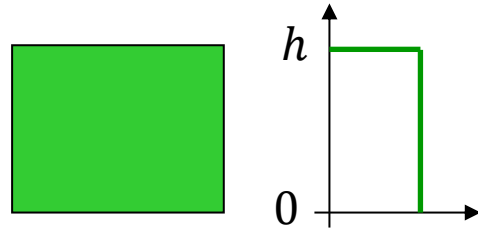
- Imprecisiones del sistema o del **procesado**, por ejemplo:

- Errores de co-registrado, cuantificación de las imágenes, etc.

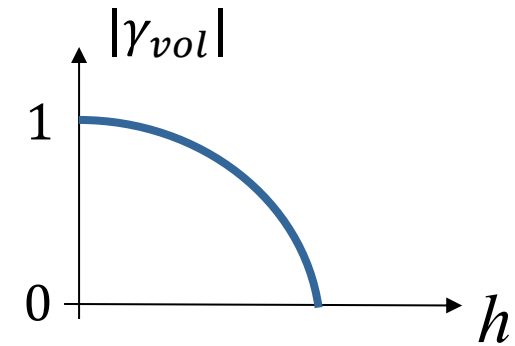
¡Proporcionan sensibilidad a las propiedades de la escena!

Decorrelación volumétrica en la vegetación

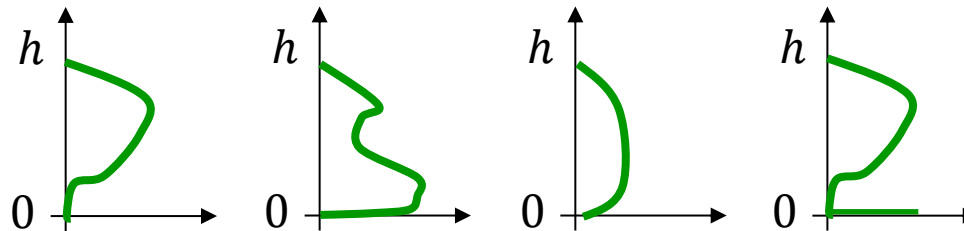
- Depende de la altura de la vegetación: ejemplo con una capa uniforme



$$\gamma_{vol} = e^{j\frac{k_z h}{2}} \text{sinc} \frac{k_z h}{2}$$



- Depende del perfil vertical de la reflectividad radar



- La sensibilidad se escala según los parámetros del sistema:

- Frecuencia
- Línea de base
- Ángulo de incidencia

$$k_z = \frac{4\pi b_n}{\lambda r \sin \theta}$$

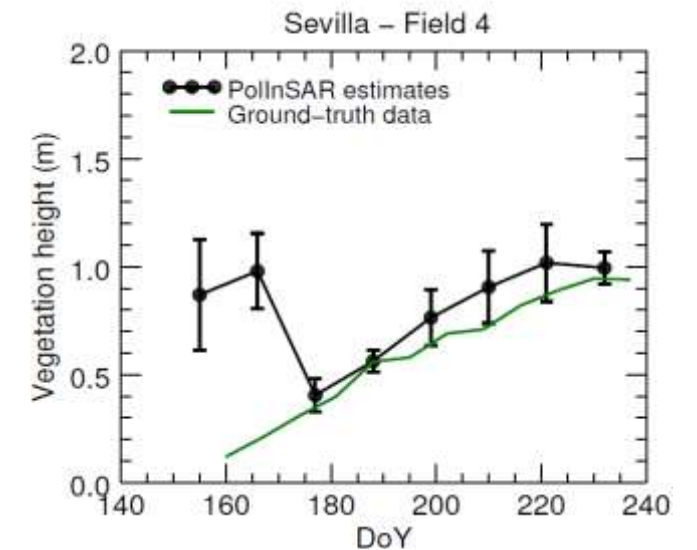
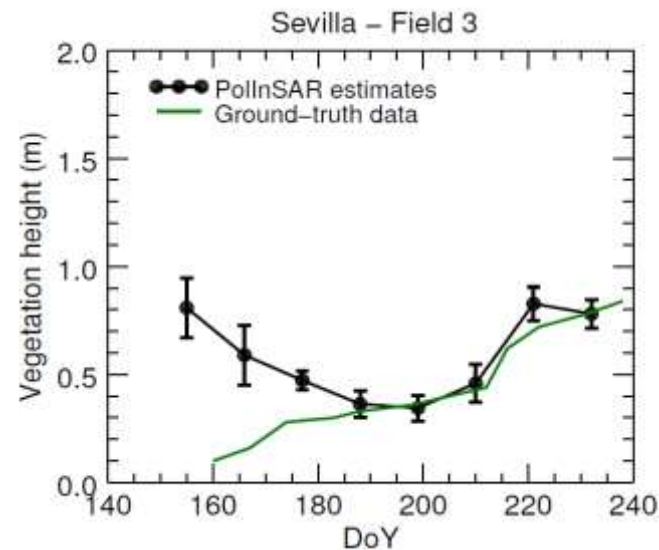
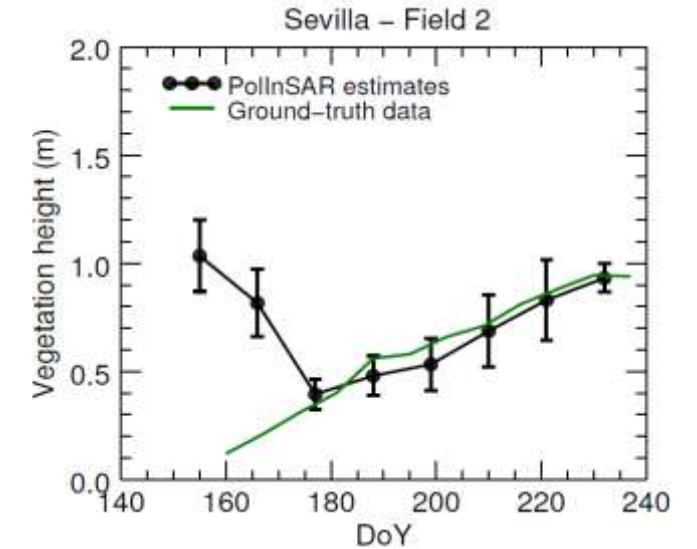
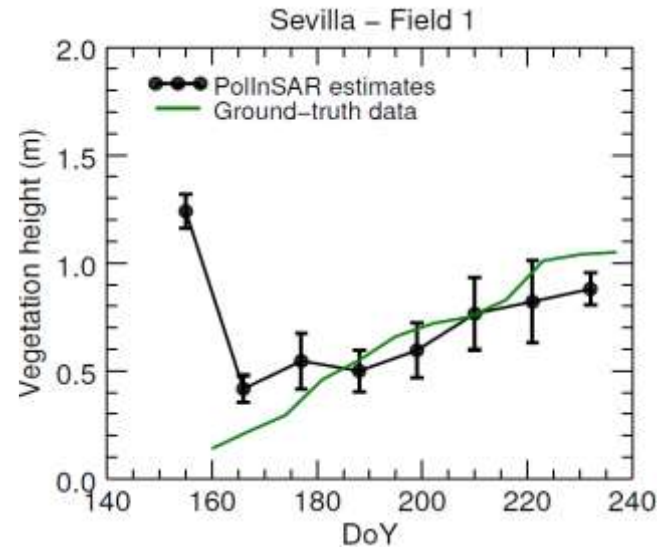
Ejemplo: estimación de altura de las plantas con TanDEM-X

- Sevilla

POLINSAR: Combinación de polarimetría e interferometría

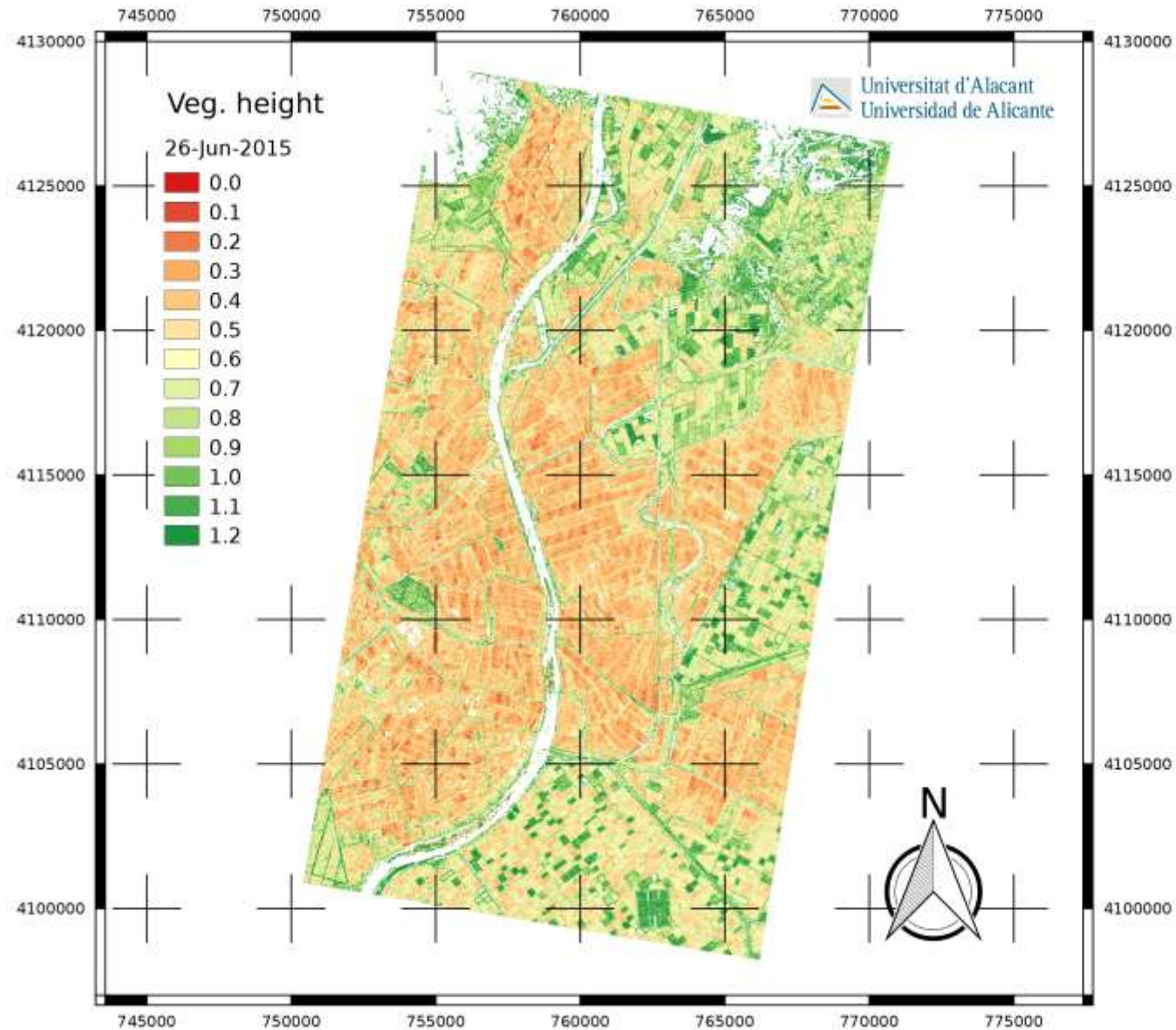
TanDEM-X: Dos imágenes tomadas a la vez (No hay decorrelación temporal)

Lopez-Sanchez et al.
RSE 2017



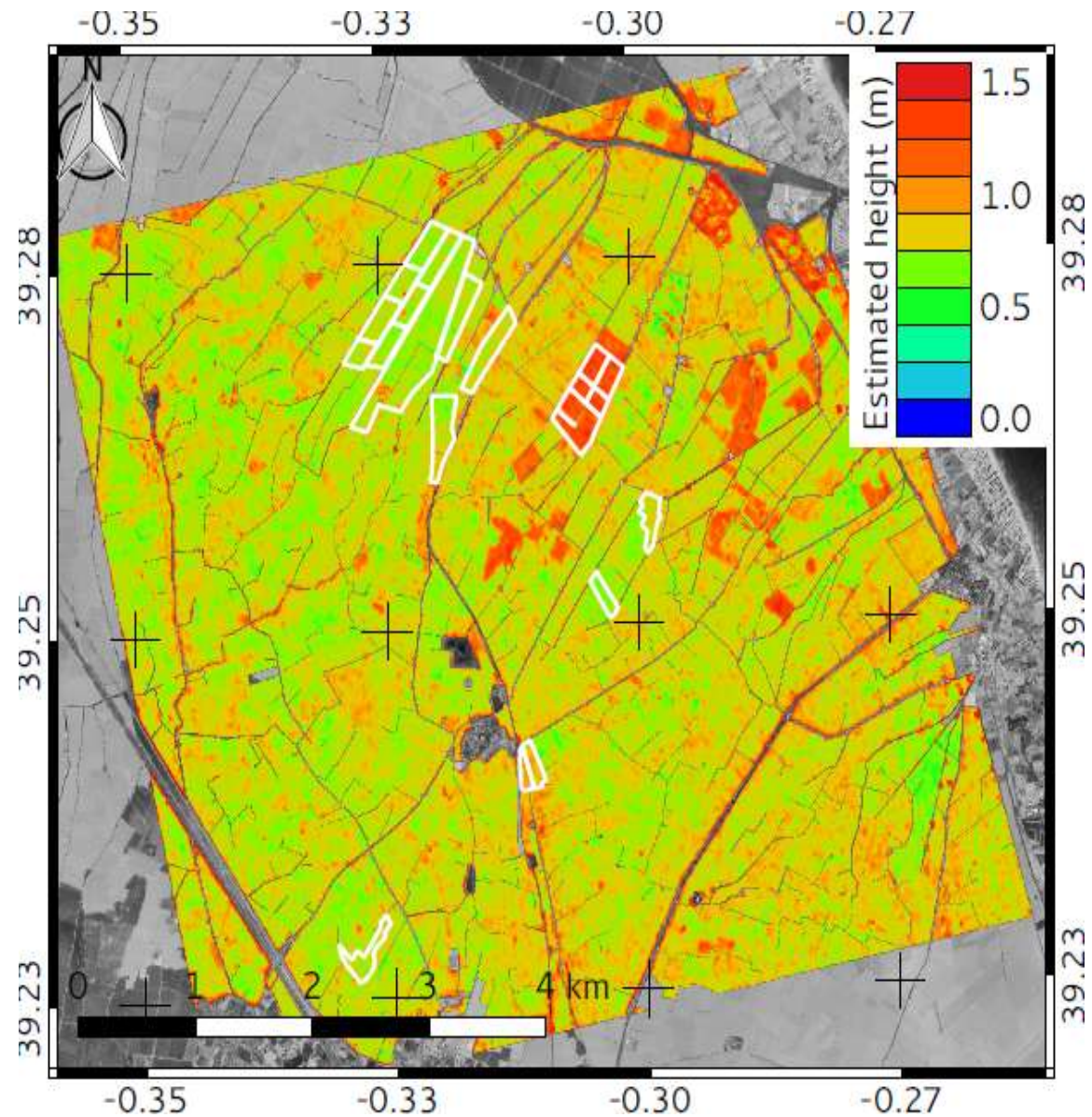
Ejemplo: estimación de altura de las plantas con TanDEM-X

- Sevilla



Ejemplo: estimación de altura de las plantas con TanDEM-X

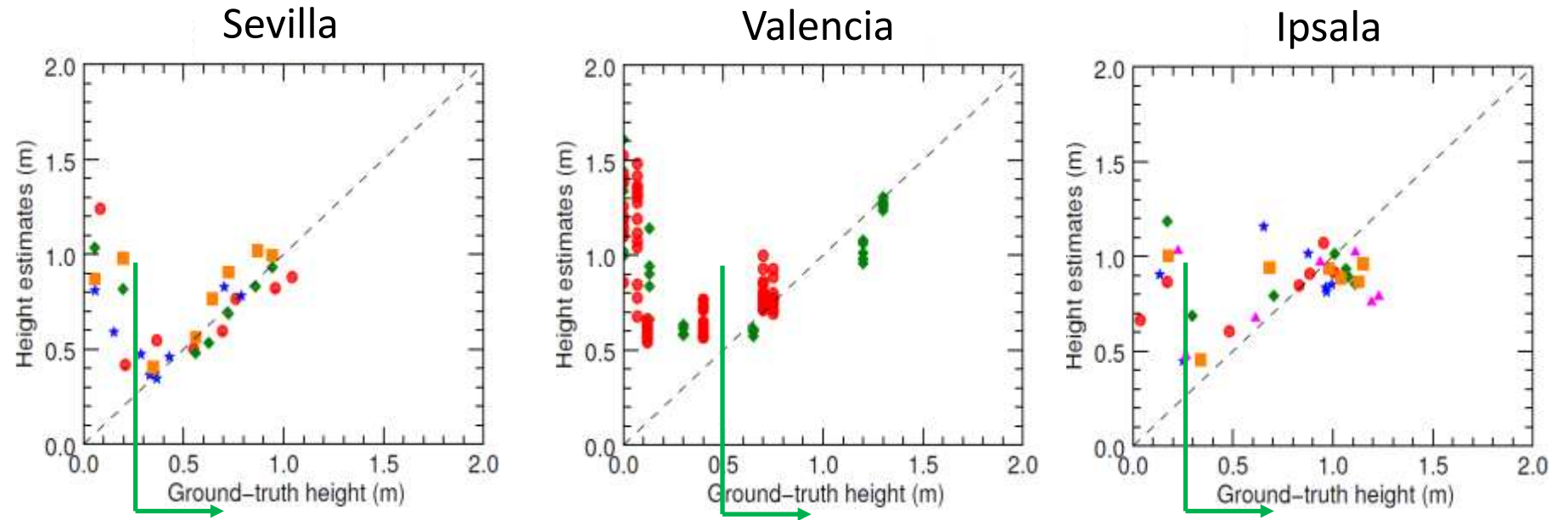
- Valencia



Lopez-Sanchez et al.
RSE 2017

Ejemplo: estimación de altura de las plantas con TanDEM-X

- Validación



Estadísticas para los rangos válidos

Parámetro de sensibilidad

$$k_v = \kappa_Z h_v / 2$$

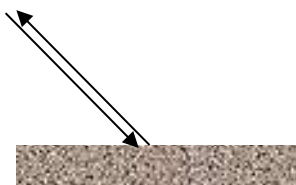
	Sevilla	Valencia	Ipsala
Umbral de h_v (cm)	25	40-60	25
Umbral de k_v	0.3	0.37-0.55	0.2
R^2	0.81	0.79	0.44
RMSE (cm)	9.9	10.0	21.1
n	24	47	29

Decorrelación temporal en cultivos

- Causas:
 - Cambio en la vegetación debido al crecimiento
 - Movimiento de hojas, tallos, etc. inducido por el viento
 - Cambio en el contenido de agua de la planta
 - Cambio en la humedad del suelo (riego)
- Respuesta típica:
 - Fuera de temporada (suelo desnudo): alta coherencia
 - La coherencia es alta al comienzo de la temporada (suelo) y disminuye a medida que las plantas crecen (vegetación)
 - Las prácticas agrícolas (por ejemplo, el arado) disminuyen repentinamente la coherencia

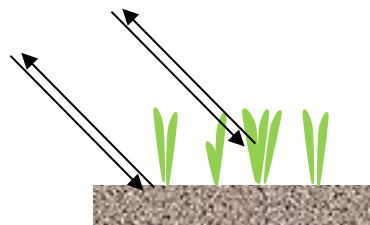
Coherencia interferométrica: índice para el seguimiento de cultivos

Suelo desnudo
(Fuera de la
temporada)



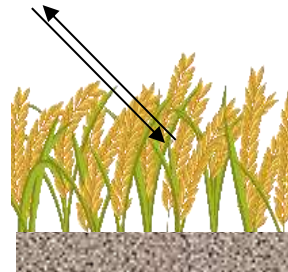
γ ↑↑

Fase vegetativa



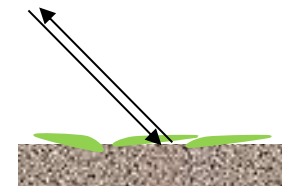
γ ↓

Cultivo
desarrollado



γ ↓↓

~ Suelo desnudo
(tras la
recolección)



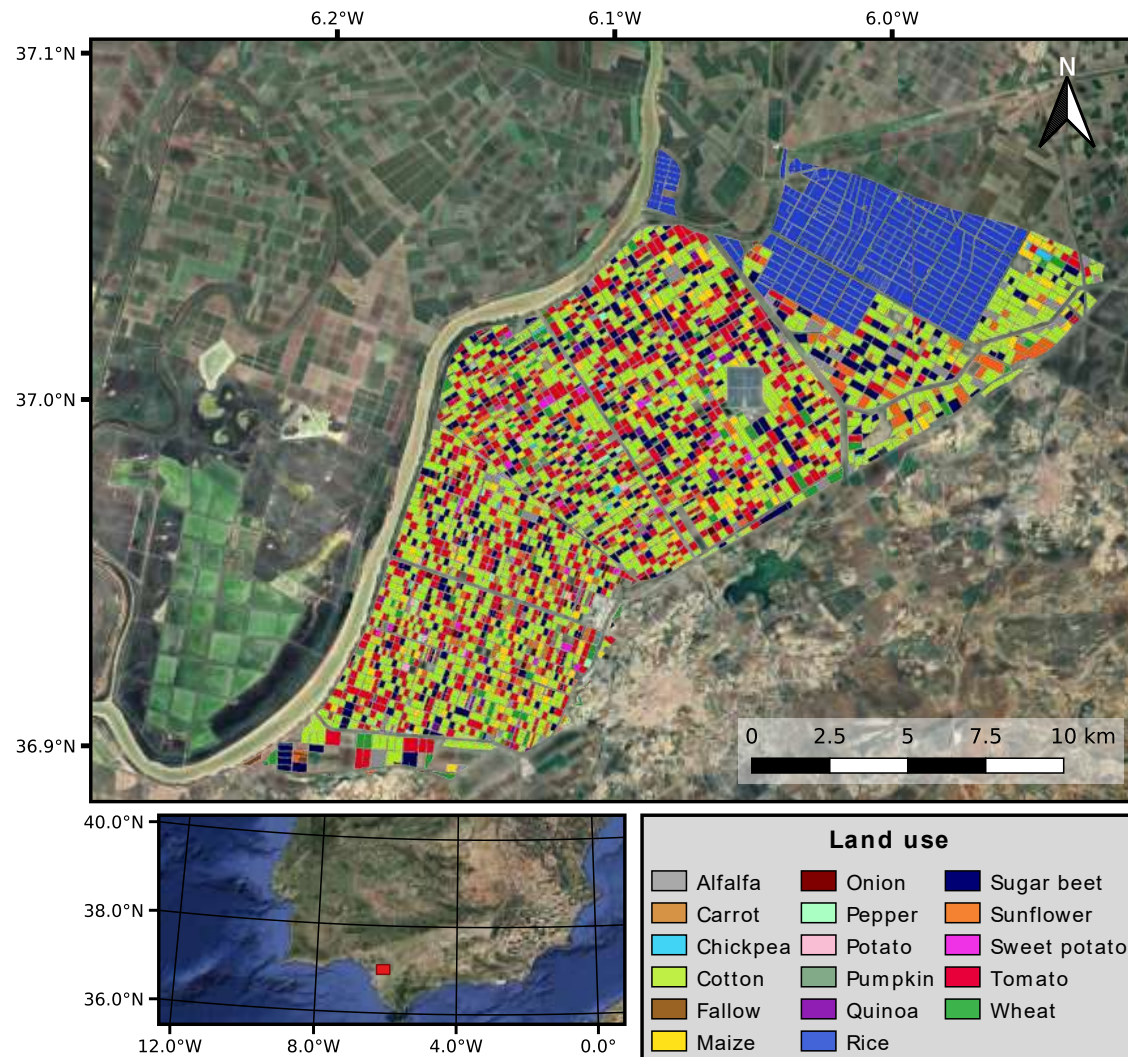
γ ↑↑

$$\gamma = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_B \cdot \gamma_{vol} \cdot \gamma_{temp} \cdot \gamma_{sys}$$

Depende de:

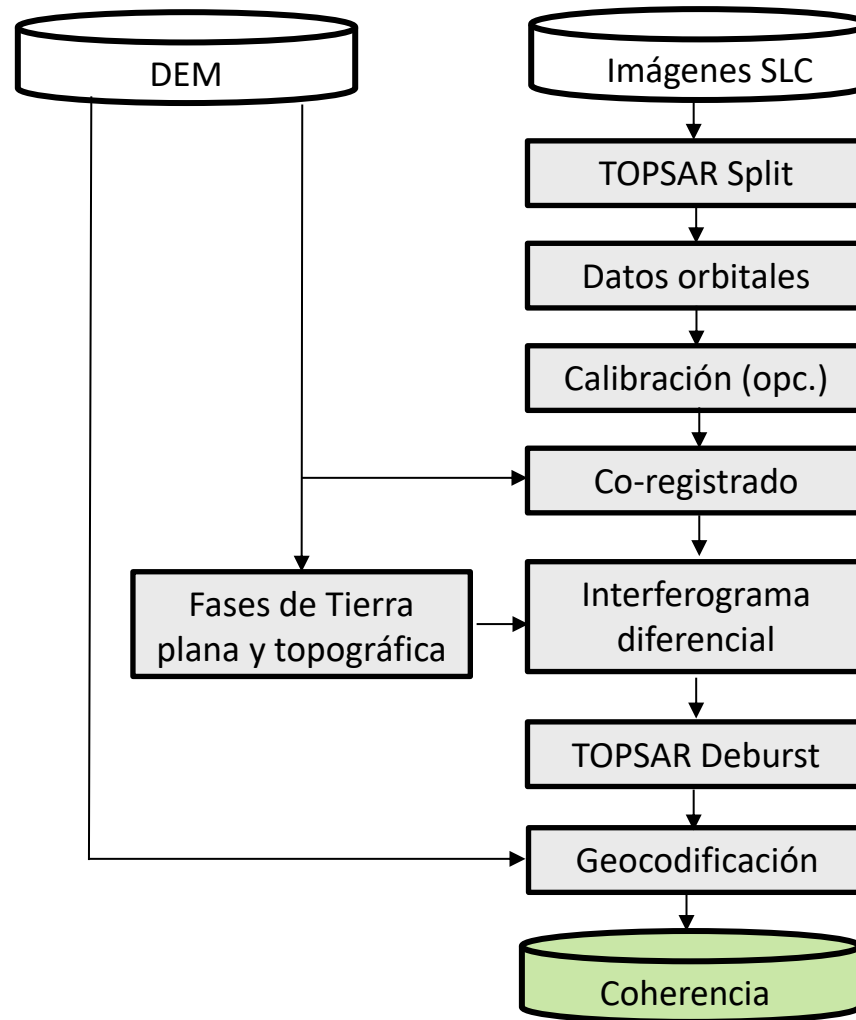
- Banda de frecuencia
- “Línea de base” temporal

Ejemplo con Sentinel-1: Zona de estudio en Sevilla



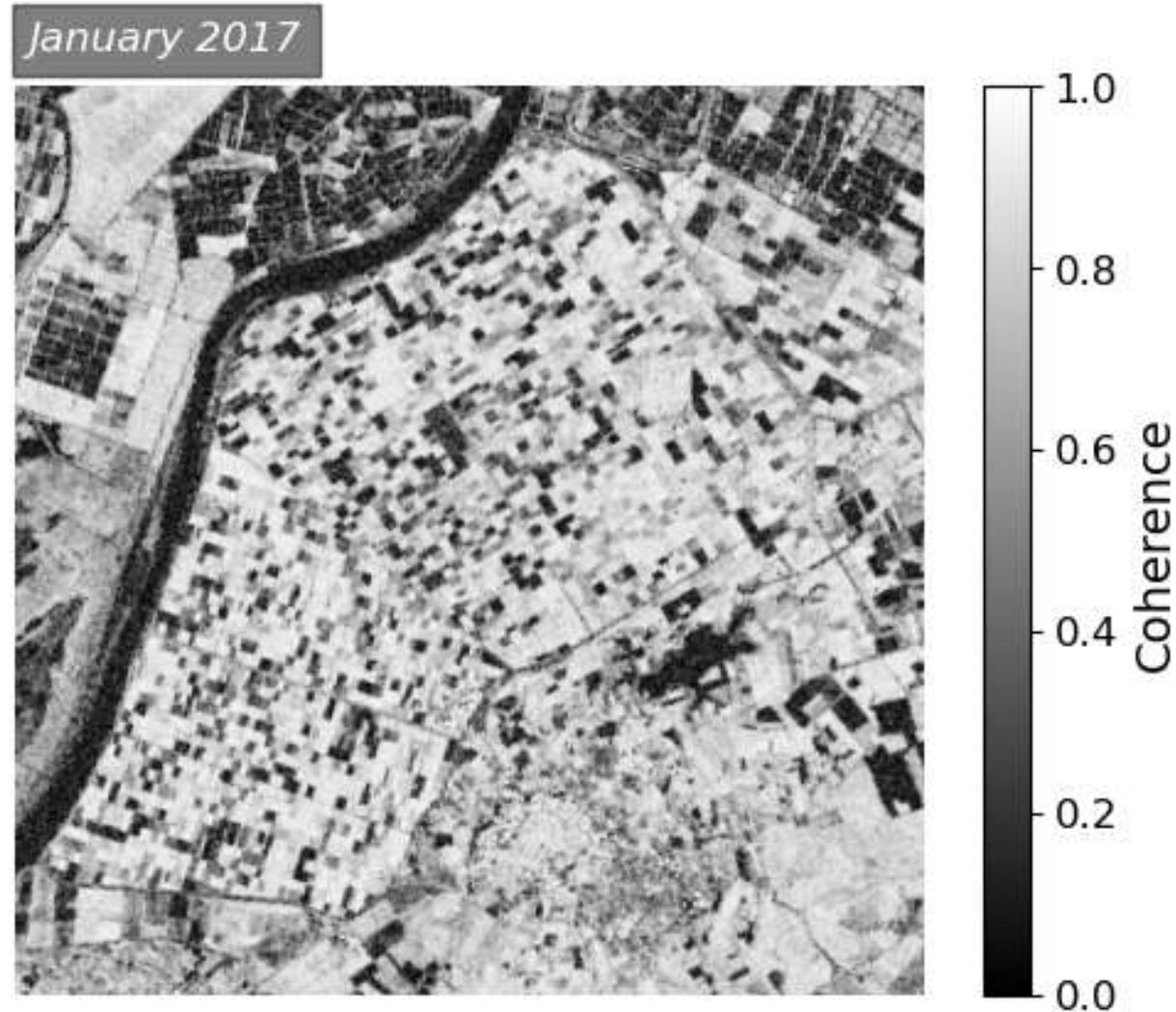
- 17 tipos de cultivo + barbecho
- 5 años completos de imágenes
- Sentinel-1: **Coherencia interferométrica** (calculada a 6 y 12 días)
- Sentinel-2: NDVI

Ejemplo con Sentinel-1: Procesado previo



Ejemplo con Sentinel-1: Series temporales

- Series temporales de coherencia (6 días) medidas con Sentinel-1 (2017)

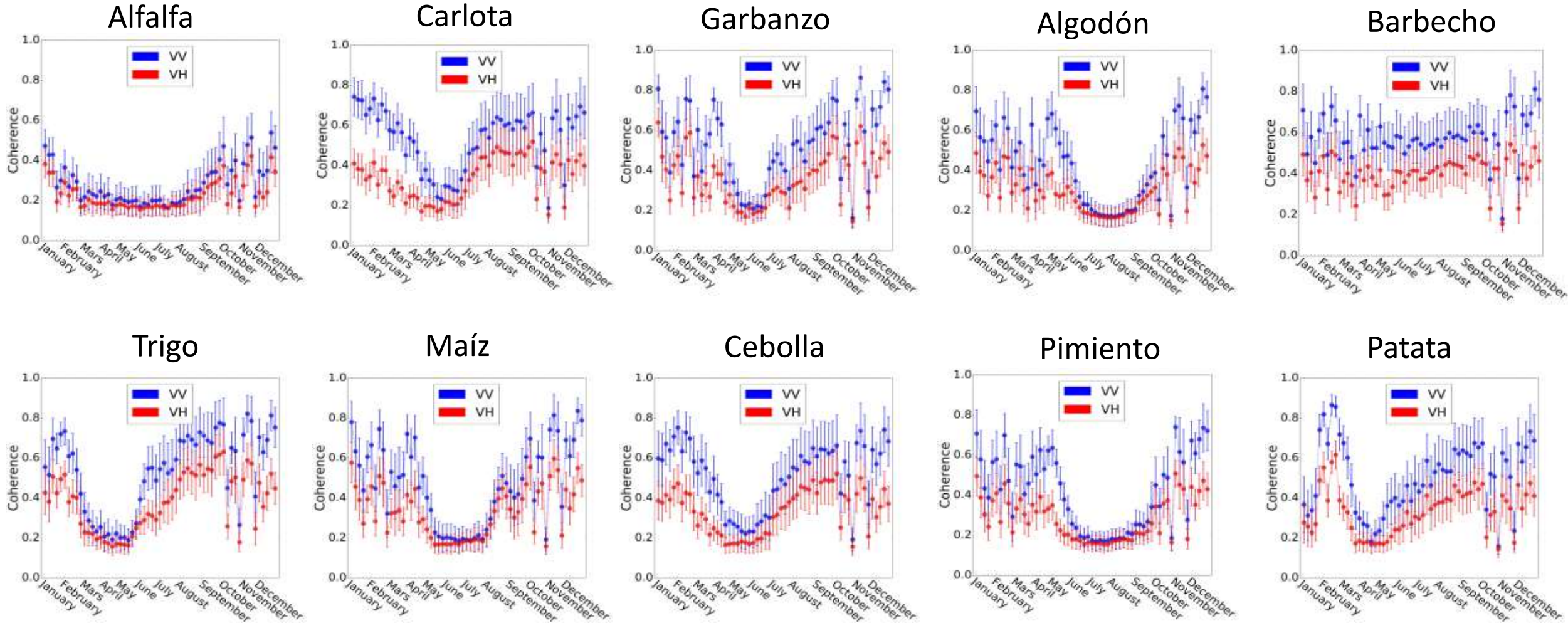


Mestre-Quereda et al.
IEEE JSTARS 2020

Ejemplo con Sentinel-1: Series temporales

- Series temporales de coherencia (6 días) medidas con Sentinel-1 (2017)

Mestre-Querada et al.
IEEE JSTARS 2020



Ejemplo con Sentinel-1: Series temporales

Mestre-Quereda et al.
IEEE JSTARS 2020

- Clasificación de tipos de cultivo

Referencia

Resultado

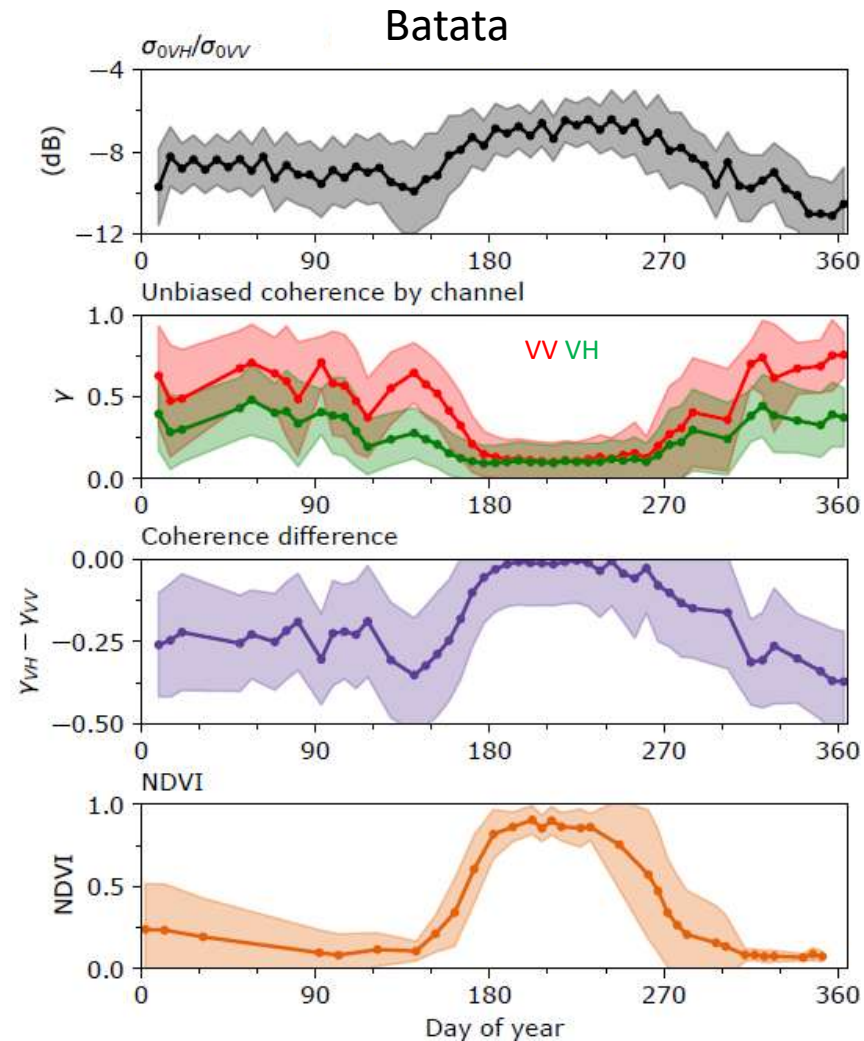
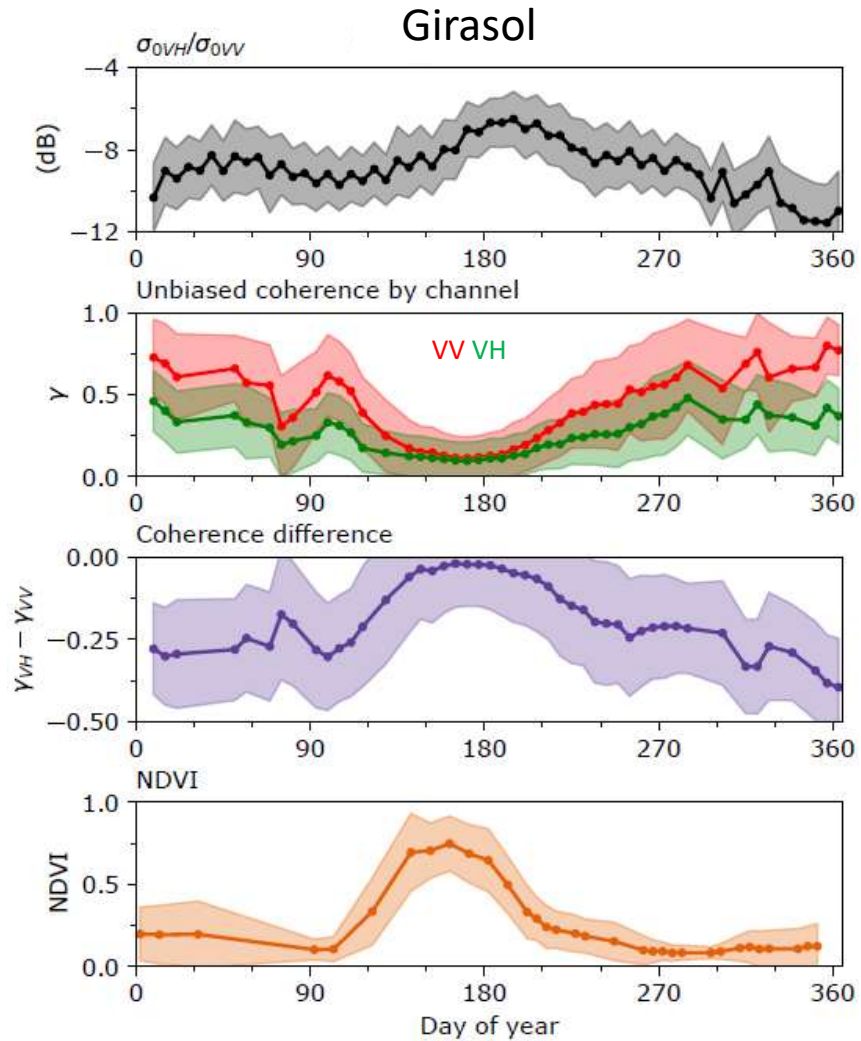


OA (precisión global)

Variables de entrada	VV	VH	VV & VH
Coherencia	77.55%	69.06%	79.19%
Intensidad	74.21%	75.28%	80.04%
Intensidad y coherencia	85.43%	81.51%	86.74%

Ejemplo con Sentinel-1: Seguimiento de cultivos

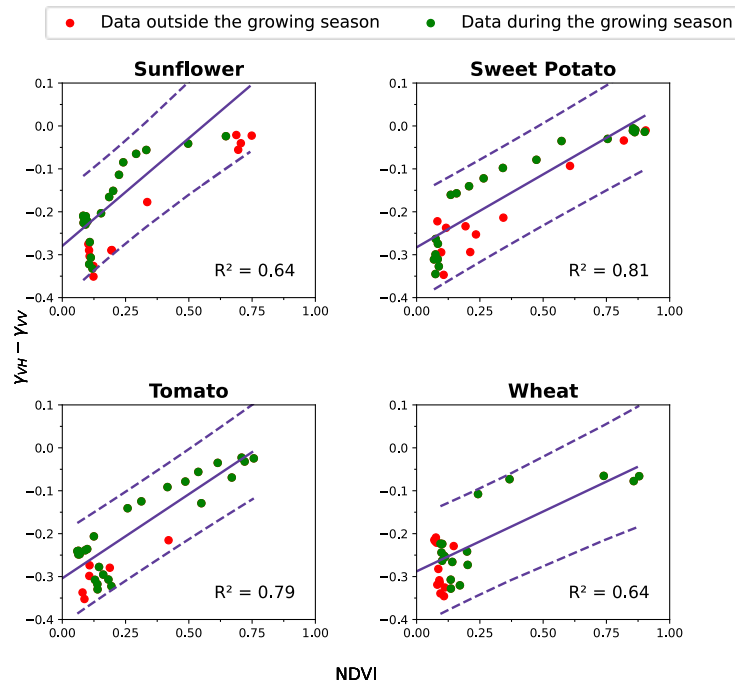
- Comparación con NDVI:



A. Villarroja-Carpio, et al.
RSE, 2022 y Sensors, 2023.

Ejemplo con Sentinel-1: Seguimiento de cultivos

- Comentarios positivos:
 - Alta correlación (R^2) de la coherencia con el NDVI para la mayoría de cultivos
 - Mejor correlación que σ_0



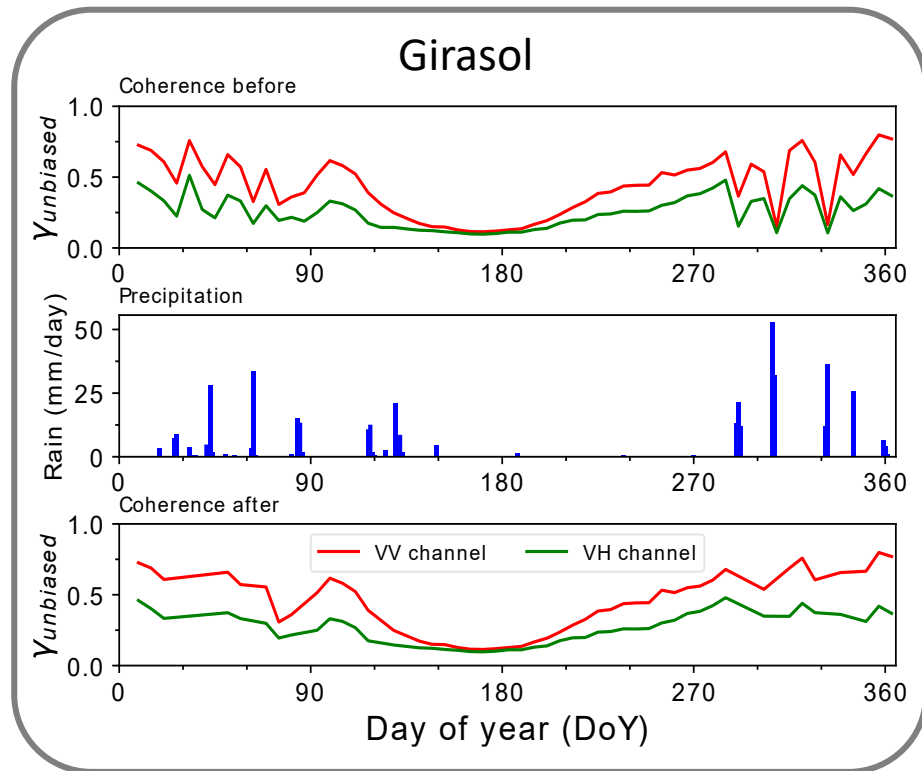
	2017		2018		2019		2020		2021	
	VV	VH	VV	VH	VV	VH	VV	VH	VV	VH
Alfalfa	0,01	-0,01	-0,03	-0,02	0,19	0,12	0,04	0,01	0,36	0,14
Barley	-	-	-0,06	-0,07	-0,04	0,18	0,02	-0,14	0,58	0,30
Carrot	0,37	0,65	0,13	0,72	0,30	0,81	0,29	0,56	0,57	0,68
Chickpea	0,68	0,60	0,76	0,66	0,63	0,66	0,84	0,67	0,39	0,47
Cotton	0,93	0,84	0,92	0,84	0,90	0,85	0,92	0,77	0,81	0,41
Fallow	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maize	0,88	0,75	0,96	0,68	0,87	0,57	0,94	0,80	0,83	0,59
Oats	-	-	0,10	0,17	0,18	0,02	0,07	0,14	0,60	0,36
Onion	0,66	0,82	0,72	0,70	0,85	0,80	0,67	0,76	0,80	0,76
Pepper	0,89	0,72	0,85	0,78	0,92	0,69	0,87	0,90	0,88	0,71
Potato	0,92	0,74	0,29	0,50	0,68	0,66	0,47	0,35	-	-
Pumpkin	0,80	0,76	0,82	0,87	0,88	0,82	0,96	0,83	0,89	0,85
Quinoa	0,83	0,67	0,75	0,20	0,89	0,79	0,80	0,66	0,88	0,59
Rice	0,18	0,07	0,36	0,25	0,33	0,30	0,08	0,17	0,30	0,35
Sugar beet	0,85	0,78	0,78	0,80	0,82	0,76	0,73	0,67	0,83	0,76
Sunflower	0,72	0,77	0,82	0,72	0,74	0,69	0,72	0,72	0,81	0,94
Sweet potato	0,78	0,72	0,90	0,76	0,95	0,67	0,96	0,75	0,89	0,78
Tomato	0,85	0,81	0,90	0,71	0,79	0,55	0,83	0,62	0,75	0,64
Wheat	0,72	0,51	0,03	-0,06	0,49	0,45	0,28	0,24	0,55	0,26

A. Villarroja-Carpio, et al. RSE, 2022 y Sensors, 2023.

Ejemplo con Sentinel-1: Seguimiento de cultivos

- Aunque...

- Afectada por lluvias (fuera de temporada)
- Y por el riego (si lo hubiera..)

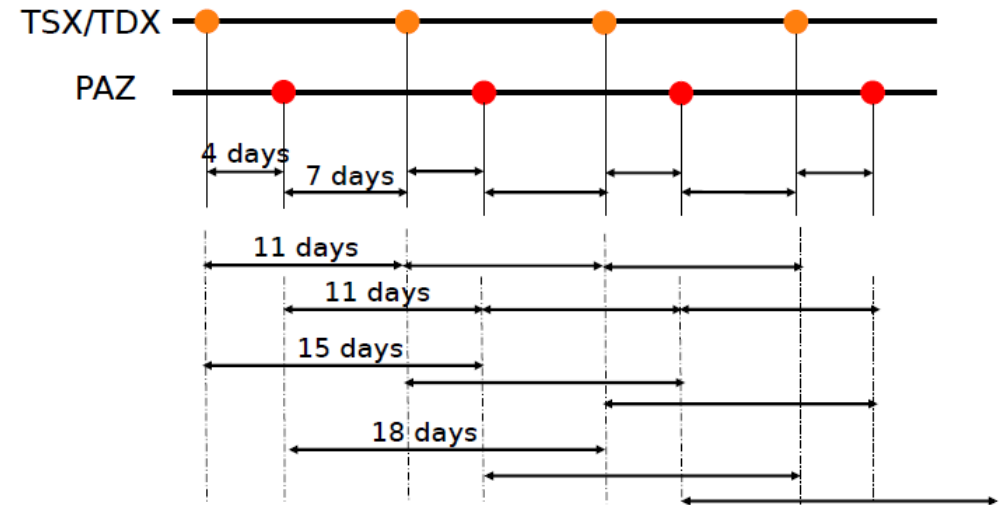
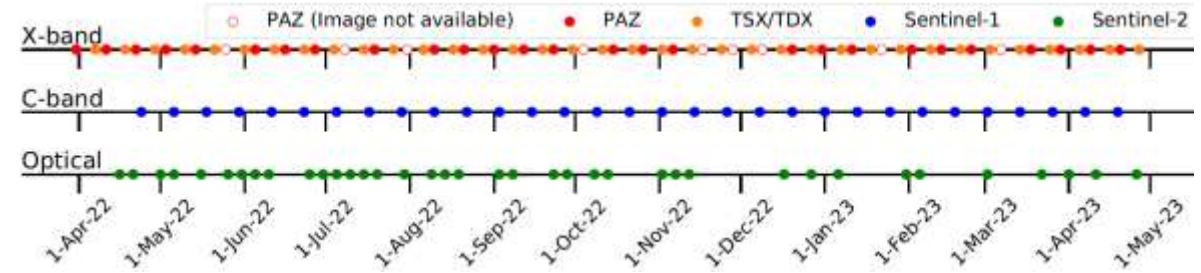
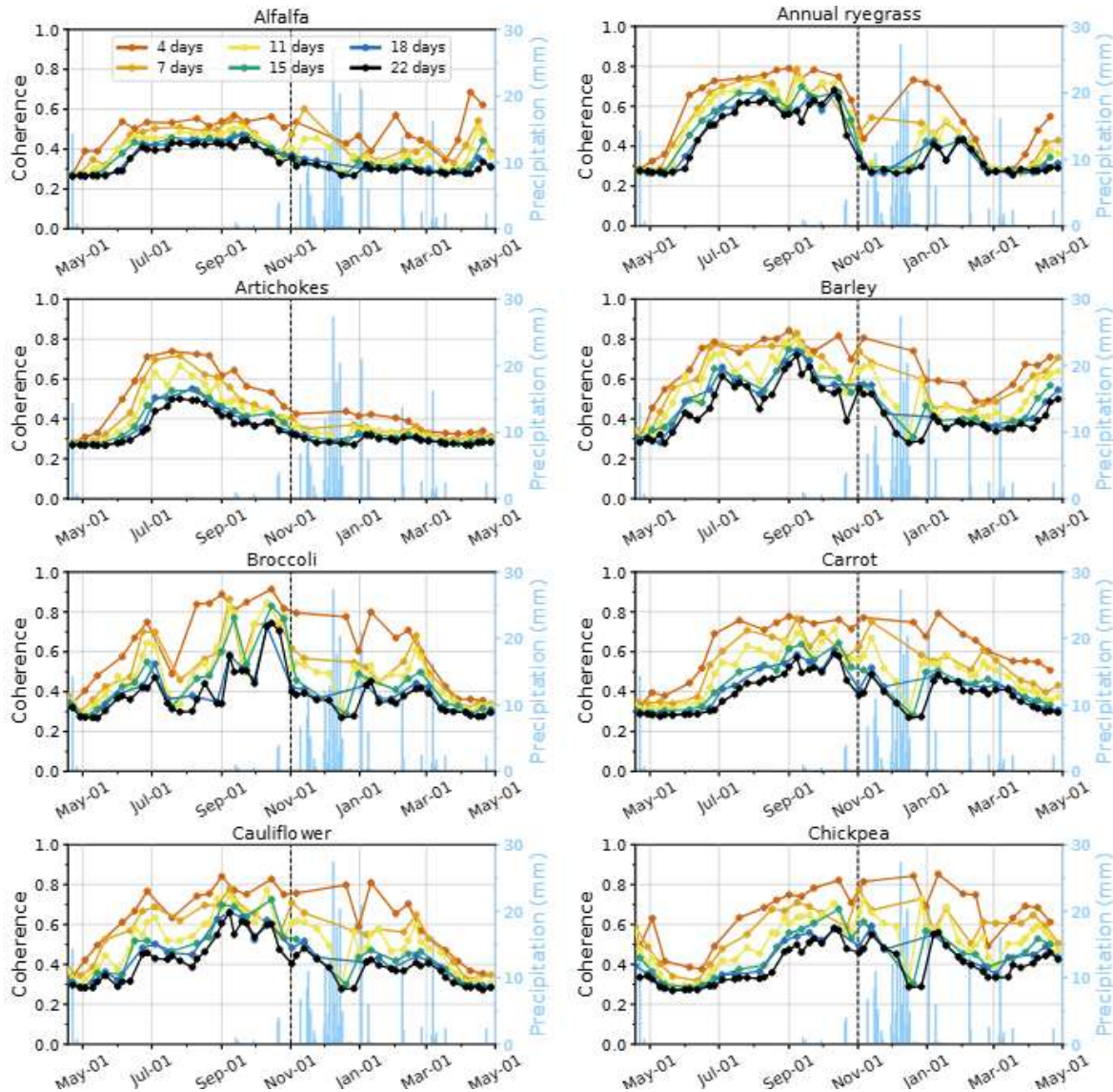


- Más detalles:

- La ventana de estimación debe ser grande:
- limitada resolución espacial final
- Pueden combinarse coherencias de distintas órbitas

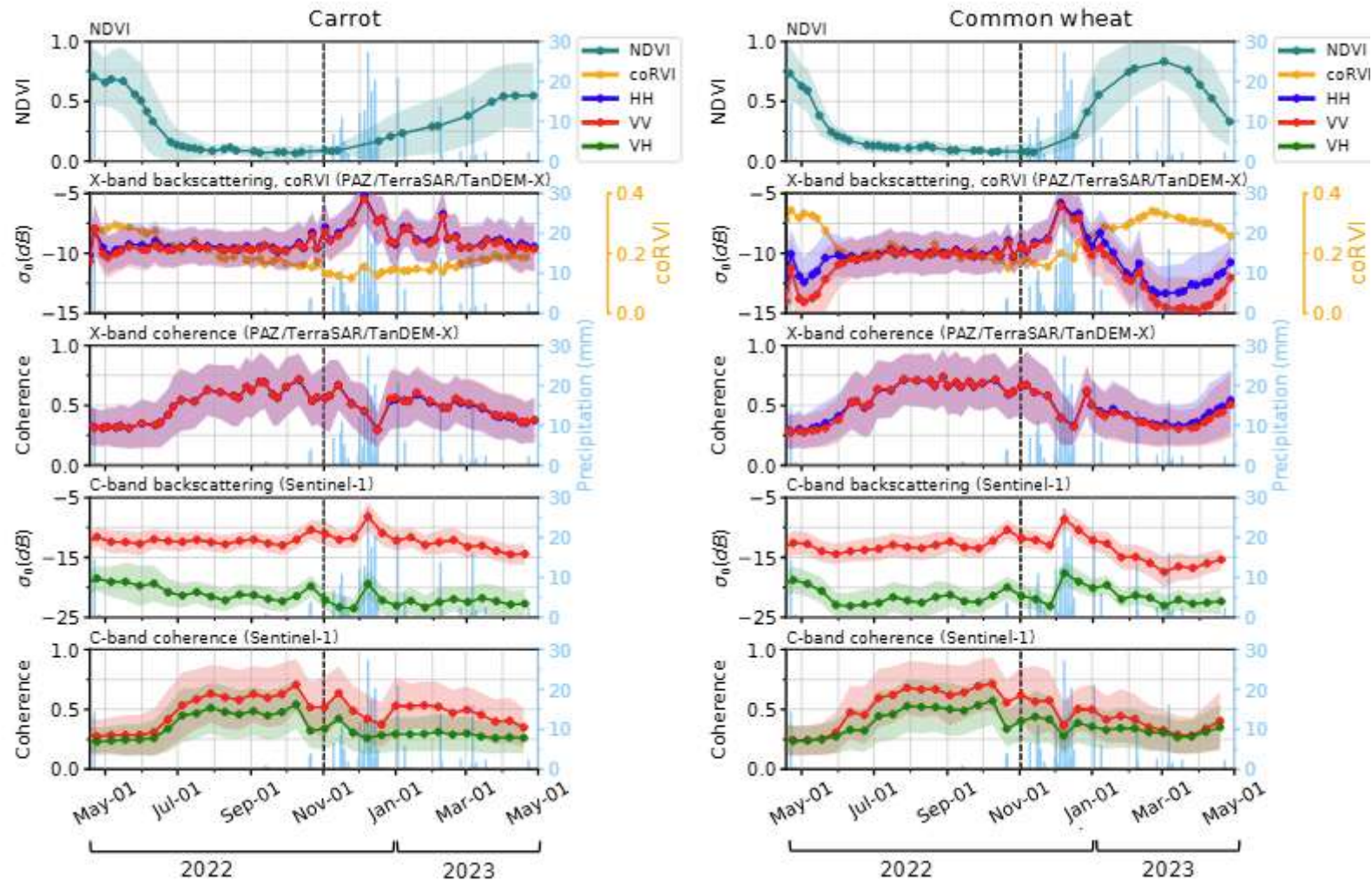
A. Villarroja-Carpio, et al.
RSE, 2022 y Sensors, 2023.

Ejemplo en banda X: PAZ y TerraSAR-X/TanDEM-X



A. Villarroya-Carpio, et al. IEEE JSTARS, 2025.

Ejemplo en banda X: PAZ y TerraSAR-X/TanDEM-X



A. Villarroya-Carpio, et al. IEEE JSTARS, 2025.

Algunas publicaciones (orden alfabético)

- M. Busquier, et al. “Exploring TanDEM-X Interferometric Products for Crop-Type Mapping”. Remote Sensing, Vol. 12, No. 11, pp. 1774, 2020.
- J. M. Lopez-Sanchez, et al. “Retrieval of vegetation height in rice fields using polarimetric SAR interferometry with TanDEM-X data”. Remote Sensing of Environment, Vol. 192, pp. 30-44, 2017.
- A. Mestre-Quereda, et al. “Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping”. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 13, pp. 4070-4084, 2020.
- N. Romero-Puig, J. M. Lopez-Sanchez. “A Review of Crop Height Retrieval Using InSAR Strategies: Techniques and Challenges”. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 14, pp. 7911-7930, 2021.
- A. Villarroya-Carpio, J. M. Lopez-Sanchez, M. E. Engdahl. “Sentinel-1 interferometric coherence as a vegetation index for agriculture”. Remote Sensing of Environment, Vol. 280, nr. 113208, 2022.
- A. Villarroya-Carpio, J. M. Lopez-Sanchez. “Multi-Annual Evaluation of Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence as a Tool for Crop Monitoring”. Sensors, Vol. 23, No. 4, pp. 1833, 2023.
- A. Villarroya-Carpio, J. M. Lopez-Sanchez. “X-band Repeat-pass Coherence at Short Temporal Baselines for Crop Monitoring”. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2025. Aceptado.

Agradecimientos



Proyecto SEOM-S14SCI-Land (SInCohMap)



Proyectos AO-003-012 y LAN3795



Proyecto PID2020-117303GB-C22

Datos de referencia
compartidos por la Junta
de Andalucía

