



2^{da} Parte: Series Temporales de SAR Interferométrico para Deslizamientos de Tierra

Evaluación de Desastres Usando Radar de Apertura Sintética

Eric Jameson Fielding y Alexander Louis Handwerger, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

20 de octubre de 2022



Objetivos de Aprendizaje

Al final de esta presentación, usted podrá:

- Entender los conceptos básicos de la Interferometría SAR
- Describir lo que la fase interferométrica SAR indica sobre la superficie de la Tierra y los deslizamientos de tierra
- Describir el procesamiento de datos necesario para el análisis de una serie temporal de datos interferométricos de SAR (InSAR)
- Entender la información en las imágenes de SAR interferométrico y las series temporales sobre el desplazamiento del suelo



Prerrequisitos

- ARSET Conceptos Básicos de SAR 2017
- ARSET Procesamiento y Análisis de Datos SAR 2017
- ARSET Introducción a SAR Interferométrico 2017
- ARSET SAR Interferométrico para la Observación de Derrumbes 2019



Reconocimientos

- Caltech: Z. Yunjun
- JPL: H. Fattahi, N. Pinto, Y. Zheng, P. Agram, E. Gurrola, equipo de procesamiento de UAVSAR
- NASA AFRC y JSC: J. McGrath, pilotos y personal
- USGS: J. Coe, W. Schulz
- UC Berkeley: R. Bürgmann, B. Delbridge, Xi Hu, Yuankun Liu
- U de Maryland: Mong-Han Huang
- Programas de NASA Earth Surface and Interior, Geodetic Imaging, NISAR Science Team





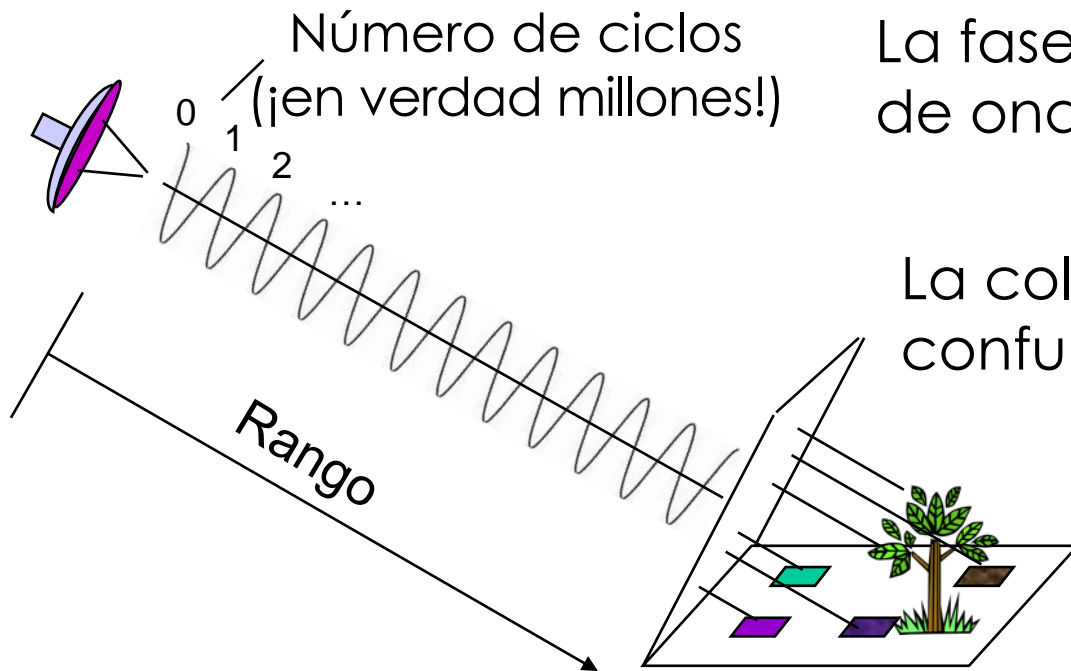
Teoría de la Interferometría SAR (Repaso)

Teoría de la Interferometría de SAR

- Breve repaso de la teoría de la Interferometría SAR.
- Vea la capacitación de ARSET de 2017 “Introducción a la Interferometría SAR” y la capacitación de ARSET de 2019 “SAR Interferométrico para Observaciones de Derrumbes” para más detalles.
- En la interferometría SAR, lo más importante es la fase de la señal de SAR.

Fase SAR– Una Medida del Rango y de la Complejidad de la Superficie

La fase de la señal de radar es el número de *ciclos de oscilación* que la onda ejecuta entre el radar y la superficie y de regreso.



La fase total es el rango bidireccional medido en ciclos de onda + el componente aleatorio de la superficie.

La colección de longitudes de trayectorias aleatorias confunde la fase del eco.

¡Solo la *interferometría* lo puede resolver!

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)



Una Visión Simplista de las Fases de SAR

Fase de Imagen 1 $\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \rho_1 + \text{otras constantes} + n_1$

Fase de Imagen 2 $\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \rho_2 + \text{otras constantes} + n_2$

1. Las “otras constantes” no se pueden determinar directamente.
2. Las “otras constantes” dependen de la distribución de los dispersantes en la celda de resolución, la cual es desconocida y varía de celda en celda.
3. La única forma de observar el cambio de rango es a través de la interferometría (cancelación de “otras constantes”).



Aplicaciones de la Interferometría SAR- Mapeo/Cartografía

- Mapeo/Cartografía
 - Se utilizó la interferometría SAR para la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) en el año 2000. Un MED fue creado, el cual fue actualizado en 2018 como NASADEM.
 - La interferometría de radar de plataformas aéreas se utiliza comúnmente para producir mapas topográficos conocidos como modelos de elevación digital (digital elevation models o DEMs).
 - Exactitud de posición circular de 2 a 5 metros
 - Paso de muestreo y resolución de 5 a 10 m
 - Se producen DEMs de 10 km por 80 km en una hora en una mini-supercomputadora
 - La topografía por SAR de la NASA está siendo adquirida por GLISTIN
 - Las imágenes de radar son geocodificadas automáticamente y así se pueden combinar más fácilmente con otros conjuntos de datos (multiespectrales).
 - El mapeo rápido interferométrico facilita las aplicaciones topográficas
 - Gestión y clasificación de usos del suelo, evaluación de riesgos, inteligencia, planificación urbana, geología a corta y larga escala temporal, hidrología.

Diapositiva Modificada de Paul Rosen (JPL)



Aplicaciones de la Interferometría SAR–Cambios

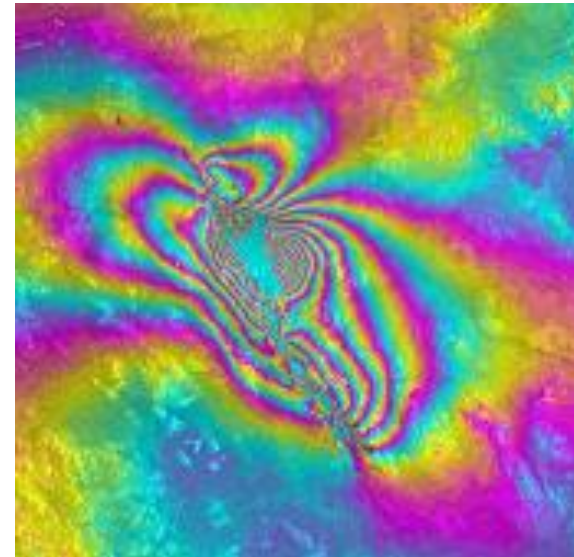
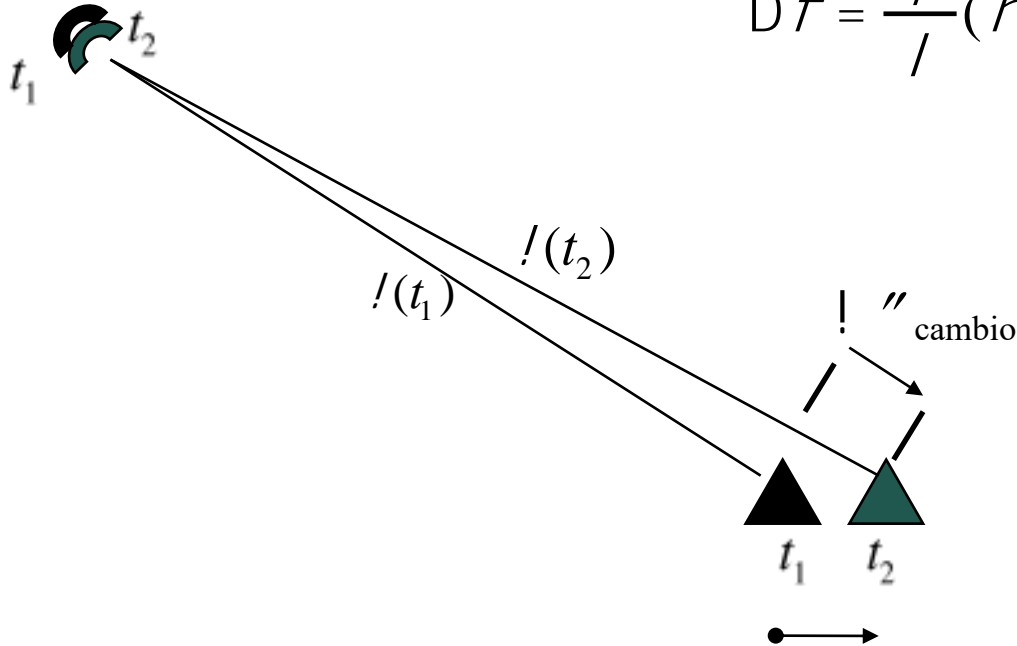
- Mapeo de Deformaciones y Detección de Cambios
 - La interferometría de radar de adquisición repetida desde plataformas espaciales se utiliza comúnmente para producir mapas de cambios topográficos conocidos como modelos de desplazamiento digitales (digital displacement models o DDMs).
 - Tienen una exactitud de desplazamiento relativa de 0.1 a 1 centímetro
 - Paso de muestreo y resolución de 10 a 100 m
 - Se producen DDMs entre 10 y 350 km de ancho rápidamente una vez que los datos estén disponibles
 - Aplicaciones incluyen
 - Monitoreo y modelación de terremotos y volcanes
 - Derrumbes y subsidencia
 - Dinámica de glaciares y la capa de hielo
 - Deforestación, detección de cambios, monitoreo de desastres



Interferometría Diferencial

- Cuando se hacen dos observaciones desde el mismo lugar en el espacio pero en momentos diferentes, la fase interferométrica es directamente proporcional a cualquier cambio en el rango de las características de la superficie.

$$Df = \frac{4\rho}{l} (r(t_1) - r(t_2)) = \frac{4\rho}{l} D r_{\text{cambio}}$$



Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)



Sensibilidades Interferométricas Diferenciales



- La razón por la que la interferometría diferencial puede detectar deformaciones superficiales a nivel milimétrico es porque la fase diferencial es mucho más sensitiva al desplazamiento que a la topografía.

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = \frac{2\pi \rho b \cos(\theta - \alpha)}{\lambda \rho \sin \theta} = \frac{2\pi \rho b_{\perp}}{\lambda \rho \sin \theta}$$

Sensibilidad Topográfica

$$(\phi \Leftrightarrow \Delta\phi) \quad \frac{\partial \phi}{\partial \Delta\rho} = \frac{4\pi}{\lambda}$$

Sensibilidad al Desplazamiento

$$\sigma_{\phi_{topo}} = \frac{\partial \phi}{\partial h} \sigma_h = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp}}{\rho \sin \theta} \sigma_h$$

Término de Sensibilidad Topográfica

$$\sigma_{\phi_{desp}} = \frac{\partial \phi}{\partial \Delta\rho} \sigma_{\Delta\rho} = \frac{4\pi}{\lambda} \sigma_{\Delta\rho}$$

Término de Sensibilidad al Desplazamiento

$$\text{Ya que } \frac{b}{\rho} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sigma_{\phi_{desp}}}{\sigma_{\Delta\rho}} \gg \frac{\sigma_{\phi_{topo}}}{\sigma_h}$$

Mediciones Topográficas a Escala Métrica – Cambios Topográficos a Escala Milimétrica

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)

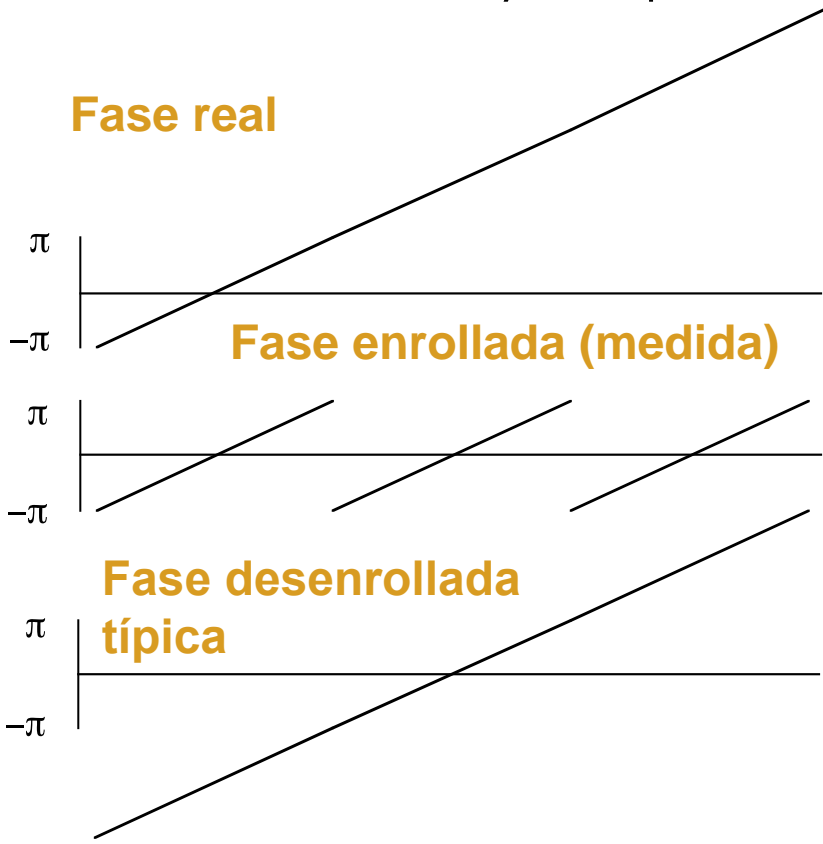


Desenvolvimiento de Fase



- A partir de la fase medida y enrollada, desenrolle la fase desde algún punto inicial arbitrario y después determine la “ambigüedad” correcta de la fase 2π

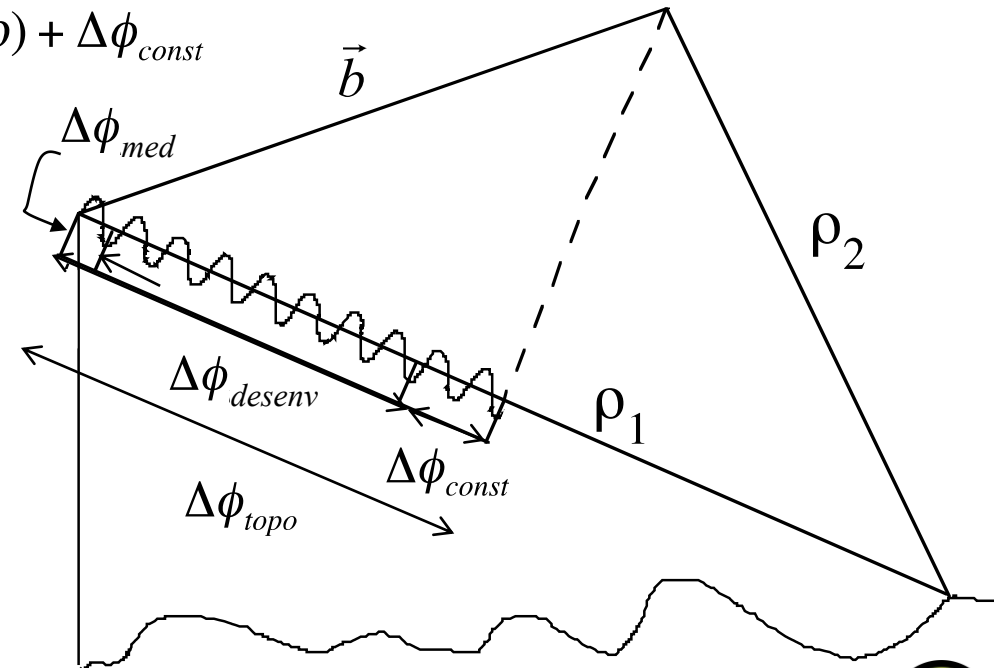
Fase real



$$\Delta\phi_{topo} = \frac{2\pi\rho}{\lambda}(\rho_1 - \rho_2) = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \vec{b} \cdot \vec{l}$$

$$\Delta\phi_{med} = \text{mod}(\Delta\phi_{topo}, 2\pi)$$

$$\Delta\phi_{desenv}(s, \rho) = \Delta\phi_{topo}(s, \rho) + \Delta\phi_{const}$$



Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)



Teoría de Correlación*

- Las señales InSAR se decorrelacionan (se vuelven incoherentes) debido a
 - Ruidos térmicos y de procesadores
 - Dispersión Diferencial Geométrica y Volumétrica
 - Rotación de la Geometría de Visualización
 - Movimientos aleatorios a través del tiempo
- La decorrelación está relacionada con la desviación del estándar de la fase local de la fase del interferograma
 - Afecta la exactitud de la altitud y el desplazamiento
 - Afecta la habilidad de desenrollar la fase

*“Correlación” y “Coherencia” a menudo se usan como sinónimos

Diapositiva modificada de Paul Rosen (JPL)



Componentes Correlativos de InSAR

- Los efectos de correlación se multiplican, a diferencia de los efectos de fase que se suman
- Una baja coherencia o decorrelación por cualquier motivo causa una pérdida de información en esa área

$$Y = \gamma_v \gamma_g \gamma_t \gamma_c$$

donde

γ_v es volumétrico (árboles)

γ_g es geométrico (pendientes empinadas)

γ_t es temporal (cambios graduales)

γ_c son cambios repentinos



Longitud de Onda: Una Medida de la Escala de la Superficie

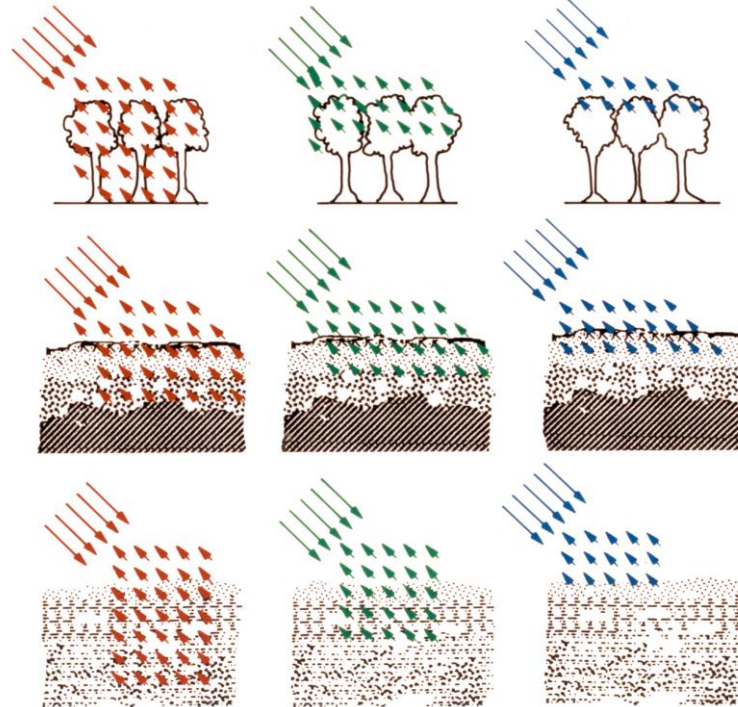
La señal interactúa más con los objetos de un tamaño similar a la longitud de onda

Bosque: Las hojas reflejan las longitudes de banda-X pero no las de banda-L

Suelos Secos: La superficie se ve rugosa para la banda-X pero no para la banda-L

Hielo: La superficie y las capas se ven rugosas para la banda-X pero no para la banda-L

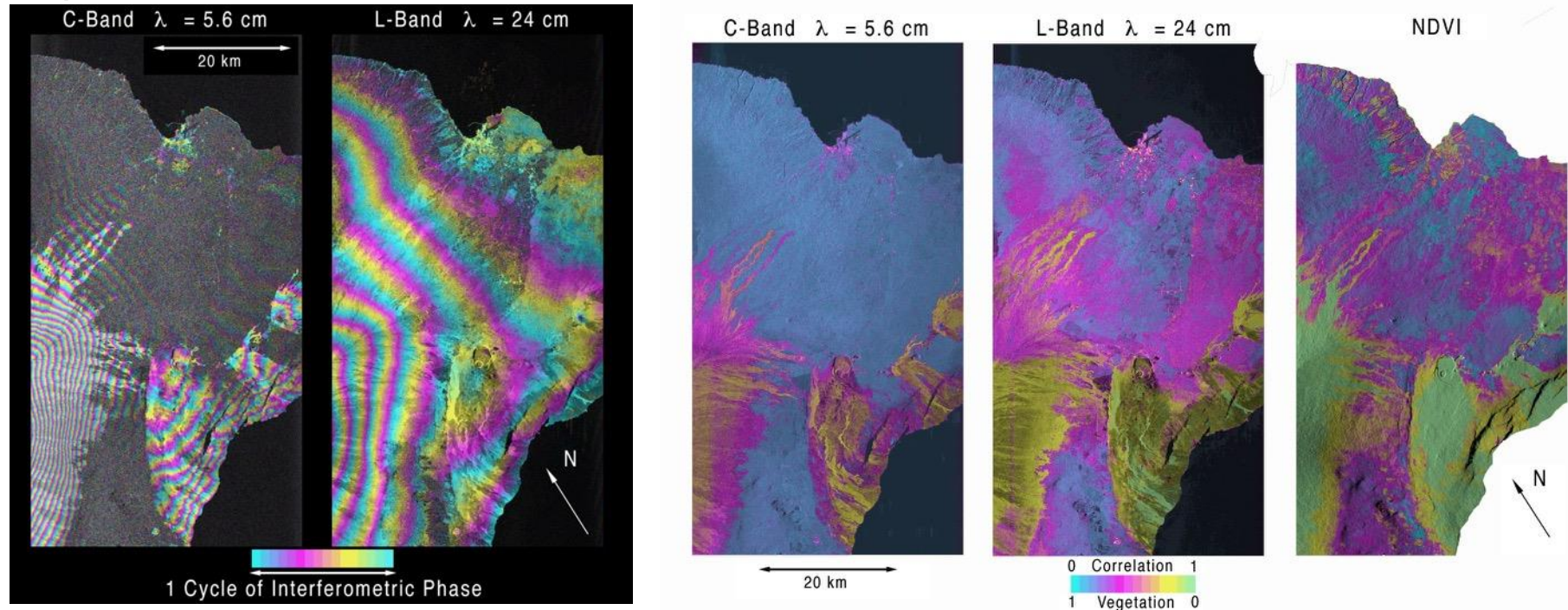
L (24 cm) C (6 cm) X (3 cm)



Coherencia y Longitud de Onda InSAR

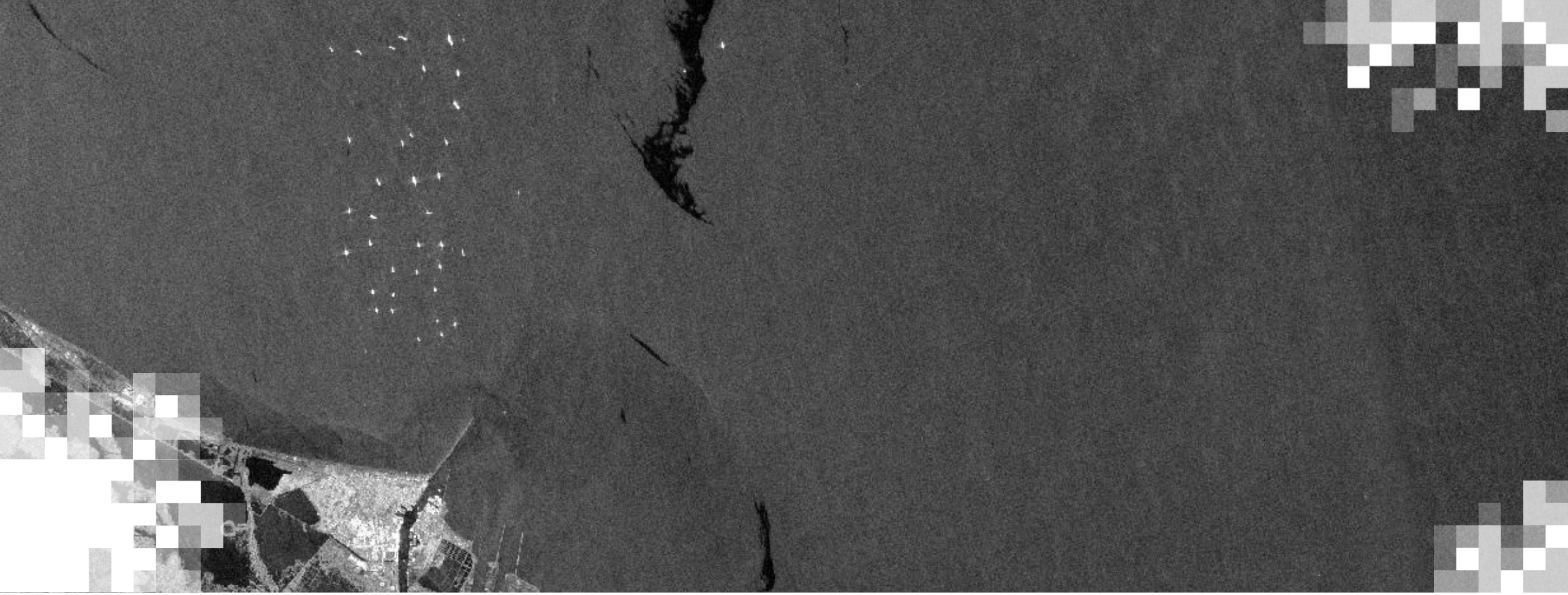
Interferometría de SIR-C banda-L y banda-C

- Generación de interferogramas con imágenes separadas temporalmente por 6 meses
- Bandas C y L simultáneas



Los experimentos de InSAR han mostrado una buena correlación en la banda-L

Rosen, P. A., S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb, and E. J. Fielding (1996). Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *Journal of Geophysical Research* 101, no. E10, 23109-23125, doi:10.1029/96JE01459.



Datos SAR para Deslizamientos de Tierra

Satélites SAR

Satélites SAR	Fechas de Operación	Ciclo de Repetición (días)	Longitud de onda (cm)
ESA: ERS-1 ERS-2	1992 – 2000 1995–2001 (–2011 limitado)	35 (1, 3, 183)	6
Canadá: Radarsat-1	1995-2013	24	6
ESA: Envisat	2003 – Sep. 2010 Oct. 2010 – Abr. 2012	35 30	6
Japón: ALOS	Ene. 2006 – Abr. 2011	46	24
Alemania: Terra SAR-X TanDEM-X	2007 – hoy 2010 – hoy	11	3
Italia: Constelación COSMO-SkyMed	2007 – hoy	16 (1, 4, 7, 8)	3
Canadá: Radarsat-2	Dic. 2007 – hoy	24	6



Nuevos Satélites SAR

Satélites (lanzados o planificados)	Ciclo de Repetición (días)	Longitud de onda (cm)
ESA: Sentinel-1 (A: abr. 2014, B: mayo 2015)	A: 12, B: 6	6
Japón: ALOS-2 (mayo 2014)	14	24
India: RISAT-1 (abr. 2012)	25	6
Misión NASA-ISRO SAR (NISAR) (ene. 2022)	12	12, 24



Misión NASA-ISRO SAR (NISAR)

- Resolución espacial alta con tiempo de revisita frecuente
- Lanzamiento anticipado: Enero de 2024
- SAR de doble frecuencia– SAR de Banda-L y Banda-S
 - SAR banda-L de la NASA y SAR banda-S de ISRO
- 3 años de operaciones científicas (+ de 5 años de productos)
- Todos los datos científicos serán gratis y libremente disponibles
- <https://nisar.jpl.nasa.gov>

Slide courtesy of Paul Rosen (JPL)

NISAR Characteristic:	Would Enable:
L-band (24 cm wavelength)	Low temporal decorrelation and foliage penetration
S-band (12 cm wavelength)	Sensitivity to light vegetation
SweepSAR technique with Imaging Swath >240 km	Global data collection
Polarimetry (Single/Dual/Quad)	Surface characterization and biomass estimation
12-day exact repeat	Rapid Sampling
3-10 meters mode-dependent SAR resolution	Small-scale observations
3 years since operations (5 years consumables)	Time-series analysis
Pointing control < 273 arcseconds	Deformation interferometry
Orbit control < 500 meters	Deformation interferometry
>30% observation duty cycle	Complete land/ice coverage
Left/Right pointing capability	Polar coverage, North and South
Noise Equivalent Sigma Zero ≤ -23 db	Surface characterization of smooth surfaces





Ejemplos de InSAR :
Deslizamientos de Tierra en California

Deslizamientos de Tierra Lentos



Deslizamiento lento y
catastrófico

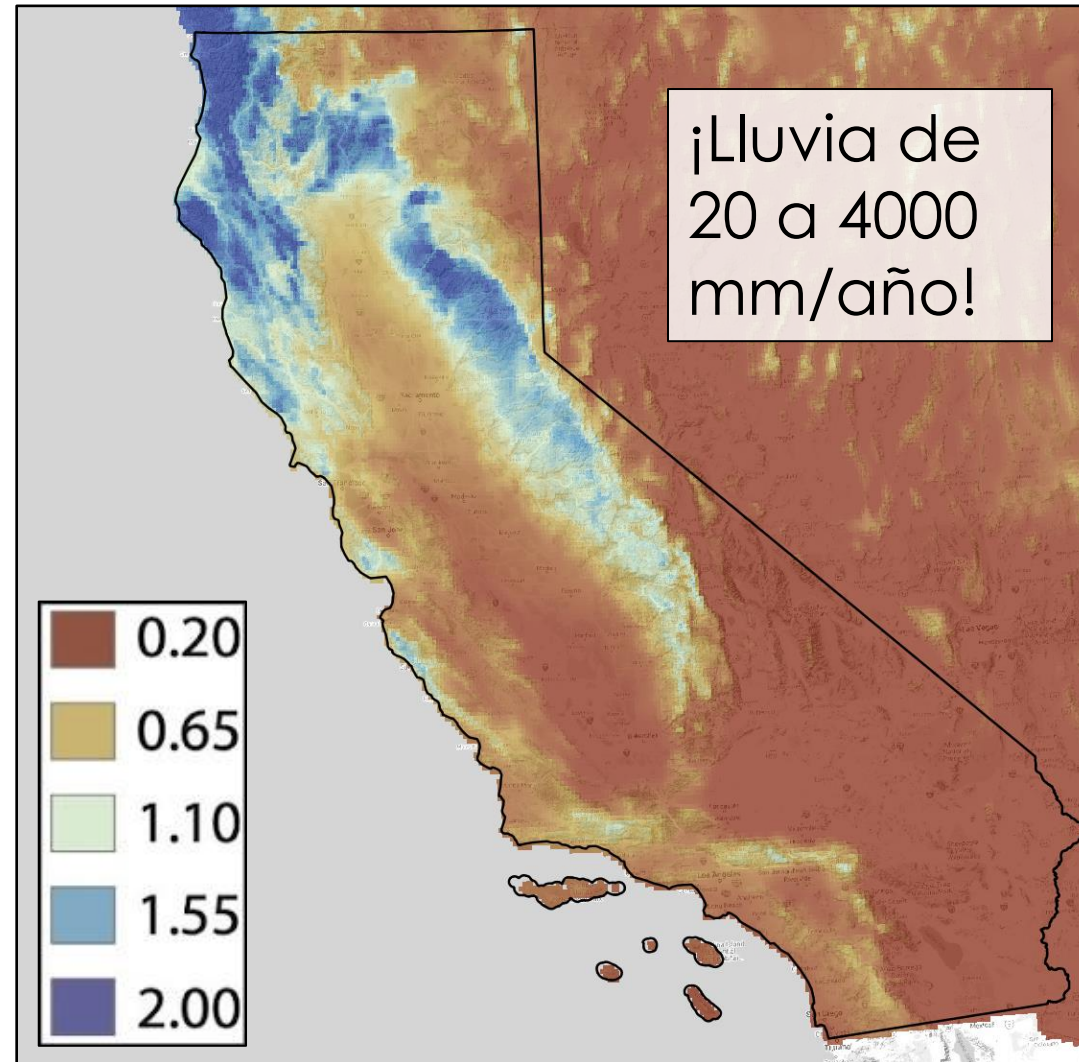


Deslizamiento lento



Variaciones de Precipitación en California

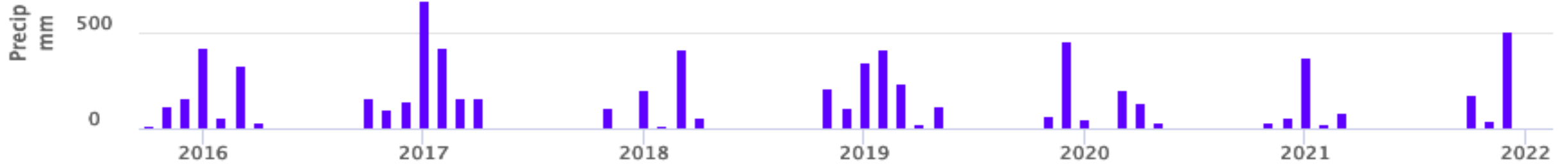
Precipitation (m/año)



Variaciones de Precipitación Estacionales e Interanuales

Lluvia en Big Sur, California EE.UU.

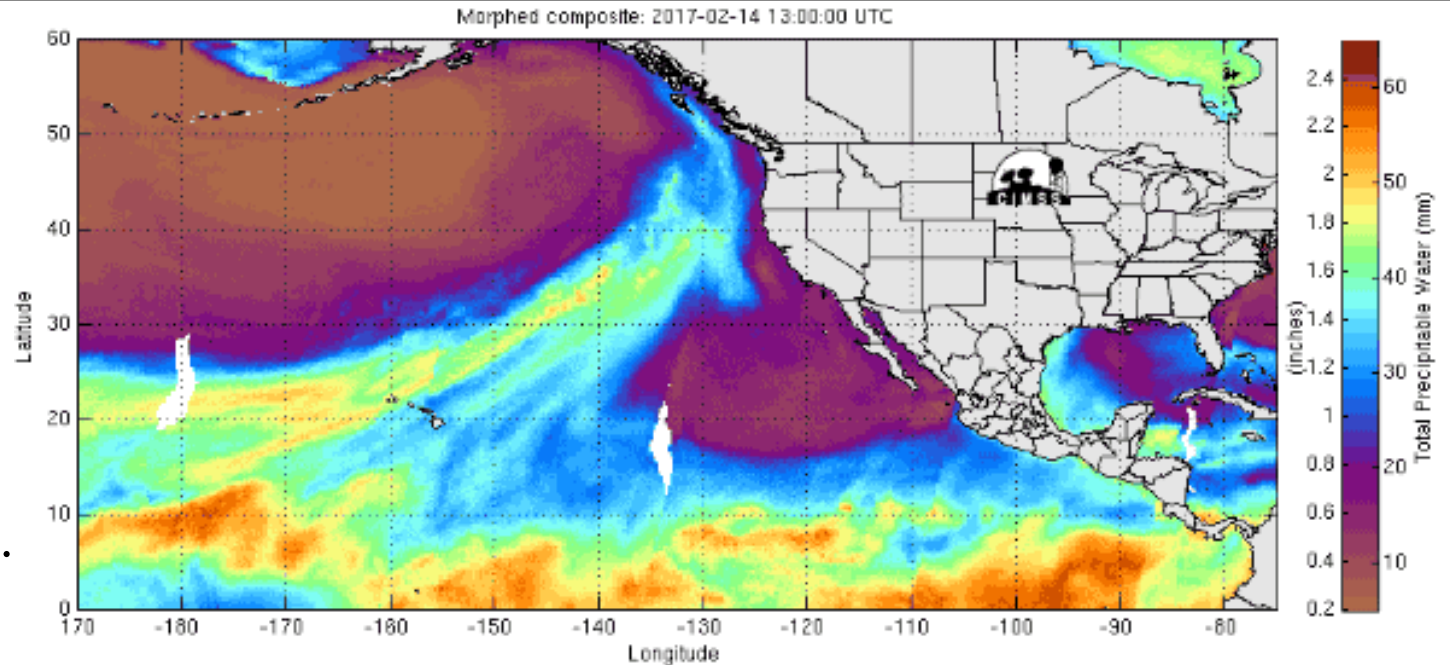
Datos de PRISM



- Clima mediterráneo con lluvias estacionales entre octubre y mayo cada año.
- Los grandes cambios en la precipitación son impulsados por ríos atmosféricos.
- Del 30 al 50% de las lluvias en California provienen de ríos atmosféricos (Dettinger et al., 2011).

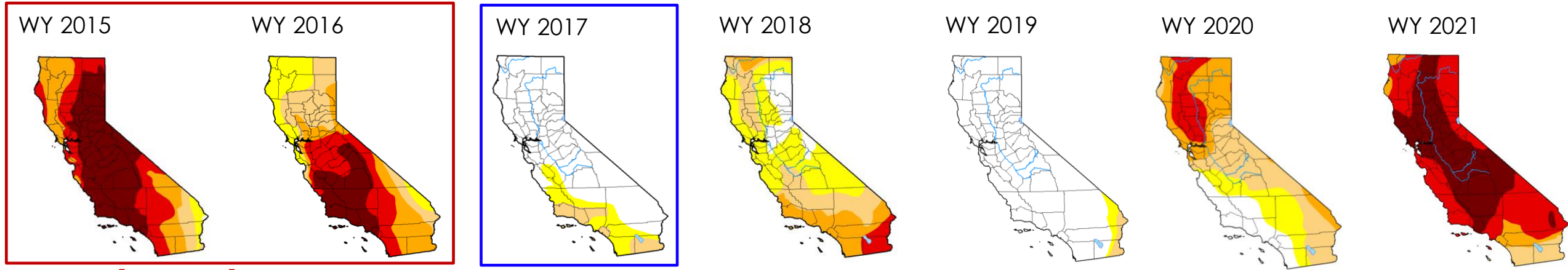
<https://phys.org/news/2017-02-atmospheric-rivers-thought.html>

NASA's Applied Remote Sensing Training Program



Variaciones Interanuales

Mapas de Sequía en California



Sequía Histórica

**Año extremadamente
lluvioso**

Water year* (WY) = Oct. 1 - Sep. 30

Ej., WY 2015 = 1^{ro} oct. 2014 – 30 sep. 2015

Intensity:



The Drought Monitor focuses on broad-scale conditions. Local conditions may vary. See accompanying text summary for forecast statements.

Author:

*Richard Tinker
CPC/NOAA/NWS/NCEP*

*Año hidrológico

Métodos de Mapeo de Deslizamientos de Tierra

Datos SAR

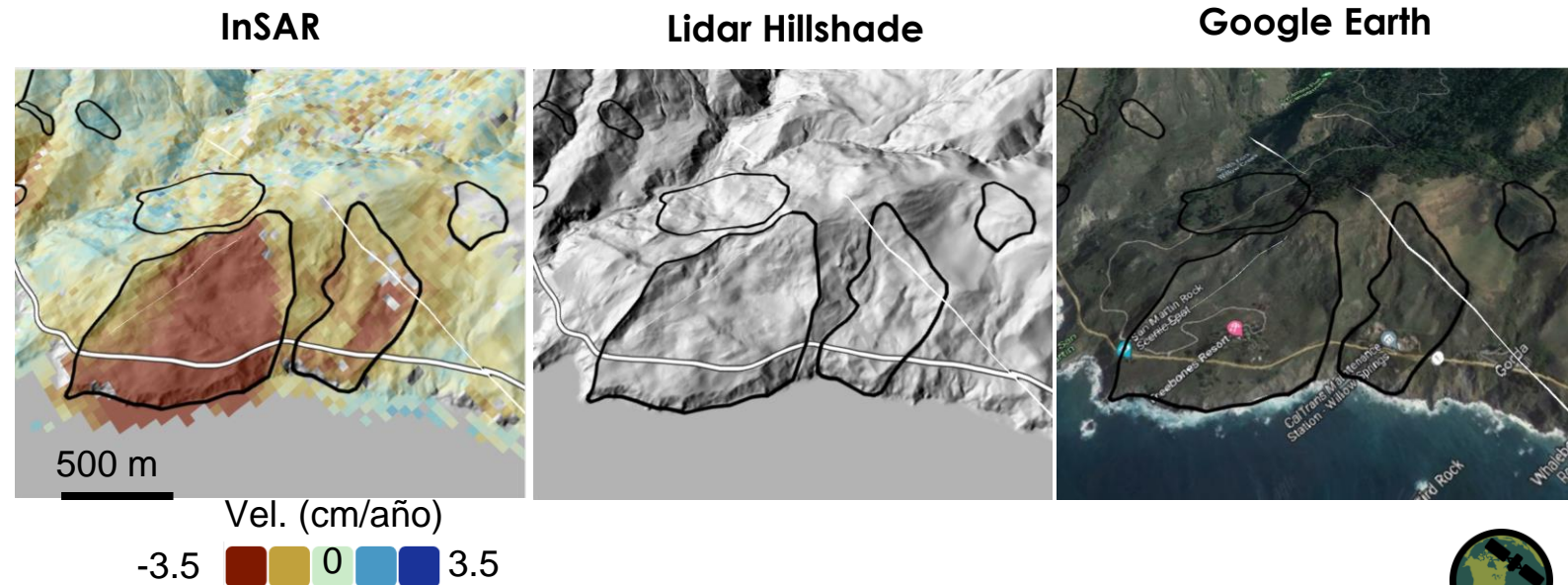
- **Aéreos (2009 – hoy)**
 - NASA/JPL UAVSAR (banda-L), resolución espacial alta (píxeles de ~1 m)
 - ~ 2-4 adquisiciones al año
- **Satélites (2015 – hoy)**
 - Copérnicus: Sentinel-1 A/B (banda-C)
 - Imágenes nuevas cada 6 a 12 días
 - 2.5 m x 14 m píxeles

Para Mapear Deslizamientos de Tierra

- Imágenes ópticas y DEMs para confirmar deslizamientos
- QGIS

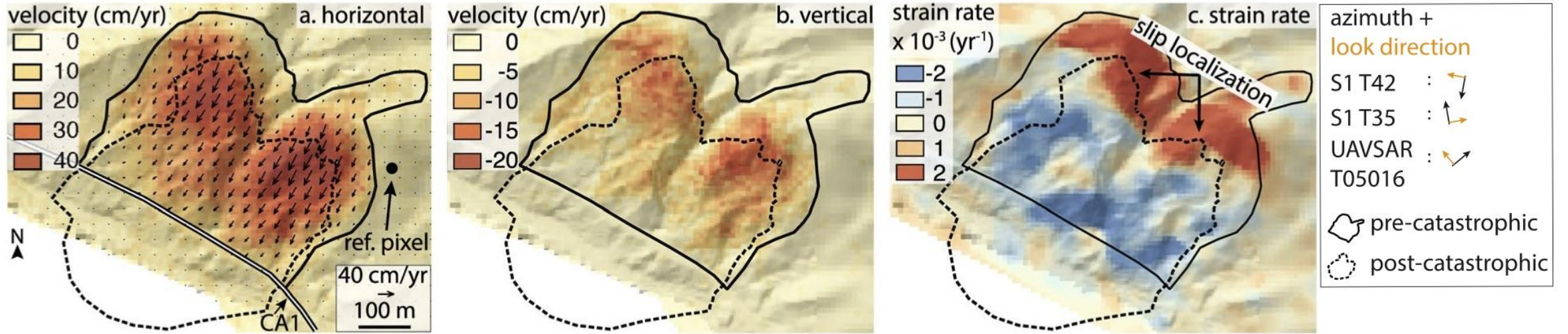
Procesamiento y Análisis de SAR

- JPL/Caltech: InSAR Scientific Computing Environment (ISCE) (Rosen et al., 2012)
- Software de Series temporales InSAR de Miami en PYTHON (MintPy) (Yunjun et al., 2019)



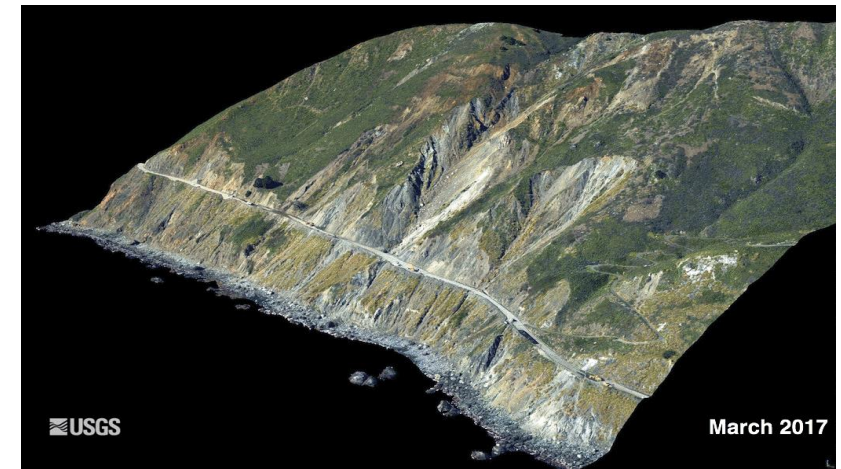
Deslizamientos en California Central—Mud Creek

Average velocity and strain rate (2009 - 2017) of Mud Creek landslide, CA



Deslizamiento de Tierra de Mud Creek

- Evento catastrófico ocurrió el 20 de mayo de 2017
- Aproximadamente US\$ 54 millones en reparaciones
- Datos Sentinel-1 y UAVSAR combinados para crear desplazamientos 3D

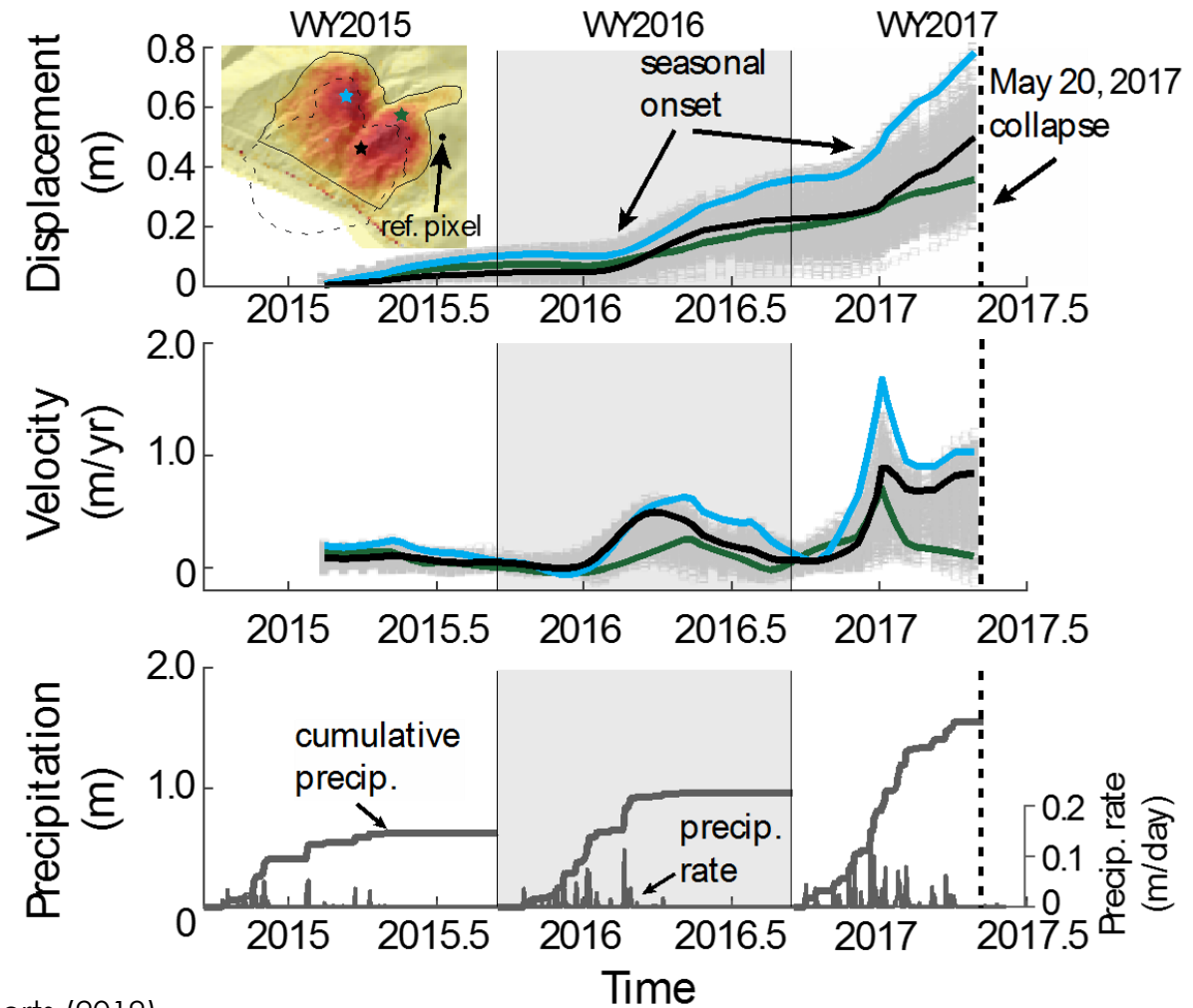
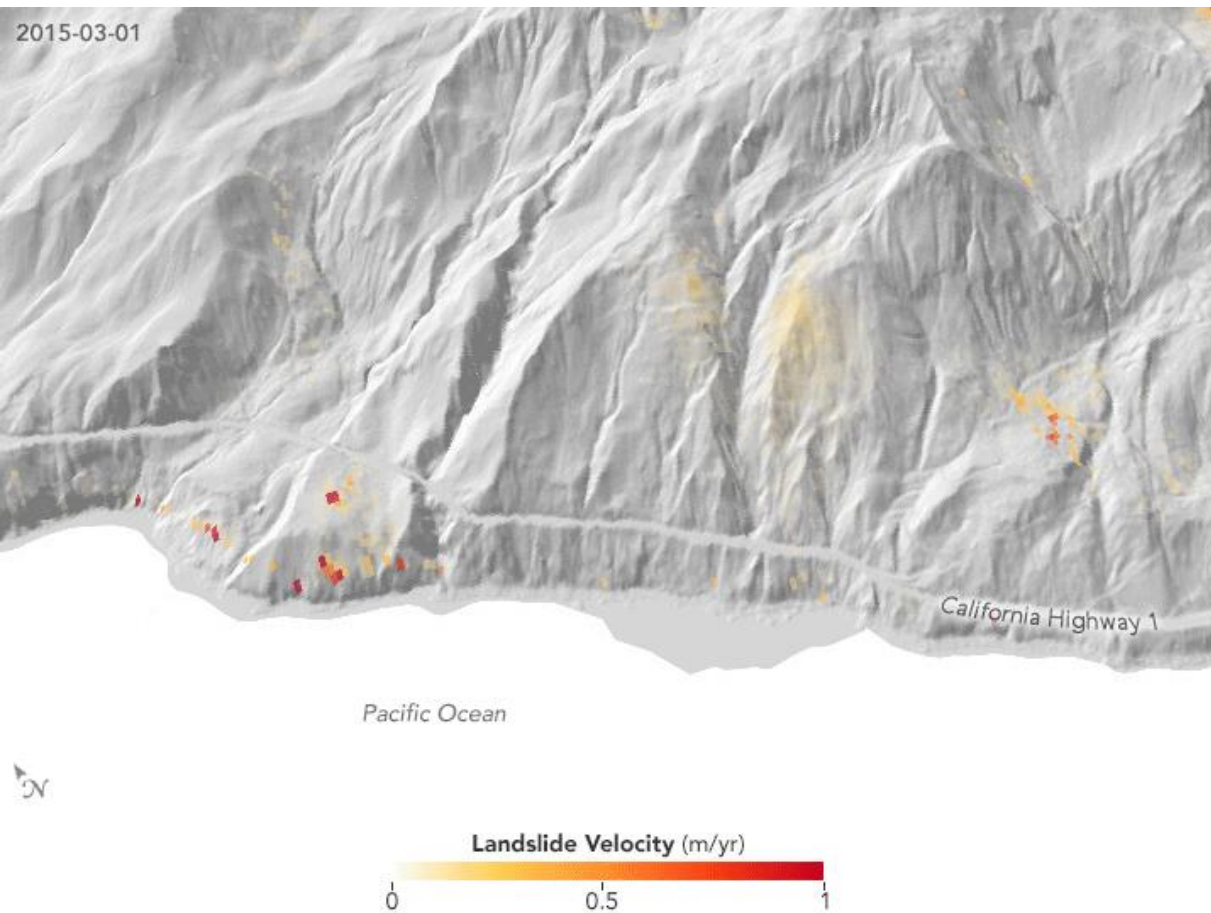


Sup.: Handwerker et al., Scientific Reports (2019); Inf.: Warrick et al. 2019,
<https://walrus.wr.usgs.gov/remote-sensing/>



Serie Temporal del Deslizamiento de Tierra de Mud Creek

Deslizamiento de Tierra de Mud Creek



(Izq.) Serie Temporal InSAR de Sentinel 1; (Der.) Handwerger et al., Scientific Reports (2019)

Handwerger, A. L., M.-H. Huang, E. J. Fielding, A. M. Booth, y R. Bürgmann (2019). A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure, Scientific Reports 9, no. 1, 1569, doi:10.1038/s41598-018-38300-0.



Interferogramas Preprocesados

JPL/Caltech Advanced Rapid Imaging and Analysis (ARIA): Producto InSAR Estándar—En Preparación para NISAR

- Usa productos estándar InSAR para identificar y monitorear deslizamientos de tierra en regiones masivas
- Datos SAR de Sentinel-1 2015-2021 procesados en interferogramas geocodificados y desenrollados (GUNW) con un espaciado de píxeles de ~90 m, ¡mejor para deslizamientos de tierra más grandes!



ARIA-tools-docs

python 3.5+ license GPL

Descargue, combine y prepare datos para series temporales

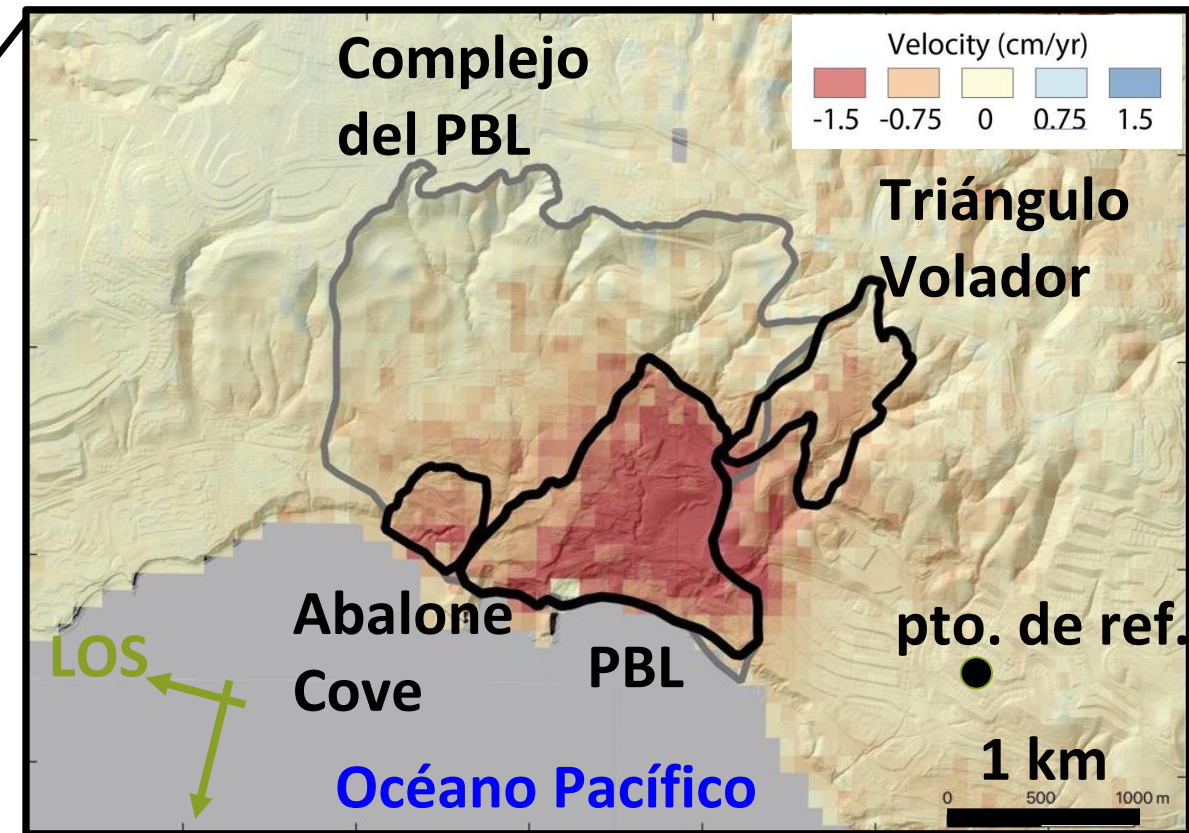
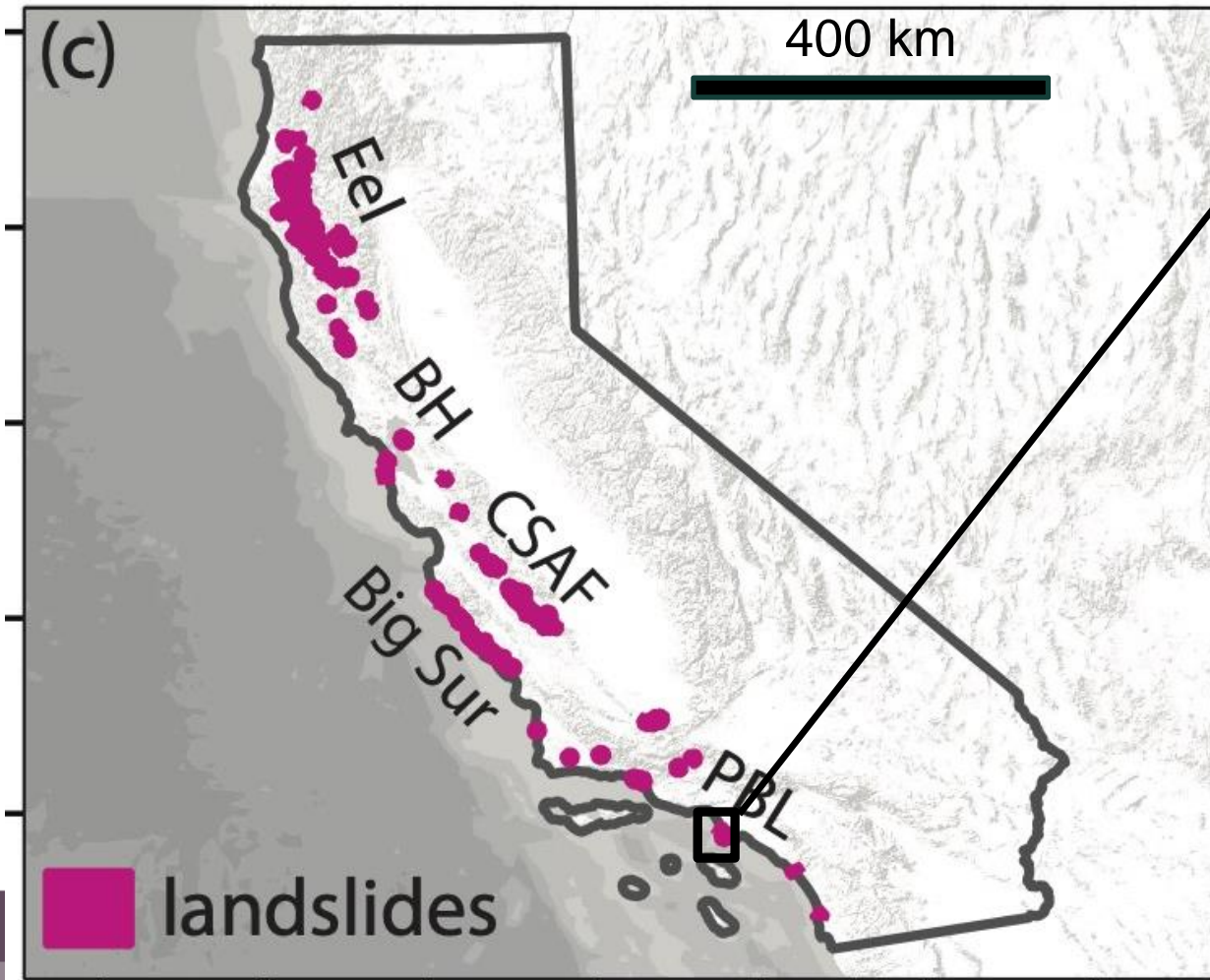
<https://github.com/aria-tools/ARIA-tools-docs>



Mapa de Deslizamientos de Tierra en California de InSAR

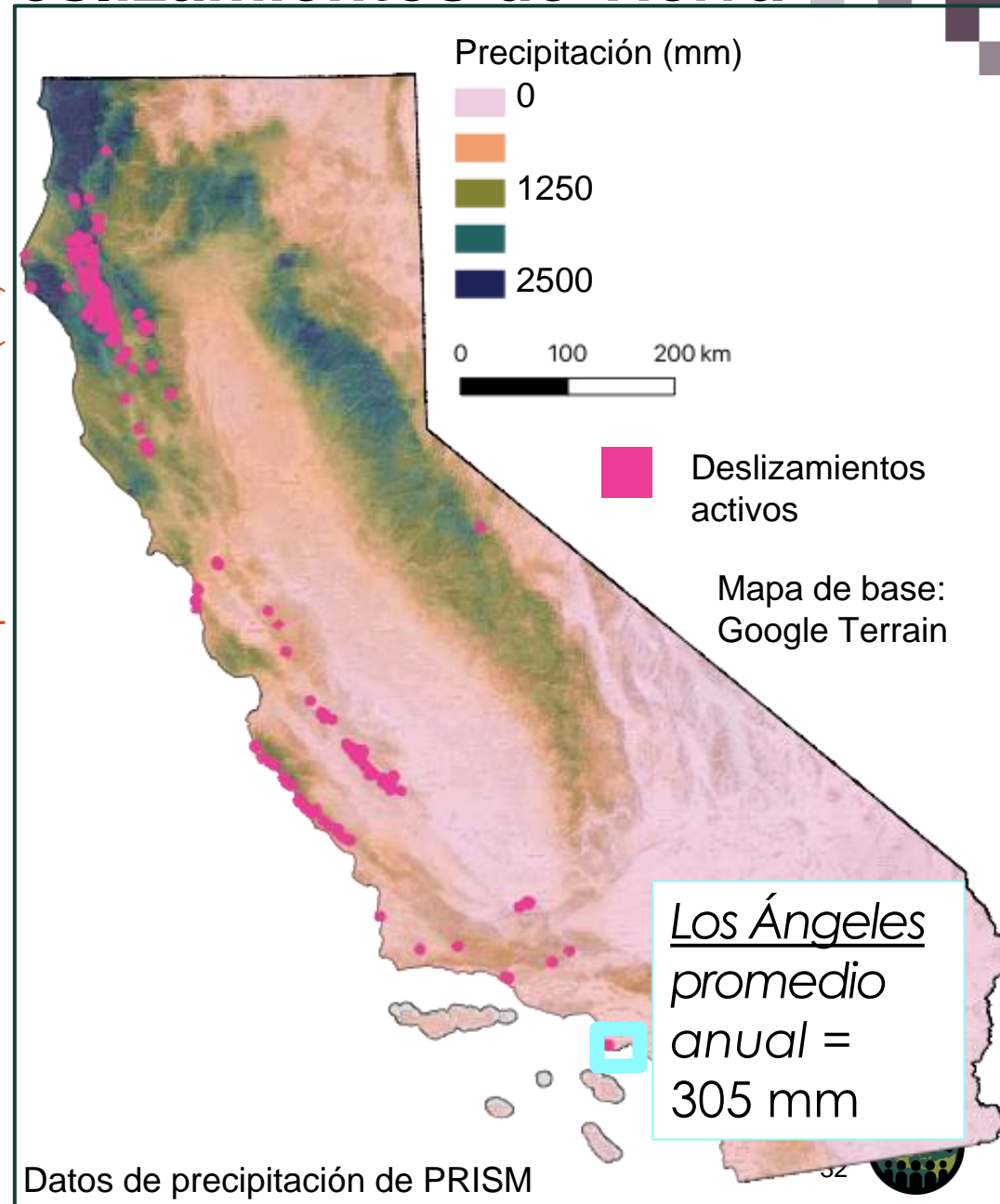
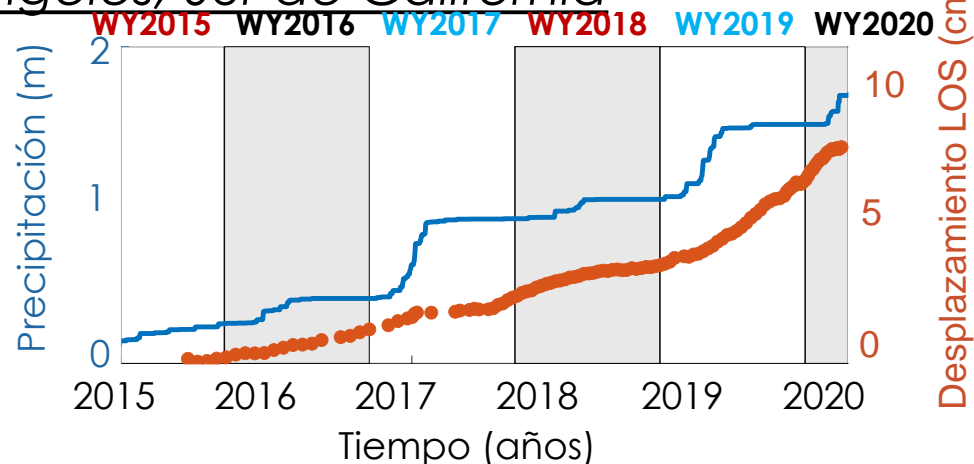
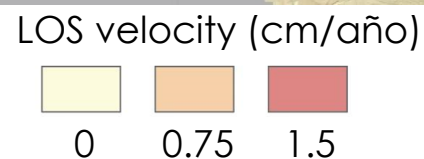
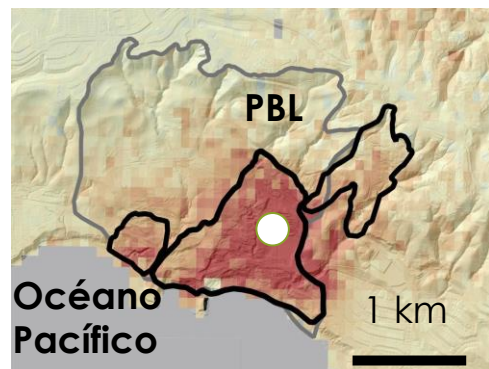
Landslide Inventory 2015-2020

- Hemos identificado 247 deslizamientos activos
- Producto estándar de ARIA es más adecuado para deslizamientos de tierra más grandes que muestran un movimiento persistente

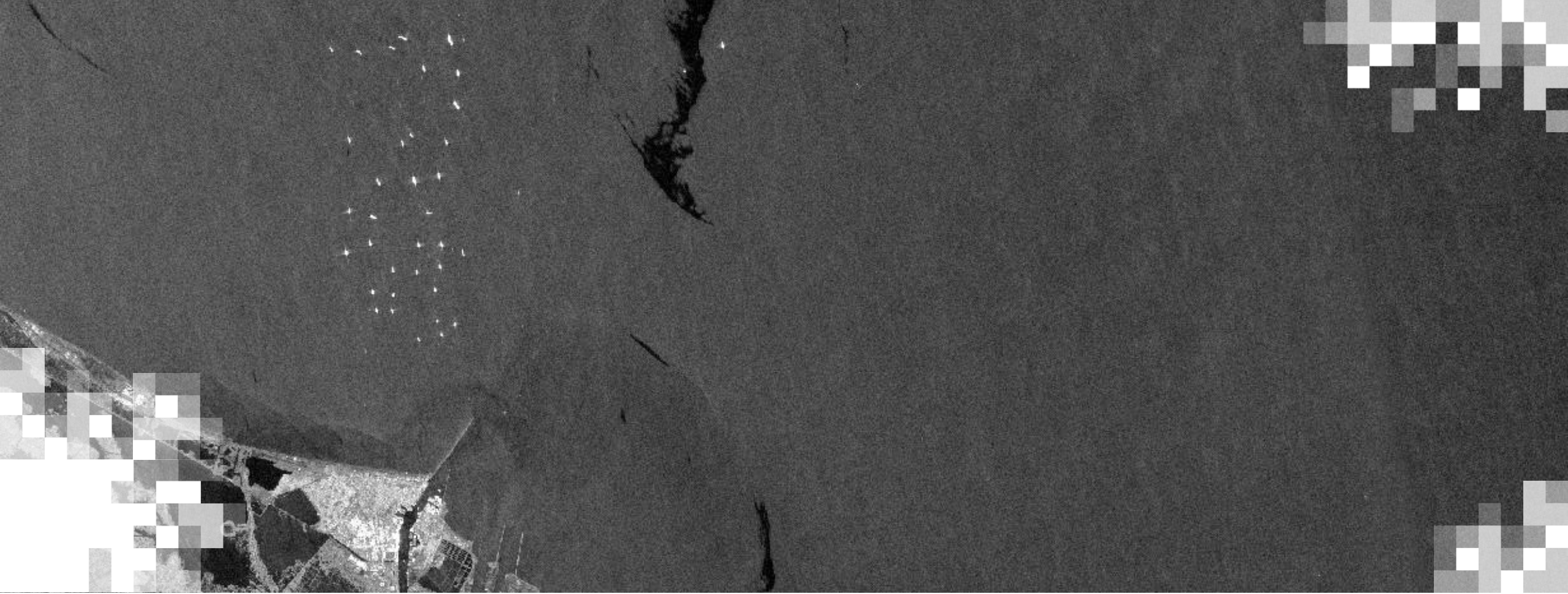


Series Temporales de Velocidades de Deslizamientos de Tierra

Deslizamiento de Tierra de la Curva Portuguesa (Portuguese Bend), Los Ángeles, Sur de California



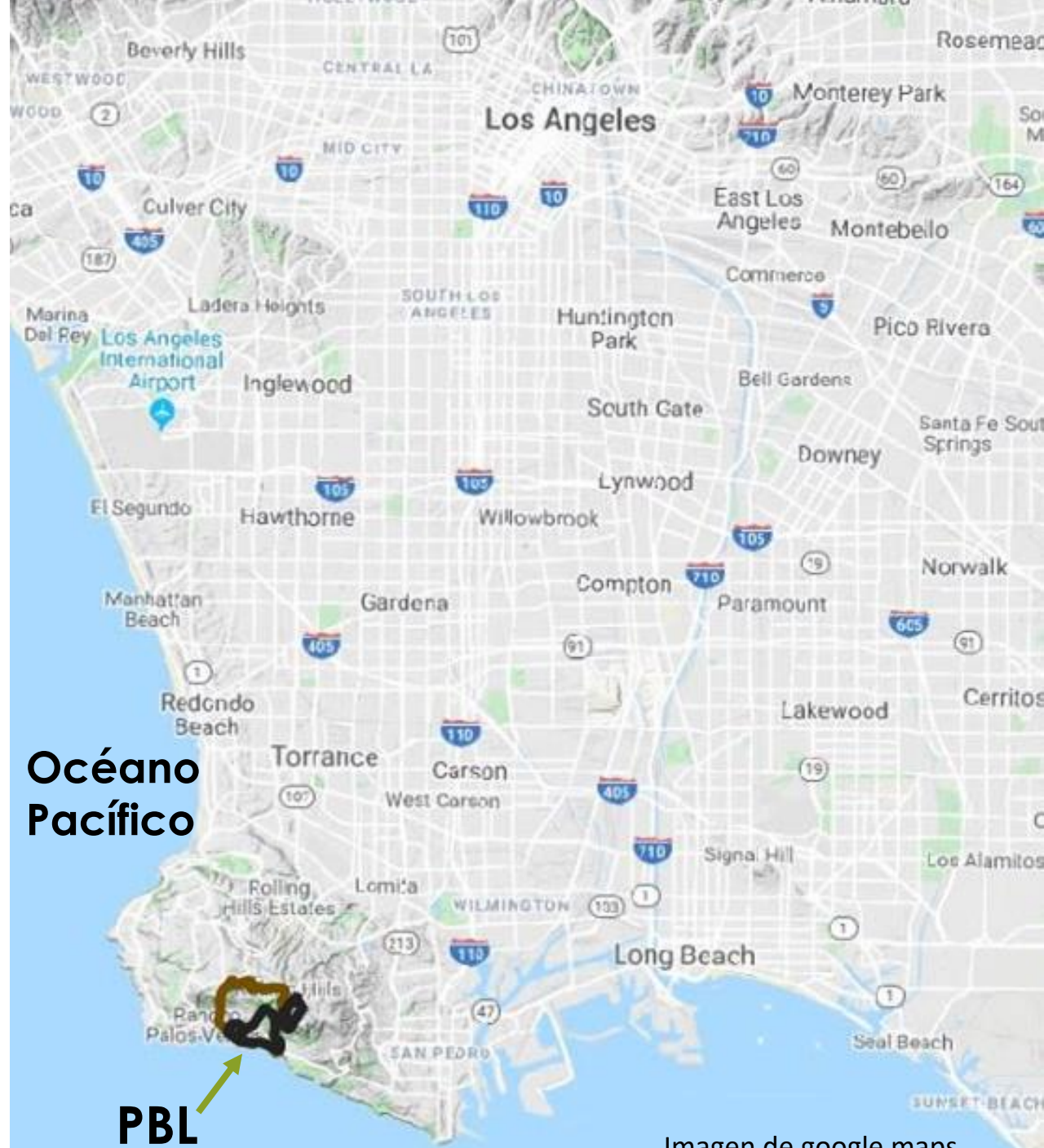
Handwerker, A. L., E. J. Fielding, S. S. Sangha y D. P. S. Bekaert (2022). Landslide Sensitivity and Response to Precipitation Changes in Wet and Dry Climates, *Geophysical Research Letters* 49, no. 13, doi:10.1029/2022gl099499.



Deslizamiento de Tierra de la Curva Portuguesa (Portuguese Bend)

Antecedentes del Deslizamiento de la Curva Portuguesa (Portuguese Bend)

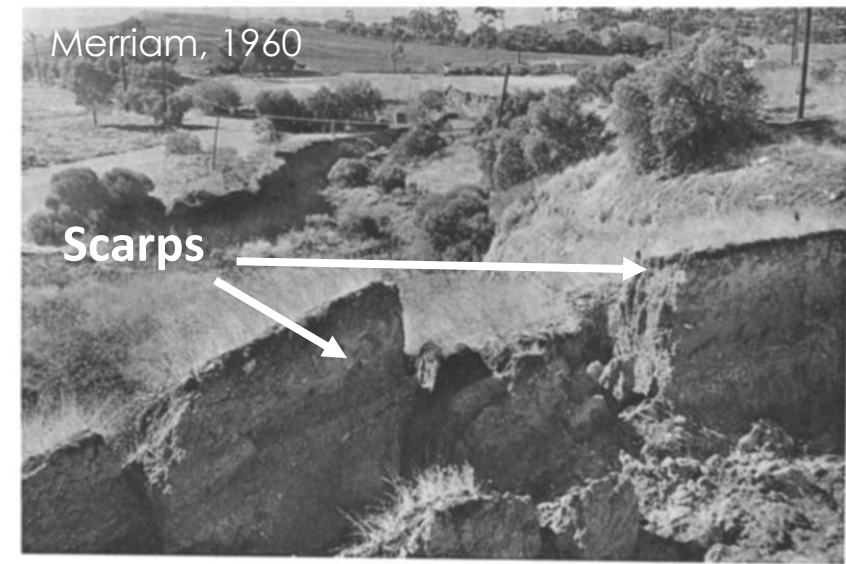
- El deslizamiento de tierra de la curva portuguesa (Portuguese Bend Landslide o PBL) es un deslizamiento de tierra activo de desplazamiento lento ubicado en la península de Palos Verdes, Rancho Palos Verdes, Condado de Los Ángeles, California, EE.UU..
- El PBL está activo desde 1955.
- Fue reactivado por carga superficial durante la construcción de la extensión planificada de Crenshaw Boulevard (Merriam, 1960).



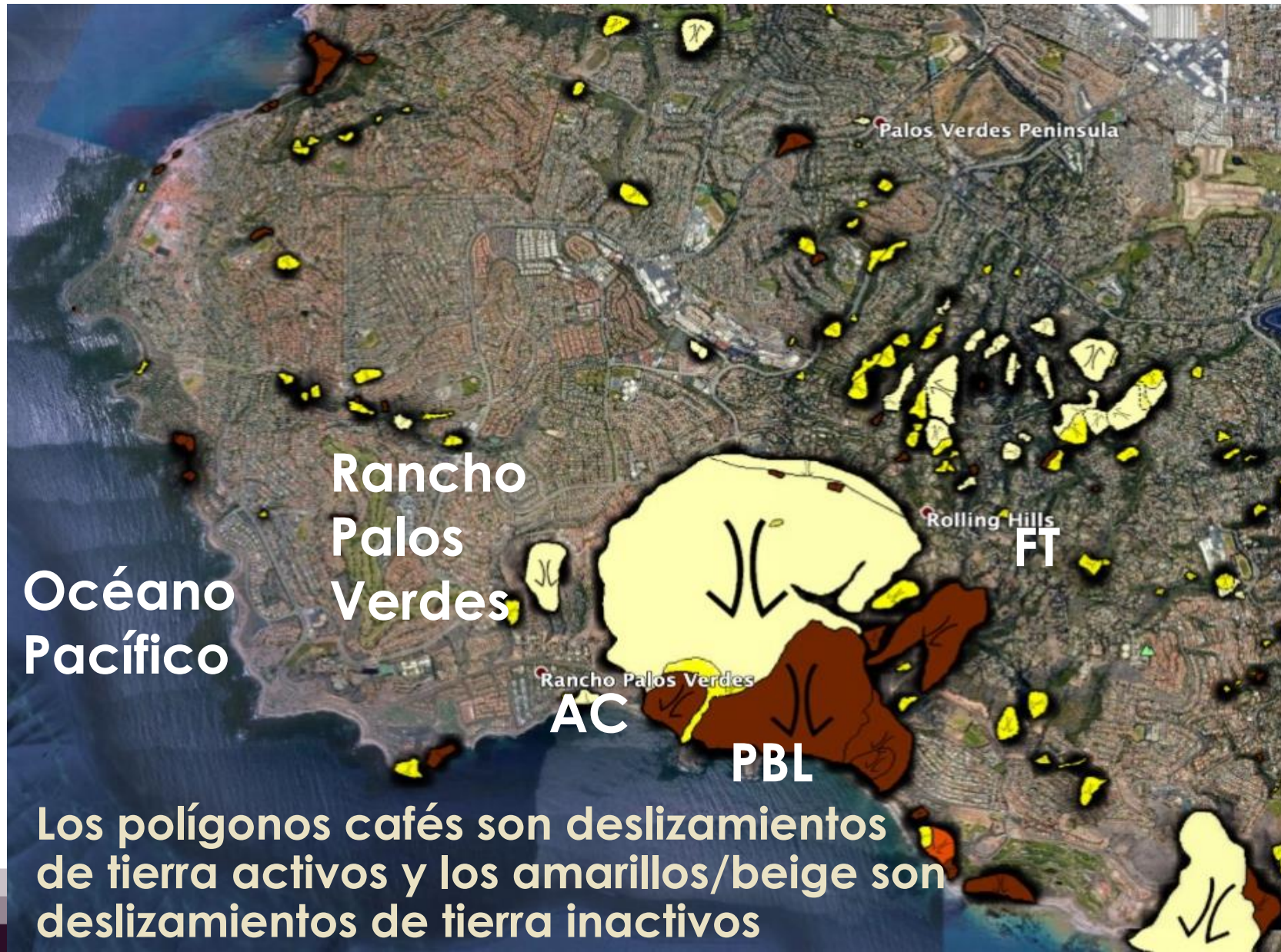
Impactos del PBL

Impacto peligroso (resumen de Stephens y Asoc., Inc, 2018)

- grandes daños a la infraestructura que aún continúan...
 - 140 viviendas han sido desplazadas o destruidas
 - \$50 millones gastados por la Ciudad de Rancho Palos Verdes para reparaciones
- Se han realizado grandes esfuerzos para detener el deslizamiento de tierra, que incluyen:
 - drenaje de aguas subterráneas
 - desviar aguas pluviales
 - “pasadores de seguridad” de hormigón reforzado
 - recalificación
 - control de infiltración superficial
 - tuberías sobre el suelo



Actividad de Deslizamientos de Tierra en Palos Verdes



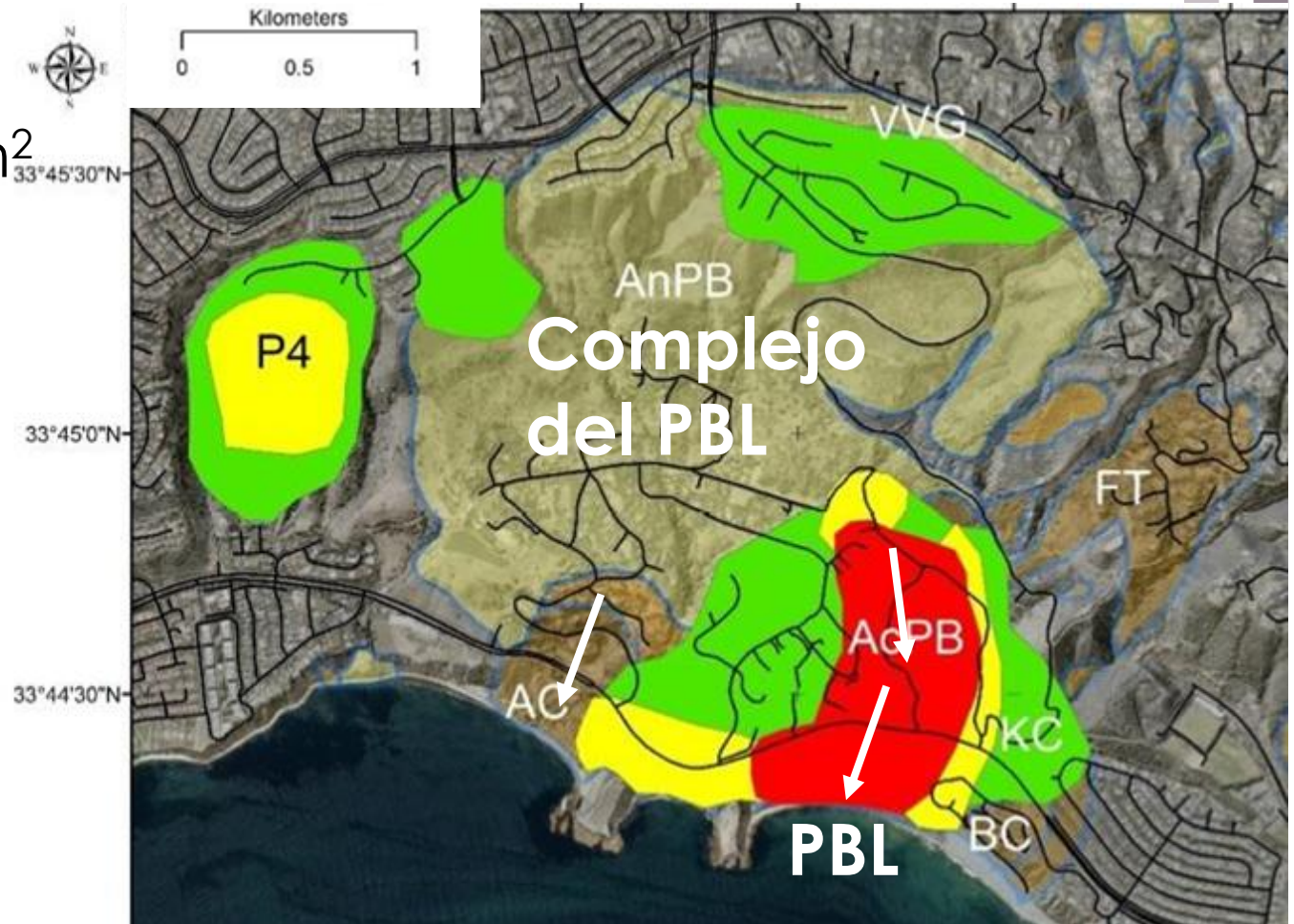
Los polígonos cafés son deslizamientos de tierra activos y los amarillos/beige son deslizamientos de tierra inactivos

- El inventario de deslizamientos de tierra del Servicio Geológico Estatal de California (California State Geologic Survey o CGS) muestra muchos deslizamientos de tierra activos en la península de Palos Verdes (Haydon, 2007).
- Palos Verdes es una zona densamente poblada, ¡menos el área del PBL!



Complejo del PBL

- El deslizamiento activo tiene una superficie de $\approx 1.25 \text{ km}^2$ y un grosor de 5 a 75 m
- El movimiento varía en el espacio y el tiempo.
- Entre 1956 y 2002, el deslizamiento de tierra se movió $\sim 150 \text{ m}$ con una tasa promedio de $\sim 3.5 \text{ m/año}$ (Kayen et al., 2002)
- Entre 2007 y 2017, el deslizamiento de tierra se movió $\sim 20 \text{ m}$ con una tasa promedio de 1 a 2 m/año (Bouali et al., 2019)



Landslide Activity	Slow Landslides	Very Slow Landslides	Extremely Slow Landslides
	1.5 a 18 m/año	60 mm/año a 1.5 m/año	< 60 mm/año

Bouali et al. (2019)



El PBL es parte de un área más grande de deslizamientos de tierra inactivo (Merriam, 1960)

USGS Lidar Hillshade

Superficie con montículos -> ¡deformación!

Complejo PBL

Deslizamiento Triángulo Volador

Deslizamiento de Abalone Cove

PBL



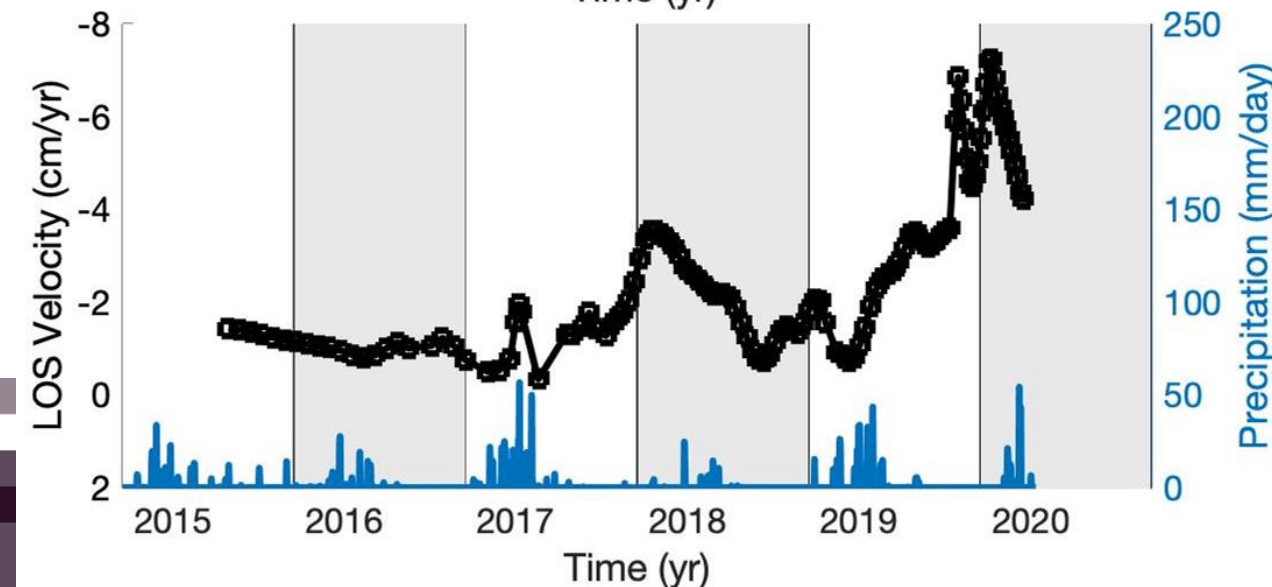
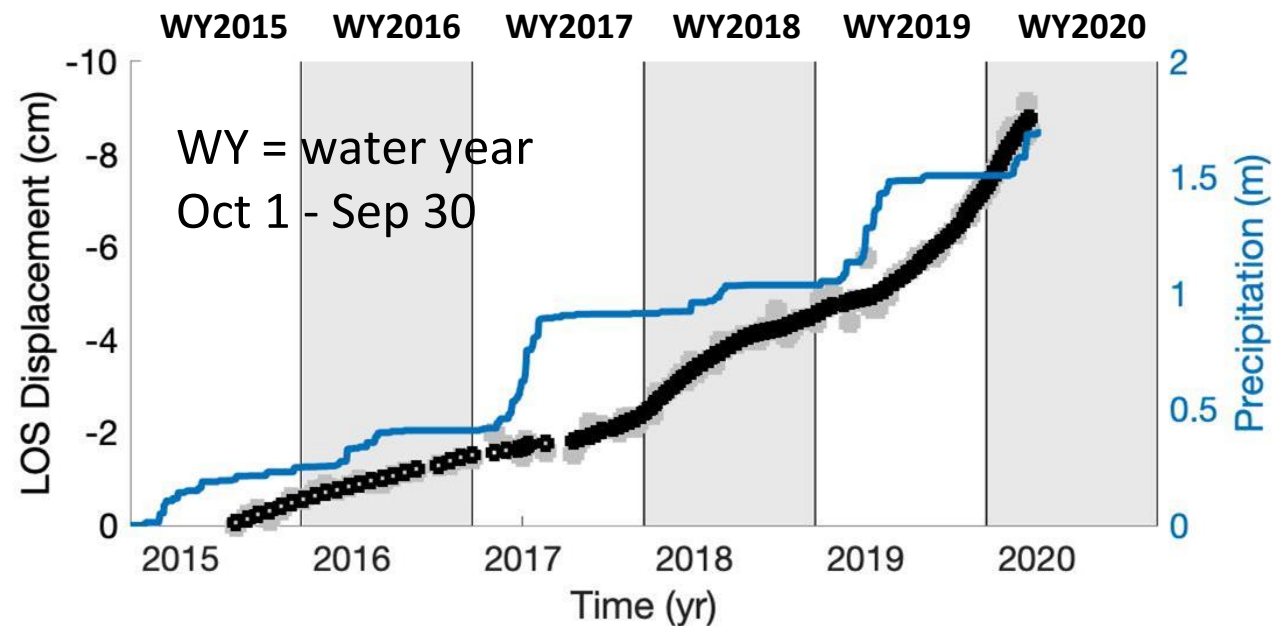
Métodos

ARIA-tools y MintPy

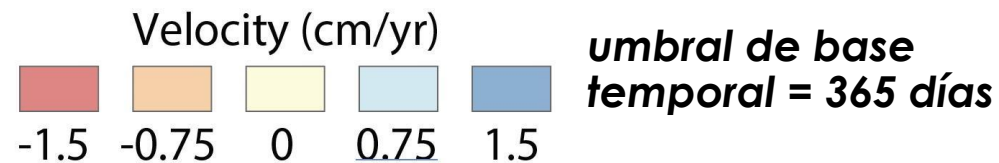
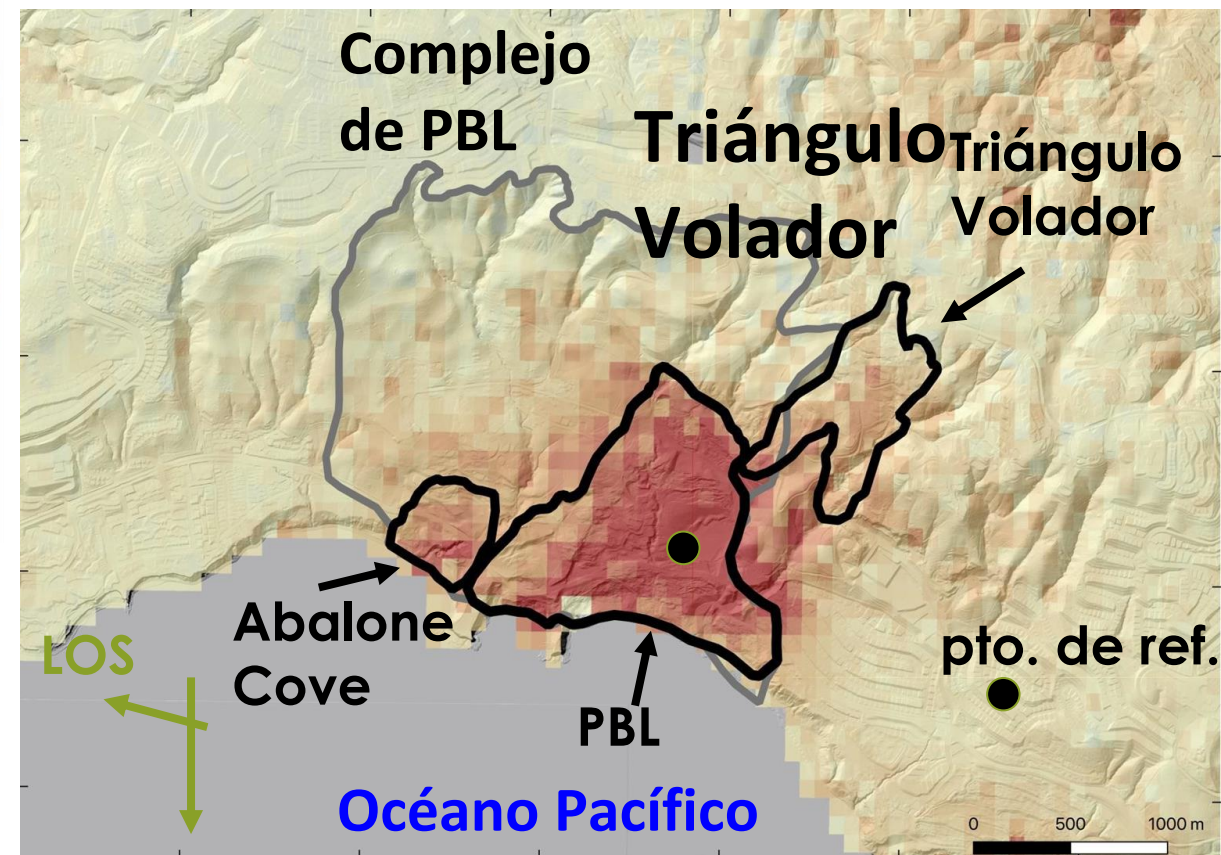
- Para cuantificar la deformación por deslizamiento de tierra entre 2015 y 2020, utilizamos datos InSAR preprocesados de Sentinel-1 (S1). El procesamiento fue hecho automáticamente con el sistema ARIA (Bekaert et al., 2019).
- ARIA-tools-docs (<https://github.com/aria-tools/ARIA-tools-docs>) describe el uso de ARIA-tools para leer los productos ARIA.
- El análisis de series temporales se realiza con MintPy (Yunjun et al., 2019) (<https://github.com/insarlab/MintPy>)



Resultados – Serie Temporal T71d



T71d – Vel. lineal promedio 2015-2020





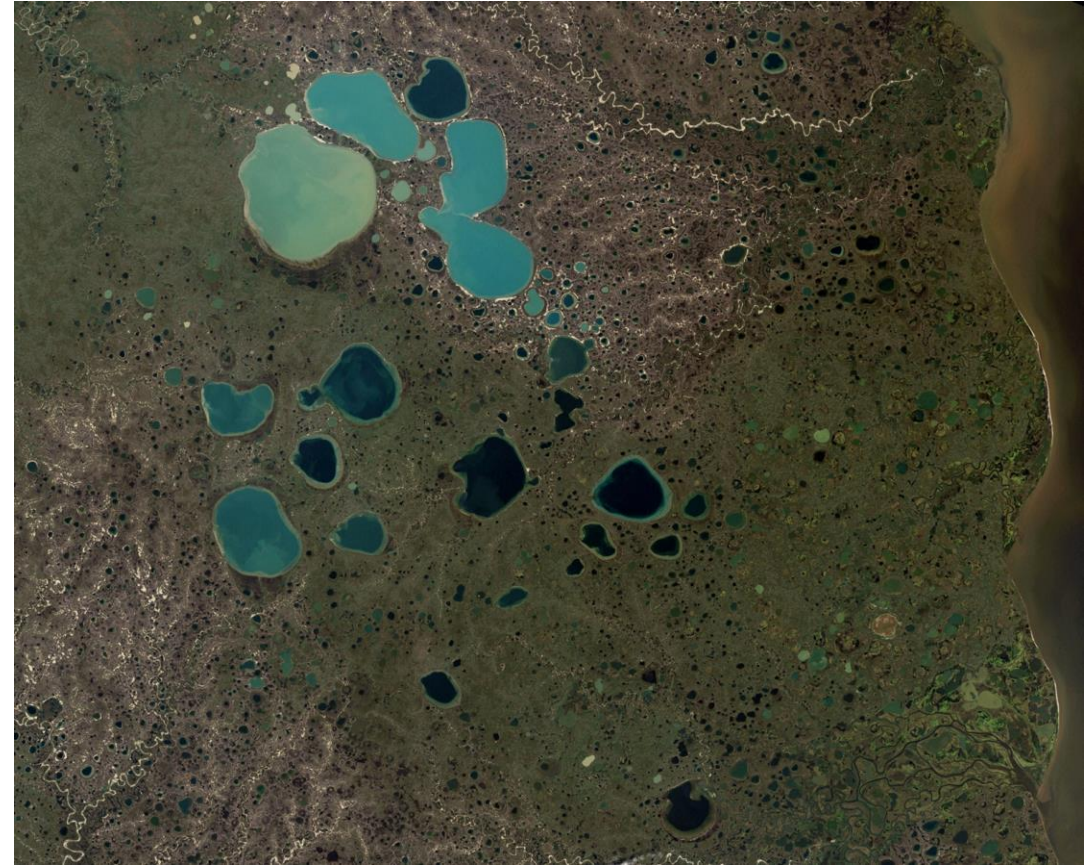
Acceder, Abrir y Visualizar Datos de Series
Temporales de Interferometría SAR

Demostración de Procesamiento de Datos

Los pasos del procesamiento de datos con ARIA-tools y MintPy están en el Jupyter notebook.

¿Preguntas?

- Por favor escriban sus preguntas en el cuadro de preguntas y respuestas. Las responderemos en el orden en que fueron recibidas.
- Publicaremos las preguntas y respuestas en la pagina de esta capacitación después que termine esta sesión.



<https://earthobservatory.nasa.gov/images/6034/pothole-lakes-in-siberia>



Contactos

- Presentador:
 - Eric Fielding: eric.j.fielding@jpl.nasa.gov
- Página Web de la Capacitación:
 - <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-disaster-assessment-using-synthetic-aperture-radar>
- Página web de ARSET:
 - <https://appliedsciences.nasa.gov/arset>
- Twitter: [@NASAARSET](https://twitter.com/NASAARSET)





¡Gracias!

