

# Modelar el movimiento de la superficie terrestre: Velocidades continuas y coordenadas por etapas

Hermann Drewes

Technische Universität München, Alemania

International Association of Geodesy (IAG)

Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)

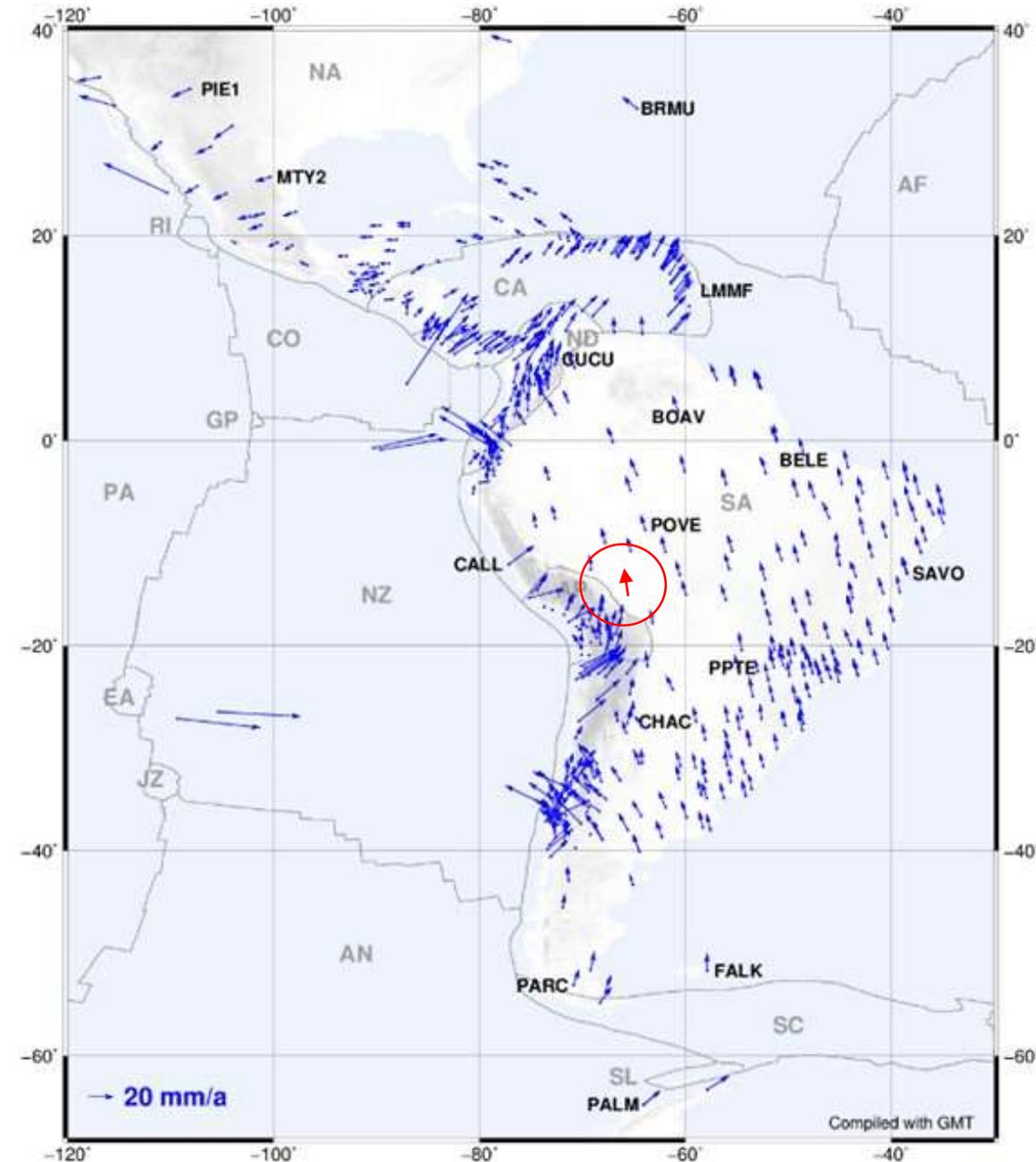


Webinar SIRGAS, 28 de agosto de 2020, 15:00 UTC

# El problema

- Los marcos de referencia terrestre (p. ej. ITRF y SIRGAS) proporcionan *posiciones* de las estaciones en una fecha (época) de referencia  $t_0$  (en ITRF2014 el 1 de enero de 2010) y su variación en el tiempo por *velocidades* constantes (6 coordenadas:  $X(t_0)$ ,  $Y(t_0)$ ,  $Z(t_0)$ ,  $dX/dt$ ,  $dY/dt$ ,  $dZ/dt$ ).
- Para el uso práctico (fijar límites, catastro, ingeniería, navegación, ...) se necesitan las coordenadas actuales de puntos **no** incluidos en el marco de referencia, lo que genera el problema de interpolación, o sea modelar el movimiento de la superficie terrestre.

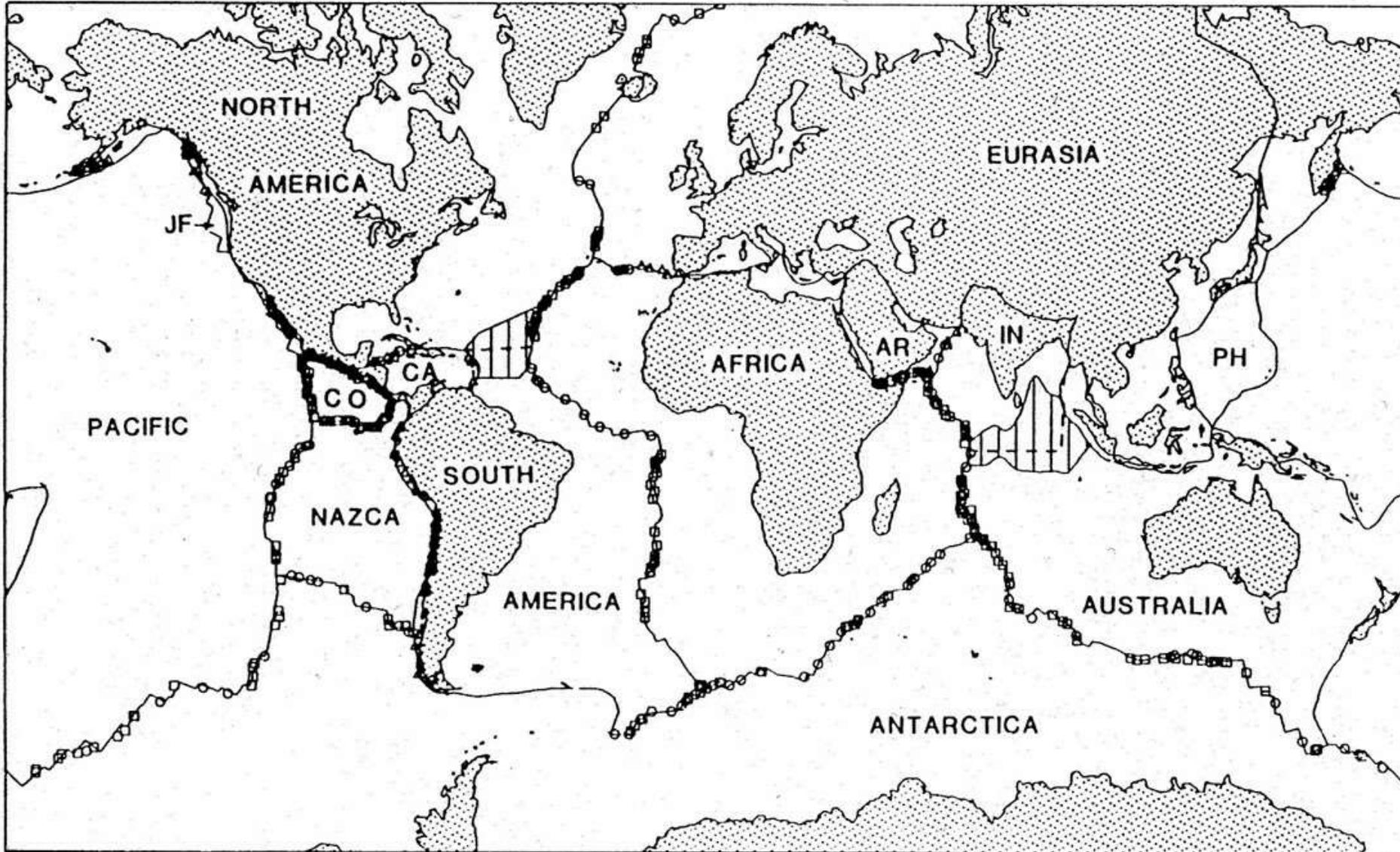
*Velocidades de la solución plurianual SIRGAS 2017 (Sánchez 2020)*



## Principios básicos: velocidades y modelos cinemáticos

- La razón básica para introducir velocidades constantes fue la suposición, que la superficie terrestre se mueve, principalmente, por las placas tectónicas, y que estas placas son *rígidas* con velocidad *uniforme*.
- A comienzos de la serie ITRF (ITRF89) se adoptó el modelo *geofísico* de placas AM0-2 (Minster & Jordan 1978) para todas las velocidades del marco de referencia.
- En ITRF91 y ITRF92 las velocidades se *transformaron* al modelo NUVEL-1 NNR (Argus & Gordon 1991) y desde el ITRF94 al NUVEL-1A NNR (DeMets et al. 1994). Estos modelos incluyen solamente 12 placas rígidias, no consideran deformaciones.
- Los modelos geofísicos se basan en tres tipos de observación:
  - *velocidades* de la extensión del fondo del mar (promedio de 3 millones de años);
  - *azimutes* de las fallas transformantes en el fondo de los océanos (ver arriba);
  - *azimutes* de los planos de fallas sísmicas en los límites de las placas.
- Los modelos representan el movimiento del promedio de ~ 3 millones de años.

# Observaciones del modelo de tectónica de placas NUVEL-1 (DeMets et al. 1990)



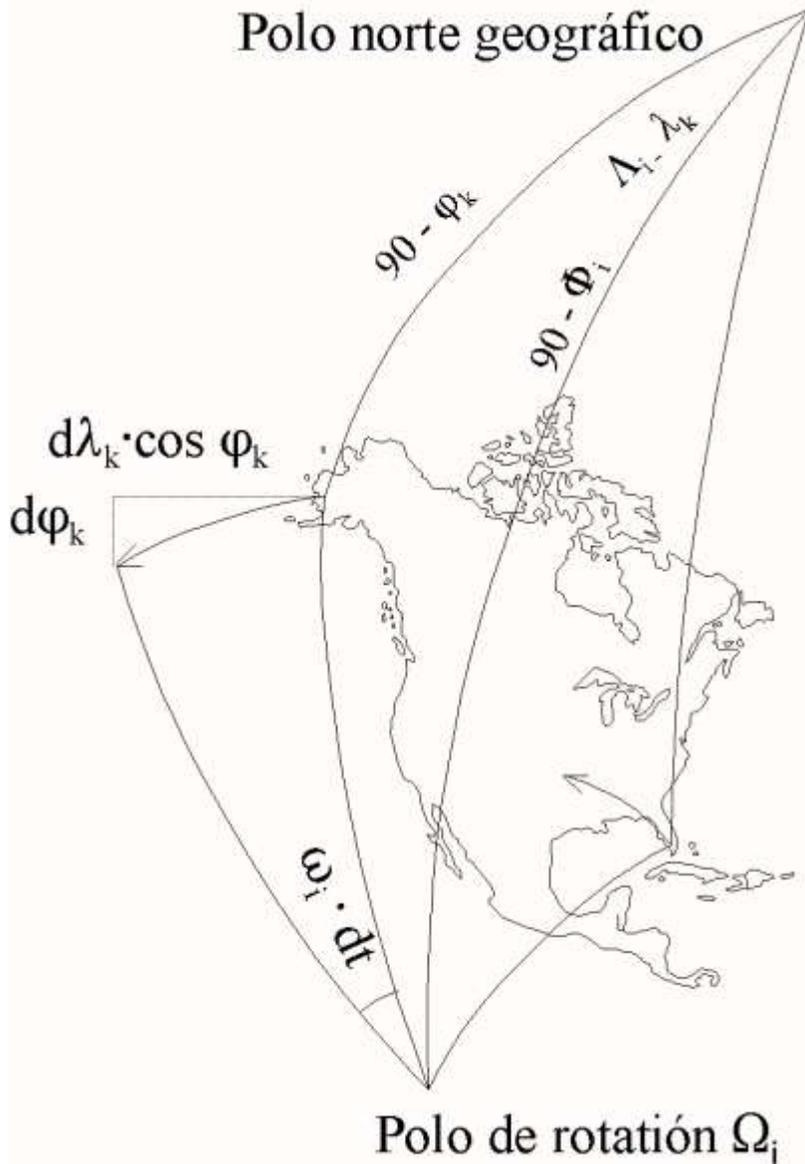
*El movimiento de la placa Eurasia se basa exclusivamente en las observaciones en el Atlántico Norte.*

*No se consideran deformaciones!*

*El modelo NUVEL-1A tiene las mismas observaciones, solo cambió la escala de las velocidades por interpretación nueva de la edad de las zonas de extensión en los océanos.*

□ 277 velocidades y ○ 724 azimutes de la extensión del fondo del mar, Δ 121 azimutes de fallas sísmicas

# Modelar el movimiento de placas rígidas por mediciones geodésicas



## Teorema de Euler:

El movimiento de un punto ( $\mathbf{X}$ ) de una superficie esférica se describe por un vector de rotación geocéntrico ( $\mathbf{\Omega}$ ):

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{X}$$

En coordenadas geográficas (Drewes 1982):

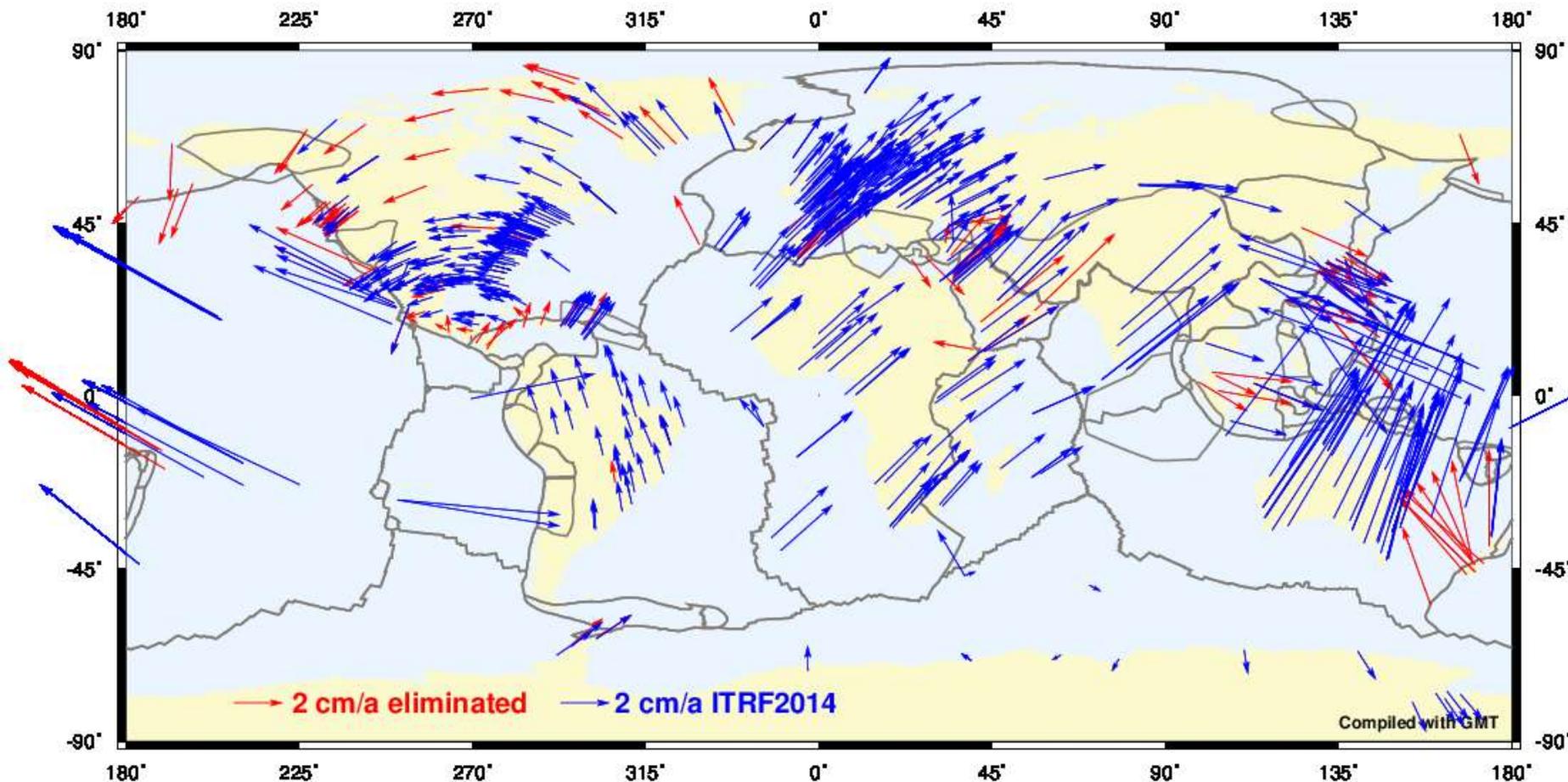
$$(d\varphi/dt)_k = \cos \Phi_i \cdot \sin(\lambda_k - \Lambda_i) \cdot \omega_i \quad (1)$$

$$(d\lambda/dt)_k = (\sin \Phi_i - \cos(\lambda_k - \Lambda_i) \cdot \tan \varphi_k \cdot \cos \Phi_i) \cdot \omega_i$$

$\mathbf{X}$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$  = coordenadas del punto en la superficie esférica  
 $\Phi$ ,  $\Lambda$ ,  $\omega$  = coordenadas del polo y velocidad de rotación.

Desde 1988 se calculan modelos cinemáticos actuales de placas (APKIM) mediante la inversión de fórmula (1) utilizando resultados geodésicos (SLR, VLBI, GNSS). Con estos se puede calcular el movimiento de puntos de placas rígidas (p. ej. en Brasil, Paraguay, Uruguay).

# Modelo actual de la cinemática de placas (APKIM2014) basado en el ITRF2014



## Velocidades del ITRF2014.

**Rojo:** Velocidades con residuales de la compensación mayor que 3 sigma.

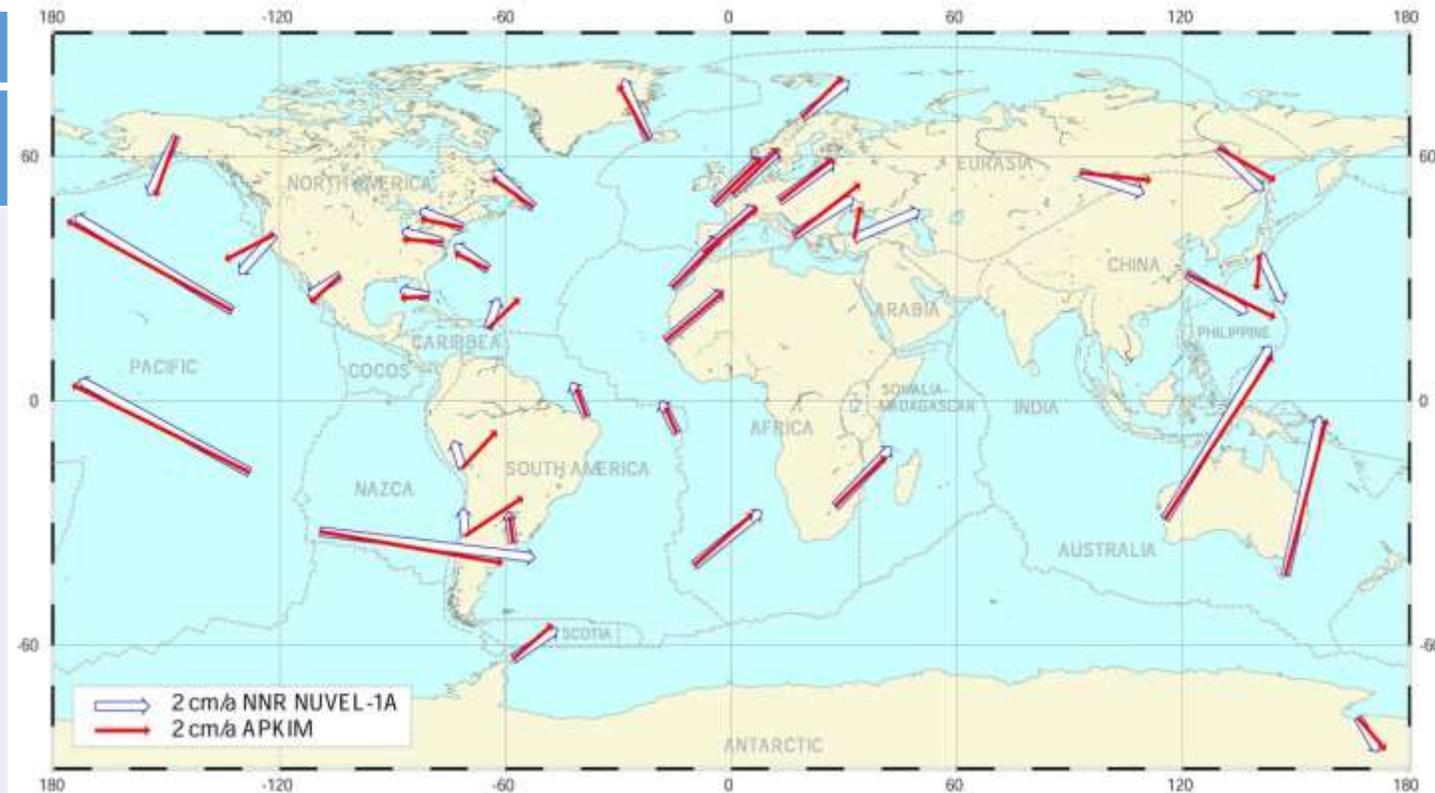
La mayoría está en límites de placas, pero en Asia del Este hay mucha deformación dentro de las placas.

América del Norte parece dividida en dos placas.

*Estimación del movimiento de 17 placas tectónicas por mínimos cuadrados partiendo de velocidades ITRF2014 (APKIM2014). En rojo se muestran valores atípicos con residuales  $> 3$  sigma (142 de 771 estaciones).*

# Comparación del modelo APKIM2014 con el modelo geofísico NNR NUVEL-1A

Plate	APKIM2014			NNR NUVEL-1A		
	$\Phi$ [°]	$\Lambda$ [°]	$\Omega$ [°/Ma]	$\Phi$ [°]	$\Lambda$ [°]	$\Omega$ [°/Ma]
Africa	49.57 ±0.19	278.71 ±0.54	0.267 ±0.001	50.57	286.04	0.291
Antarctica	59.32 ±0.39	234.04 ±0.56	0.216 ±0.003	62.99	244.24	0.238
Arabia	49.62 ±0.31	3.54 ±1.05	0.582 ±0.010	45.23	355.54	0.546
Australia	32.29 ±0.10	37.91 ±0.20	0.630 ±0.001	33.85	33.17	0.646
Caribbean	31.48 ±1.16	269.32 ±3.01	0.337 ±0.032	25.00	266.99	0.214
Eurasia	54.45 ±0.22	259.66 ±0.33	0.255 ±0.001	50.62	247.73	0.234
India	51.51 ±0.31	1.71 ±4.33	0.523 ±0.009	45.51	0.34	0.545
N. America	-4.82 ±0.30	272.10 ±0.13	0.193 ±0.001	-2.43	274.10	0.207
Nazca	45.60 ±0.91	257.75 ±0.39	0.632 ±0.006	47.80	259.87	0.743
Pacific	-62.50 ±0.08	110.42 ±0.34	0.680 ±0.001	63.05	107.33	0.641
S. America	-18.68 ±0.51	231.31 ±1.30	0.122 ±0.001	25.35	235.58	0.116



*Comparación del modelo geodésico APKIM2014 y el modelo geofísico NNR NUVEL-1A: Los números rojos muestran las diferencias mayores que 3 sigma del cálculo de compensación. Casi todas las placas tienen diferencias significativas. El modelo NNR NUVEL-1A no es apto como marco de referencia cinemático (ITRF, SIRGAS). Además no es “no net rotation” para toda la corteza terrestre, porque no incluye deformaciones.*

# Placas rígidas y zonas de deformación

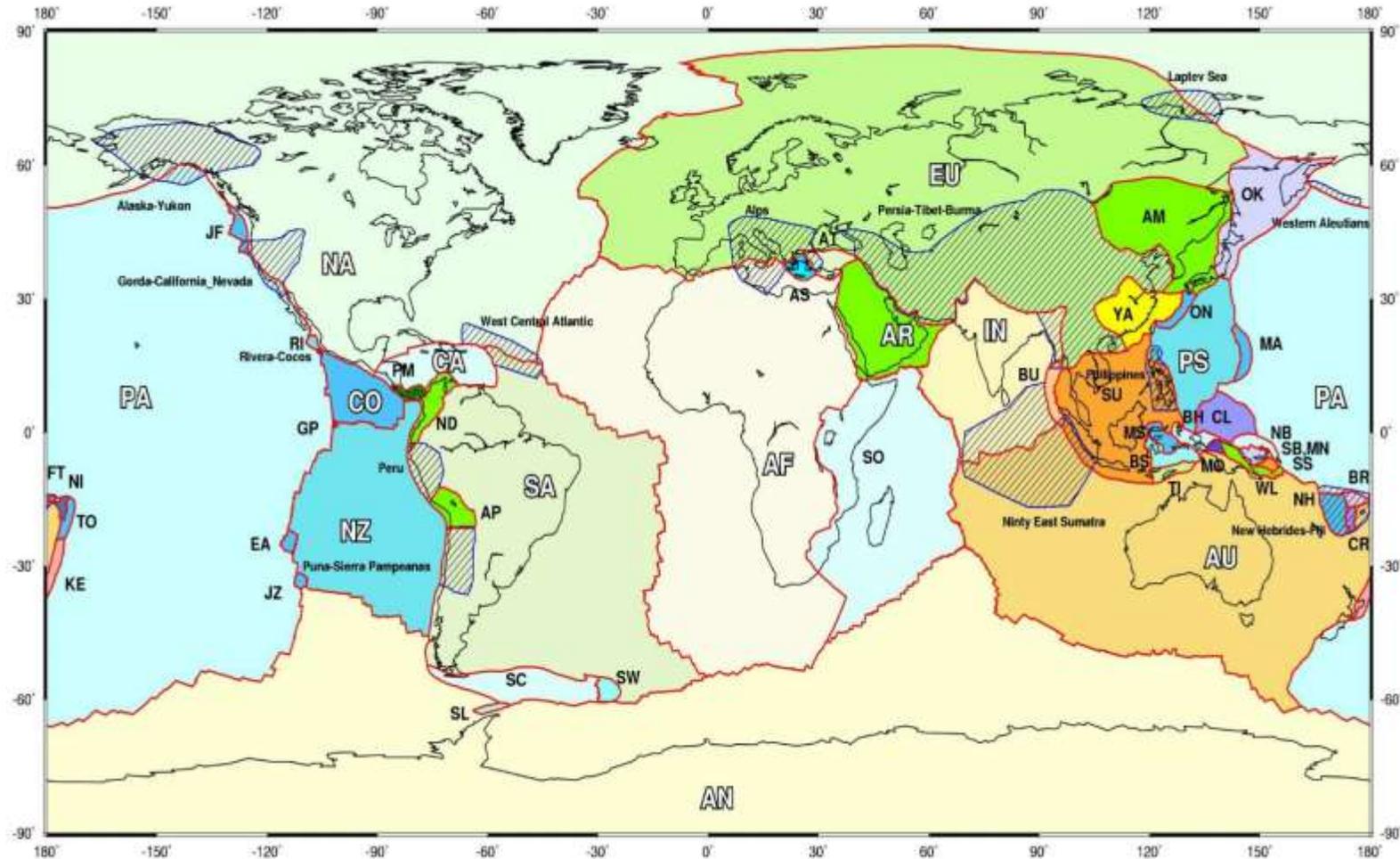
El modelo *geofísico* PB2002 (Bird 2003) incluye 52 placas y 13 zonas de orogénesis (deformaciones). El principio y los tipos de observación son los mismos de NUVEL y los parámetros de las 12 placas NUVEL-1A son idénticos.

En las Américas se postulan 8 placas en PB2002:

2 en América Central / Caribe  
*Caribbean (CA), Panama (PM)*

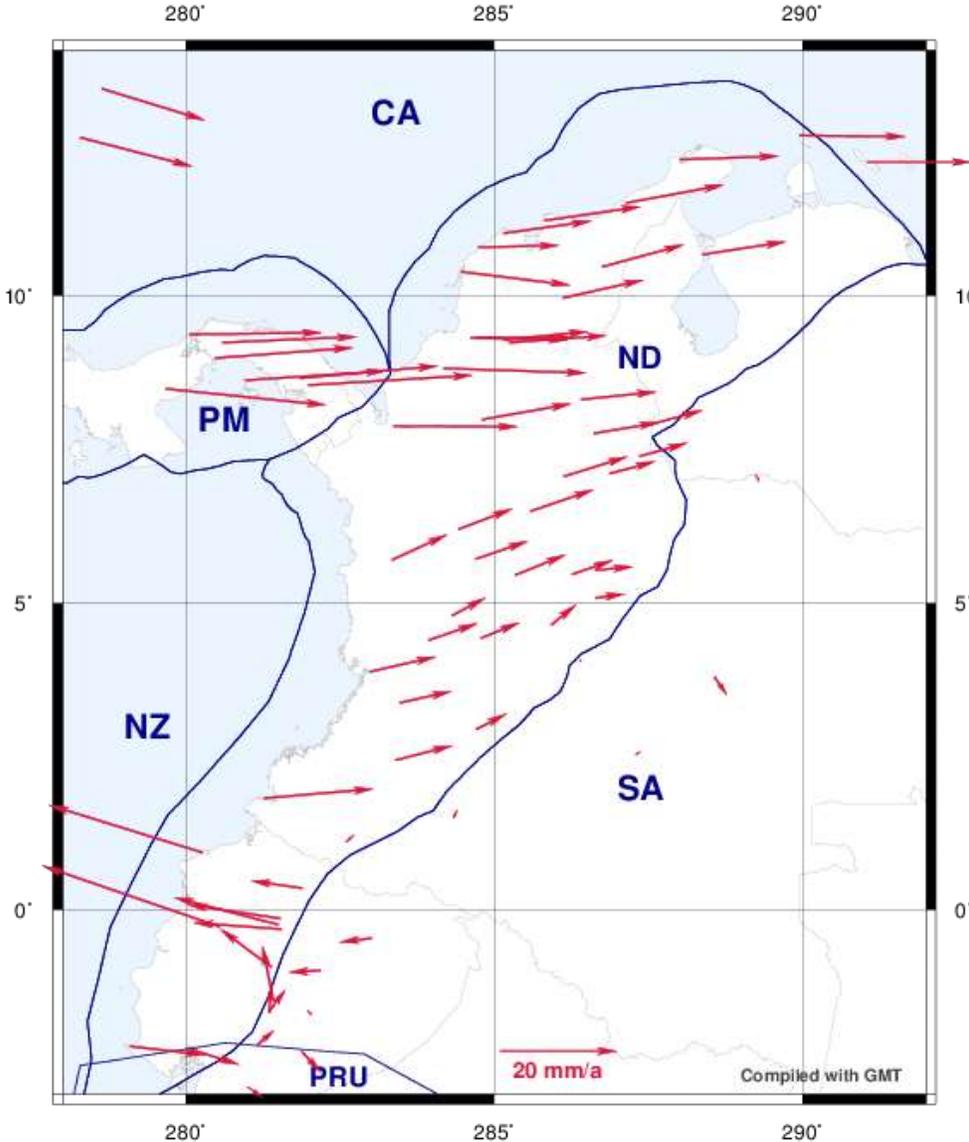
3 en América del Norte  
*North America (NA), Juan de Fuca (JF), Rivera (RI)*

3 en América del Sur  
*South America (SA), North Andes (ND), Altiplano (AP)*



*Modelo de placas PB2002 (Bird 2003)  
52 placas rígidas (12 idénticas a NUVEL-1A)  
13 zonas de orogénesis (deformación)*

# Placas rígidas y zonas de deformación en Sudamérica

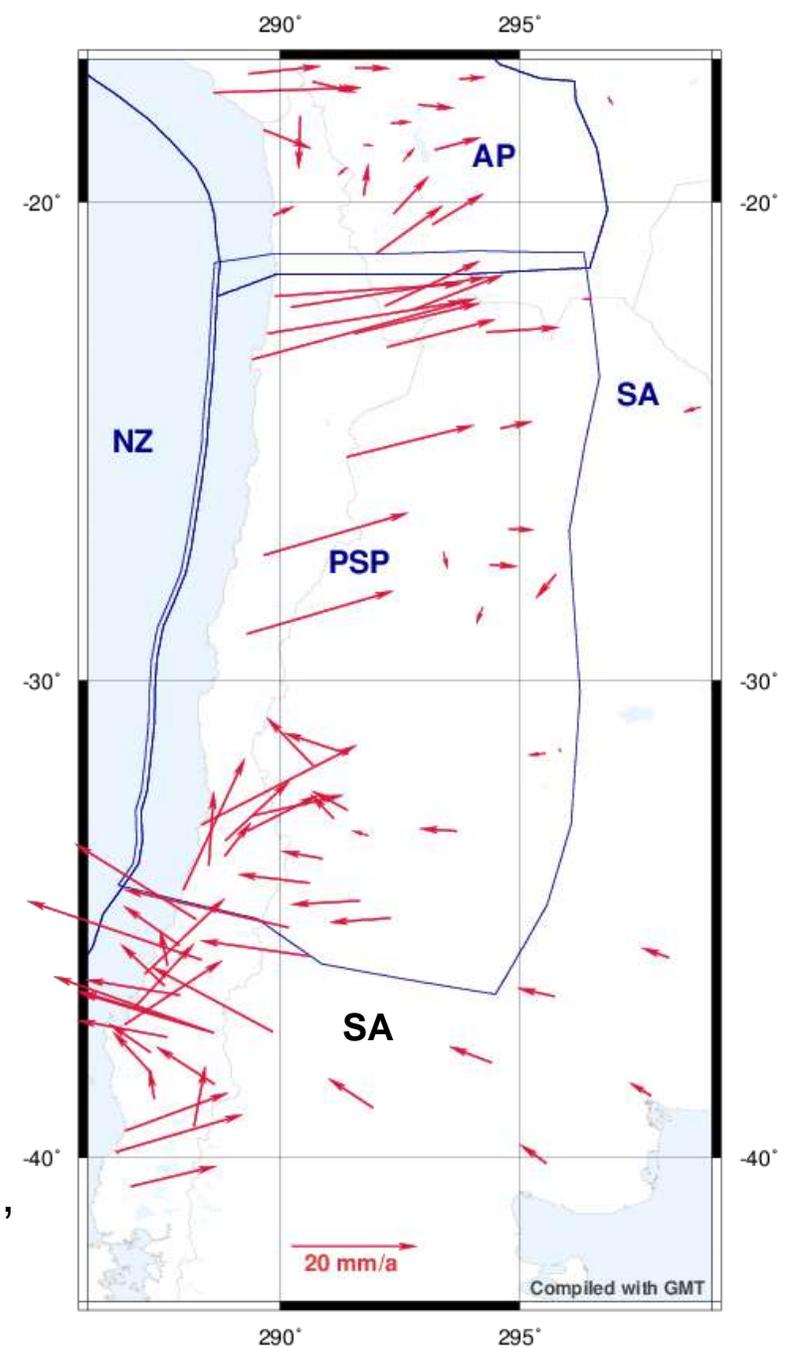


La “Placa Andes Norte” (ND)  
← no es una placa rígida.

La “Placa Altiplano” (AP)  
no es una placa rígida.

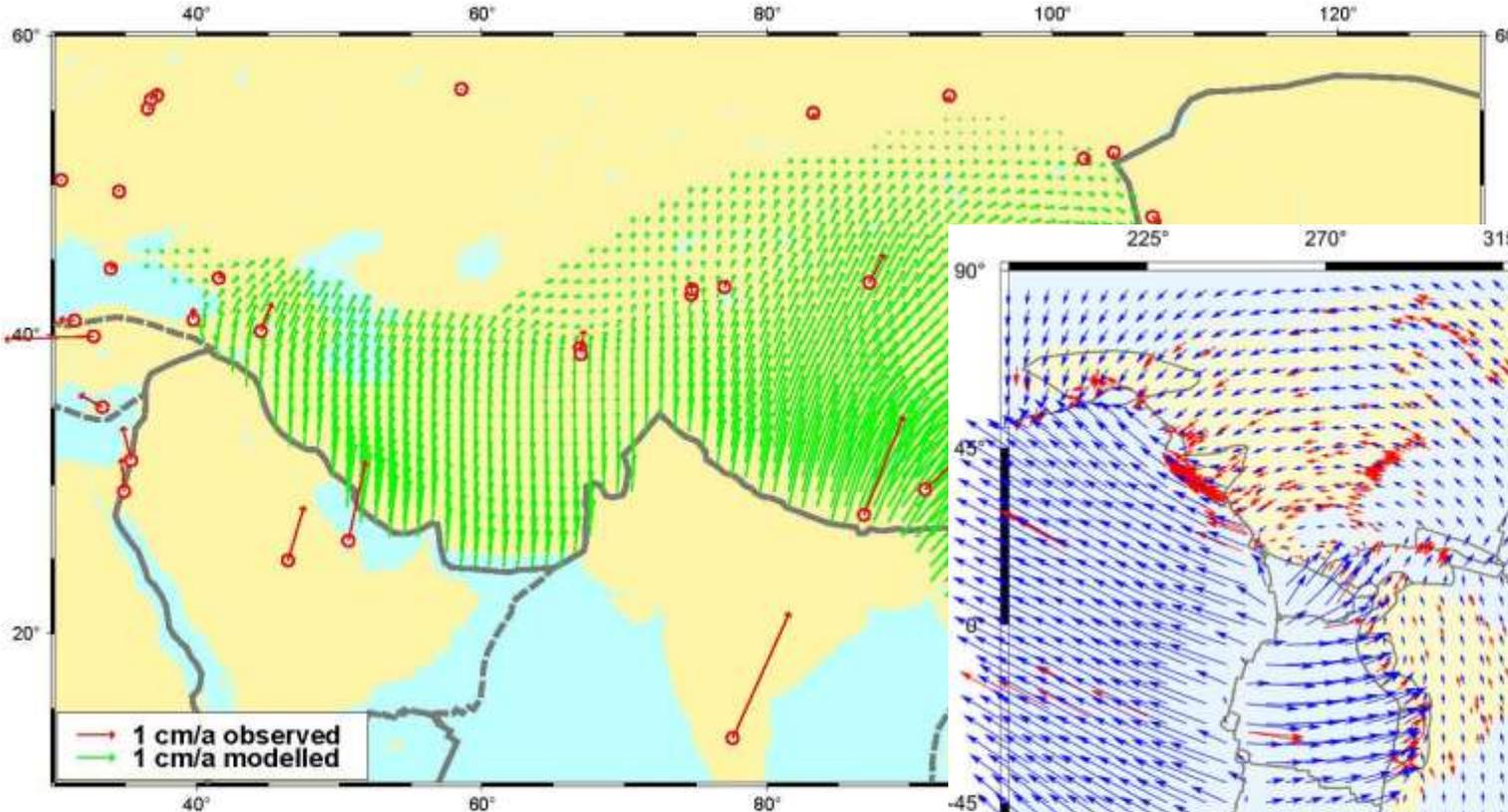
Las regiones de Maule al sur  
(Ñuble, Bio-Bio, Araucanía, ...) no pertenecen a la placa de Sudamérica sino son zonas de deformación.

Con la mejora de la precisión del posicionamiento geodésico sabemos hoy, que en sentido geodésico (precisión < 1 mm/a), no hay placas rígidas.

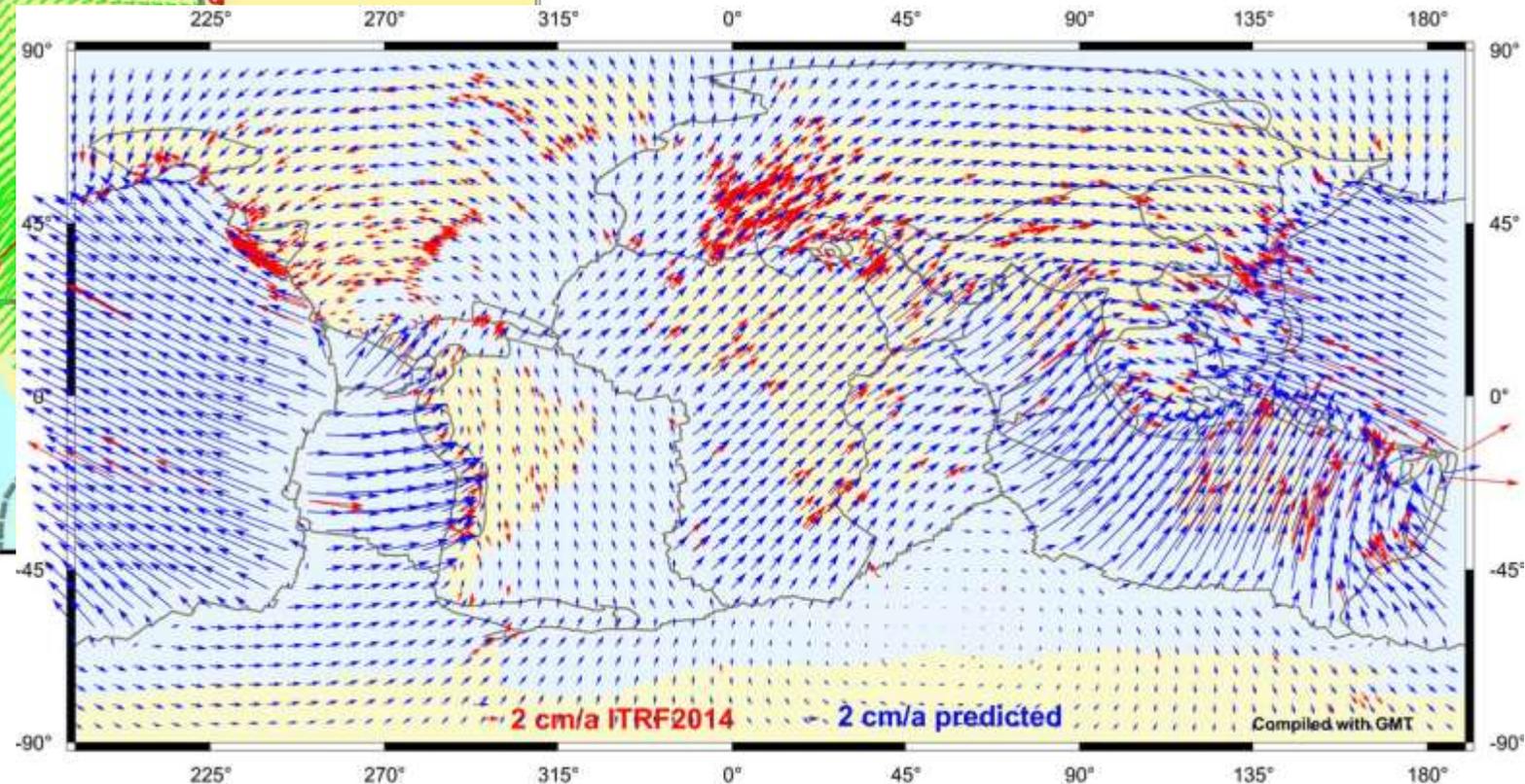


# Consecuencias de las deformaciones en y entre las placas

En las soluciones APKIM se incluyen a partir de APKIM2009 (ITRF2005) varias zonas de deformación, en APKIM2014 se calcula un modelo global completo de deformación.



*Modelo de deformación del sudeste de Eurasia derivado del ITRF2005 (relativo a la placa EURASIA).*



*Modelo global de deformación completa derivado del ITRF2014.*

# Como modelar las deformaciones?

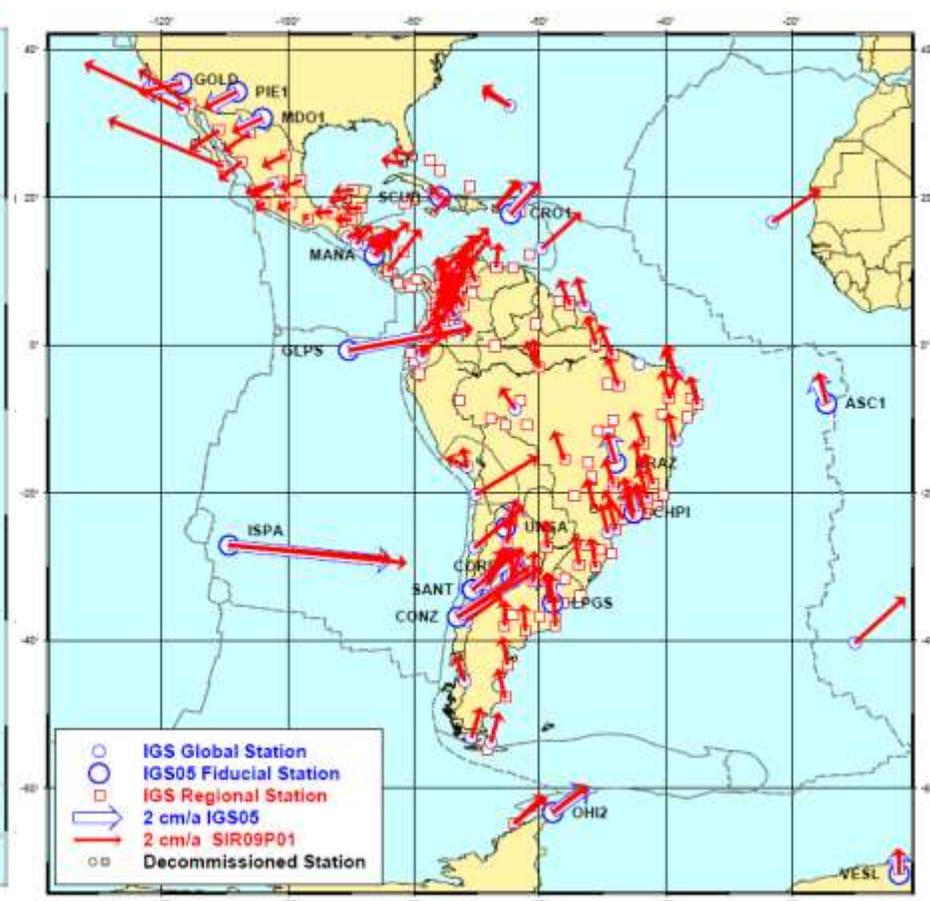
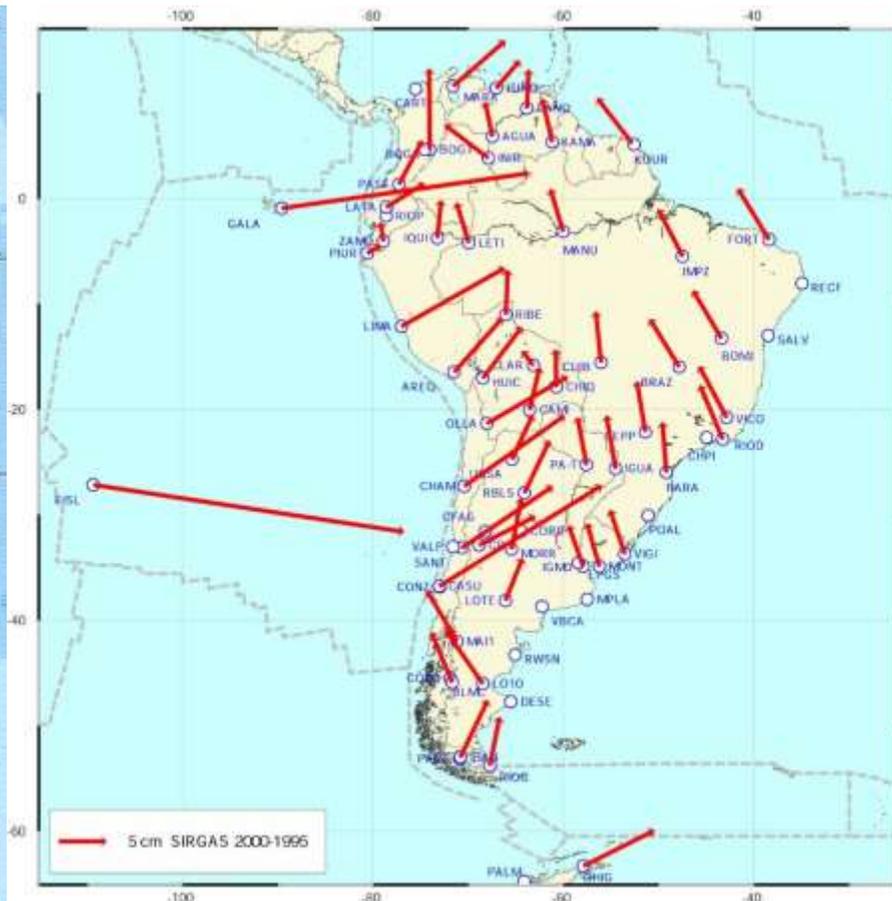
Hay varios métodos para modelar las deformaciones de la corteza terrestre:

- Modelos geofísicos (basados en la estructura y reología de las esferas terrestres):
  - El proyecto “*World Stress Map*” (<http://www.world-stress-map.org/>) se dedica a modelos globales sofisticados de las tensiones en la corteza terrestre.
  - En varias regiones se aplicaron modelos de elementos finitos con reología viscosa (manto), elástica (litosfera) y plástica (corteza).
  - La combinación con observaciones geodésicas resulta en modelos de trayectorias seculares, anuales e instantáneas.
- Modelos geodésicos (basados en las mediciones geodésicas y su interpolación):
  - Interpolación polinomial (bi- o tridimensional) o “splines”.
  - Interpolación Gauss o “kriging”.
  - Filtro Kalman (distribución normal bi- o tridimensional).
  - Interpolación por mínimos cuadrados o “colocación”.

# Comparación de modelos de deformación geofísicos y geodésicos en Sudamérica

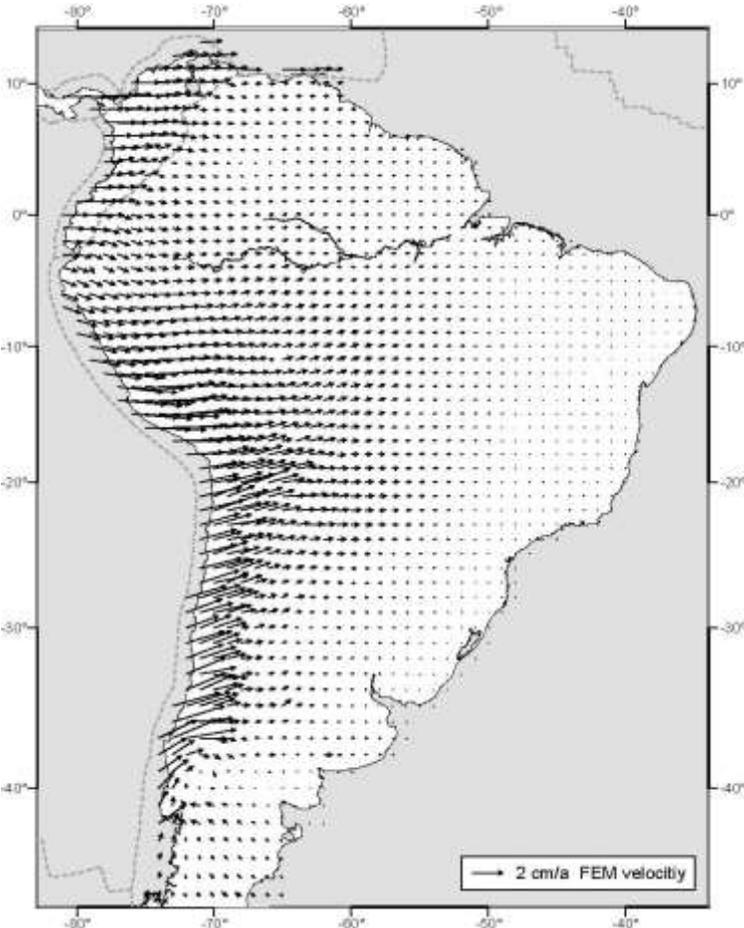
En 2003 y 2009 se calcularon modelos geofísicos por elementos finitos y modelos geodésicos por colocación aplicando los resultados de proyectos GPS en Sudamérica

*Datos de entrada: 6 proyectos geodinámicos, 1 diferencia SIRGAS 2000-1995, 1 solución multianual DGFI 01/09*



# Comparación de modelos de deformación geofísicos y geodésicos en Sudamérica

La comparación de los dos modelos muestra gran concordancia, aunque el modelo geofísico no incluyó datos sofisticados de la estructura y reología en muchas regiones (Drewes y Heidbach 2005 y 2012).



← *Modelo geofísico por elementos finitos con modulo Young 70 GPa y número Poisson 0,3.*

*Modelo geodésico por colocación → con funciones de covarianzas empíricas locales.*

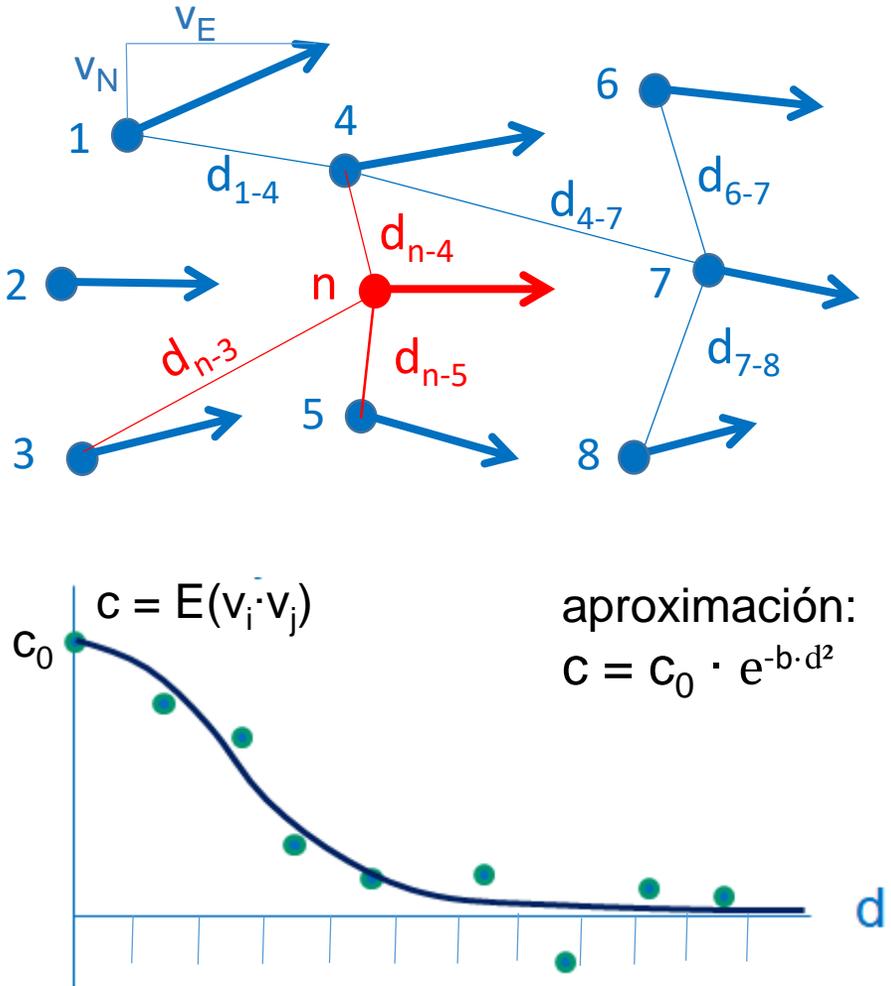
*Resultados de la comparación de modelos:  
Diferencia r.m.s. norte – sur:  $\pm 0.9$  mm/a,  
Diferencia r.m.s. este – oeste:  $\pm 1.7$  mm/a,  
Precisión de las velocidades  $> \pm 2.0$  mm/a.*

*Consecuencia: Para asuntos geodésicos se puede calcular el modelo matemático de colocación por mínimos cuadrados.*



# La interpolación (predicción) por mínimos cuadrados (colocación)

El principio de la predicción por mínimos cuadrados es la interpolación basada en la correlación entre las velocidades de puntos vecinos.



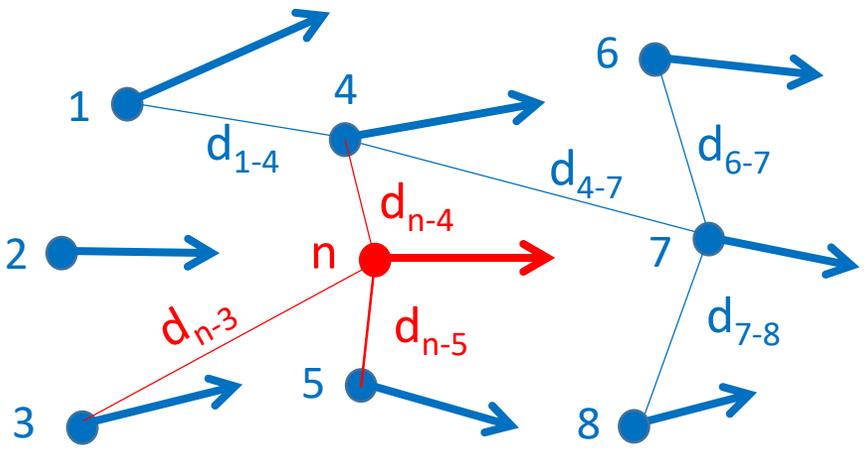
La correlación de dos variables  $x$ ,  $y$  se calcula por

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

En la colocación, las variables  $x$ ,  $y$  son velocidades  $v$  en dos puntos vecinos. La correlación se calcula para  $v_N$  y  $v_E$  en clases de distancias, p. ej. de 30 km. En cada clase  $i$  entran las  $r$  de todas combinaciones de dos puntos con distancias  $(i-1 \dots i) \cdot 30$  km. En la distancia cero resulta la varianza  $c_0$ , con que se multiplica la correlación  $r$ . Las medias de las clases se ajustan por la función exponencial de covarianza.

# La interpolación (predicción) por mínimos cuadrados (colocación)

De la función de correlación se forman las matrices de covarianza:  $c_{ij} = c_0 \cdot e^{-b \cdot d_{ij}^2}$ . Son tres submatrices:  $\mathbf{C}_{NN}$ ,  $\mathbf{C}_{EE}$  y  $\mathbf{C}_{NE}$ . El valor de predicción se calcula según formula (3)



$$\mathbf{v}_{pred} = \mathbf{C}_{new}^T \mathbf{C}_{obs}^{-1} \mathbf{v}_{obs} \quad (3)$$

$$\mathbf{s}_{pred} = \mathbf{C}_0 - \mathbf{C}_{new}^T \mathbf{C}_{obs}^{-1} \mathbf{C}_{new} \text{ (desviación estándar)}$$

$\mathbf{v}_{pred}$  = velocidad predicha ( $v_N, v_E$ )

$\mathbf{v}_{obs}$  = velocidad observada ( $v_N, v_E$ )

$\mathbf{C}_{new}$  = matriz de correlación entre valores predichos y observados

$\mathbf{C}_{obs}$  = matriz de correlation entre valores observados ( $\mathbf{C}_{NN}, \mathbf{C}_{EE}, \mathbf{C}_{NE}$ )

Las matrices  $\mathbf{C}$  se construyen de las funciones de covarianzas derivadas de las velocidades. Como condición se requiere, que el conjunto de las velocidades sea homogéneo, isotrópico y estacionario con la esperanza matemática cero.

Matrices de covarianzas  $\mathbf{C}_{new}$  y  $\mathbf{C}_{obs}$

$C_{\varphi 1 \varphi n}$	$C_{\varphi 1 \lambda n}$	$C_{\varphi 1 \varphi 1}$	$C_{\varphi 1 \varphi 2}$	$C_{\varphi 1 \varphi 3}$	$C_{\varphi 1 \lambda 1}$	$C_{\varphi 1 \lambda 2}$	$C_{\varphi 1 \lambda 3}$
$C_{\varphi 2 \varphi n}$	$C_{\varphi 2 \lambda n}$	$C_{\varphi 2 \varphi 1}$	$C_{\varphi 2 \varphi 2}$	$C_{\varphi 2 \varphi 3}$	$C_{\varphi 2 \lambda 1}$	$C_{\varphi 2 \lambda 2}$	$C_{\varphi 2 \lambda 3}$
$C_{\varphi 3 \varphi n}$	$C_{\varphi 3 \lambda n}$	$C_{\varphi 3 \varphi 1}$	$C_{\varphi 3 \varphi 2}$	$C_{\varphi 3 \varphi 3}$	$C_{\varphi 3 \lambda 1}$	$C_{\varphi 3 \lambda 2}$	$C_{\varphi 3 \lambda 3}$
$C_{\varphi 1 \lambda n}$	$C_{\lambda 1 \lambda n}$	$C_{\varphi 1 \lambda 1}$	$C_{\varphi 1 \lambda 2}$	$C_{\varphi 1 \lambda 3}$	$C_{\lambda 1 \lambda 1}$	$C_{\lambda 1 \lambda 2}$	$C_{\lambda 1 \lambda 3}$
$C_{\varphi 2 \lambda n}$	$C_{\lambda 2 \lambda n}$	$C_{\varphi 2 \lambda 1}$	$C_{\varphi 2 \lambda 2}$	$C_{\varphi 2 \lambda 3}$	$C_{\lambda 2 \lambda 1}$	$C_{\lambda 2 \lambda 2}$	$C_{\lambda 2 \lambda 3}$
$C_{\varphi 3 \lambda n}$	$C_{\lambda 3 \lambda n}$	$C_{\varphi 3 \lambda 1}$	$C_{\varphi 3 \lambda 2}$	$C_{\varphi 3 \lambda 3}$	$C_{\lambda 3 \lambda 1}$	$C_{\lambda 3 \lambda 2}$	$C_{\lambda 3 \lambda 3}$

**Gran ventaja: desviación estándar!**

# Como satisfacer la condición de homogeneidad, isotropía y estacionalidad?

## Definiciones:

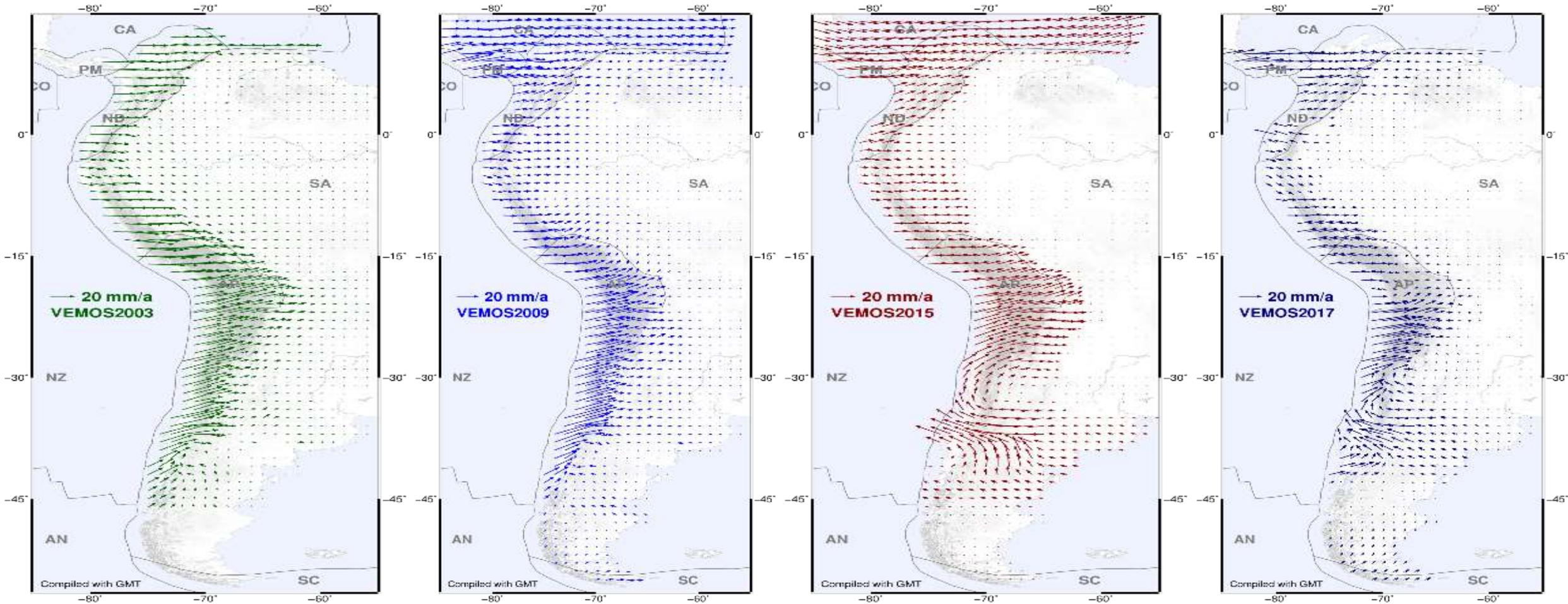
- a) Un proceso estocástico se llama homogéneo, si sus propiedades estadísticas son invariantes a traslaciones. (*La función de covarianza es válida en toda la región*).
- b) Un proceso estocástico se llama isótropo, si sus propiedades estadísticas son invariantes a rotaciones. (*La función de covarianza no depende de la dirección*).
- c) Un proceso estocástico se llama estacionario, si sus propiedades estadísticas son invariantes en el tiempo. (*La función de covarianza es válida en todo el periodo*).

Para cumplir estas condiciones más la condición de la esperanza matemática igual cero, hay que reducir cualquier sistemática y tendencia del conjunto de velocidades.

- En una esfera no hay traslaciones, por eso se reducen las rotaciones de las placas tectónicas según formula (1), que cumple con las condiciones a) y b)
- Para tener la esperanza matemática cero se preselecciona un conjunto de puntos (dominio hasta cierta distancia) para la colocación, y se reduce la velocidad media.
- Con respecto a la estacionalidad (invariante en el tiempo) ver lo que sigue.

# Resultados de modelos de velocidades para SIRGAS (VEMOS)

Se publicaron modelos de velocidades SIRGAS en los años (Sánchez y Drewes 2020) 2005 (VEMOS2003), 2012 (VEMOS2009), 2016 (VEMOS2015), y 2020 (VEMOS2017)



Los modelos 2003 y 2009 son muy similares, después de 2010 hay un cambio brusco.

# Variación de las velocidades en el tiempo

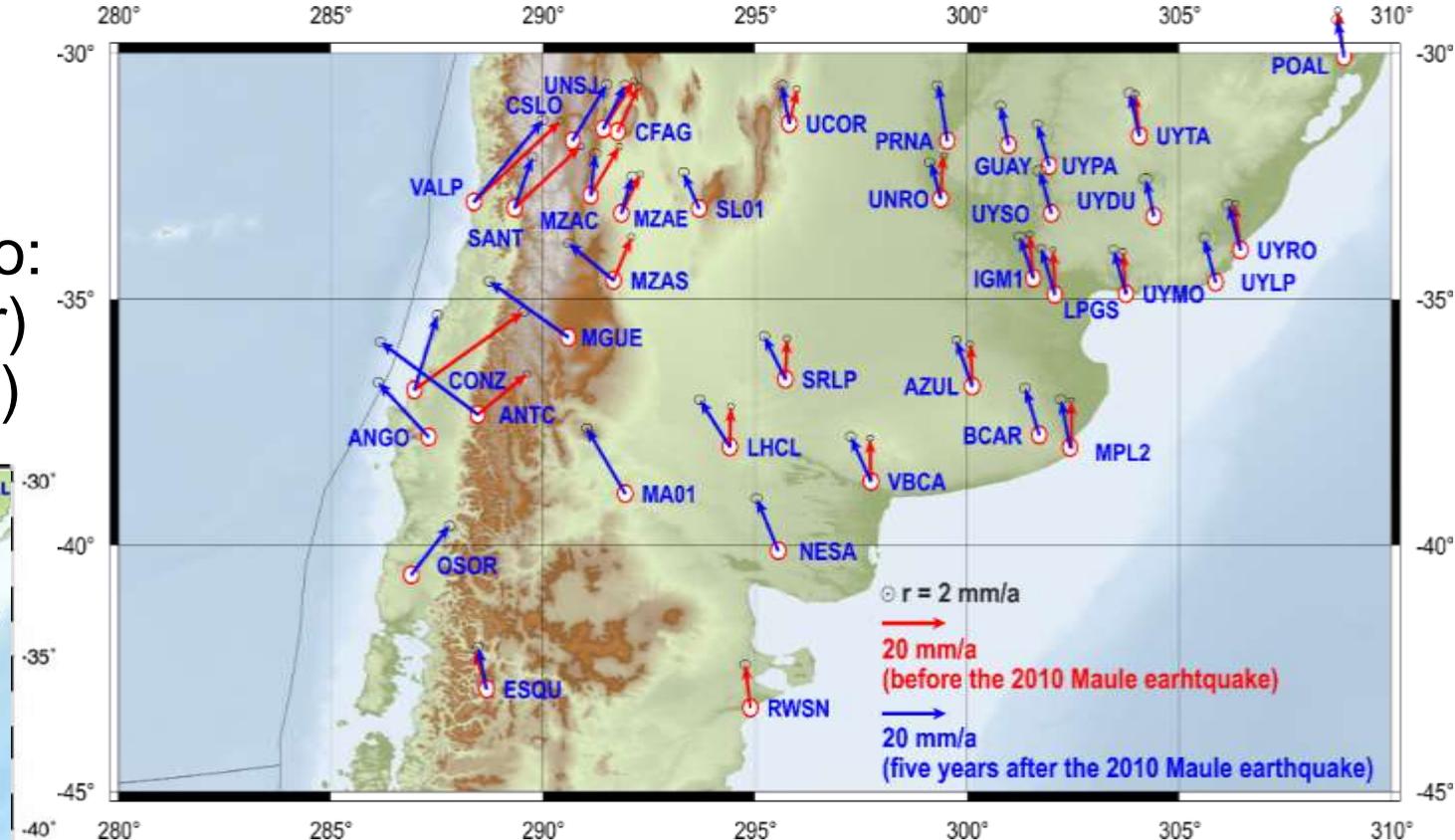
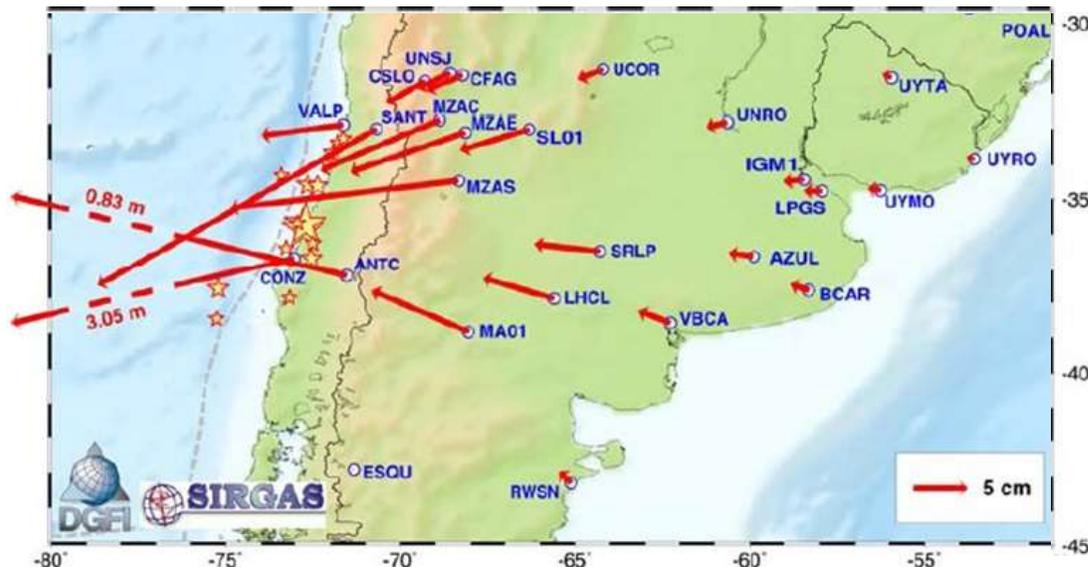
El problema de los modelos de deformación se amplía porque las velocidades no son constantes sino varían en el tiempo, es decir hay que interpolar en espacio y tiempo.

Varios tipos de variación temporal:

- Eventos sísmicos (terremotos)
- Movimiento no lineal (ambiental)

Saltos técnicos en la serie de tiempo:

- Cambio de la base del punto (pilar)
- Cambio de antena (centro de fase)

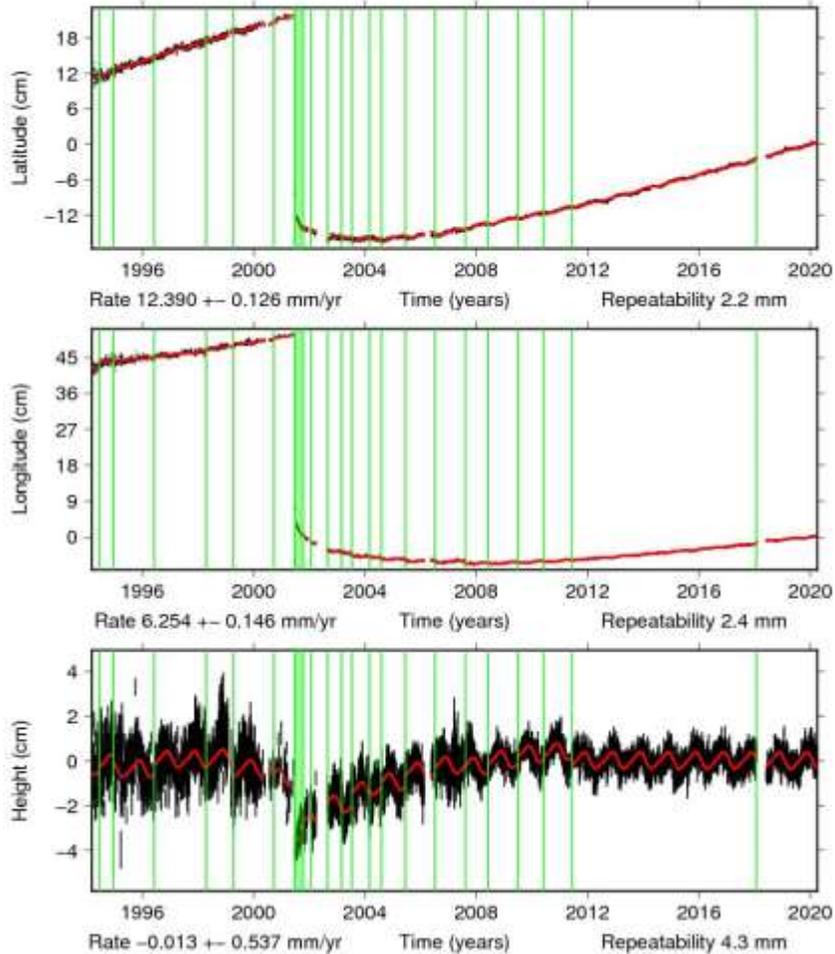


*Saltos (izquierda) y cambio de velocidades (arriba) de estaciones SIRGAS antes y después del terremoto Maule, Chile, 27 de febrero 2010.*

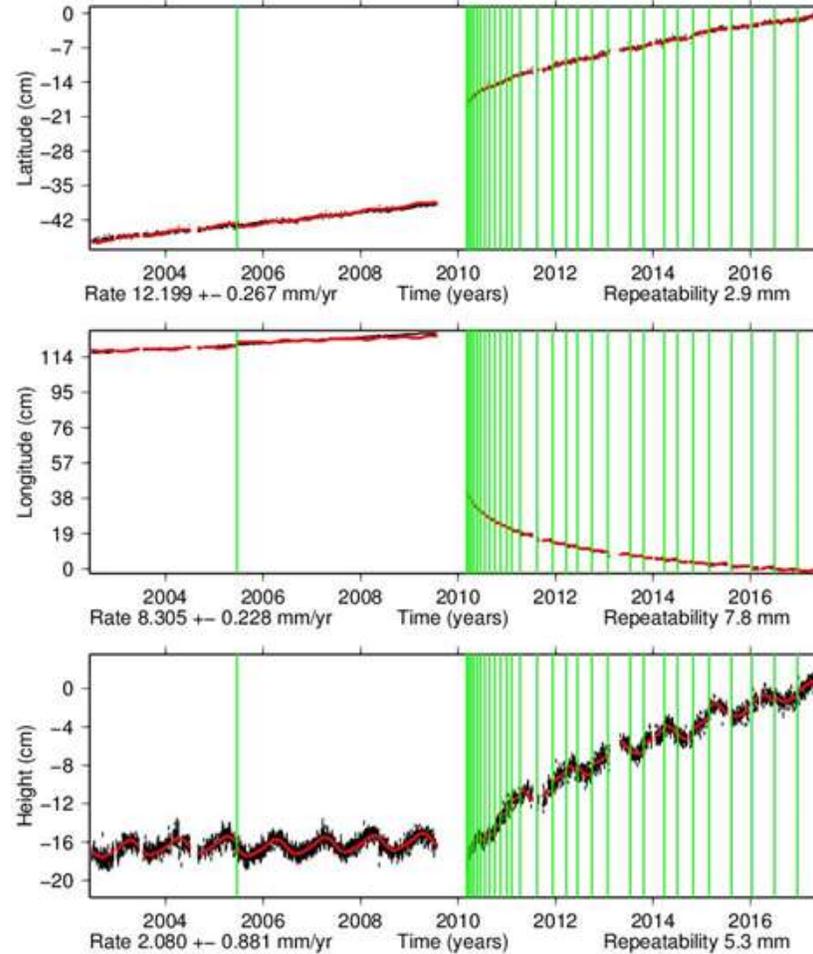
# Variación de las posiciones y velocidades en el tiempo

Las soluciones multianuales representan cambios abruptos de la posición y la velocidad mediante saltos en la serie de tiempo y cambios en los valores de velocidad.

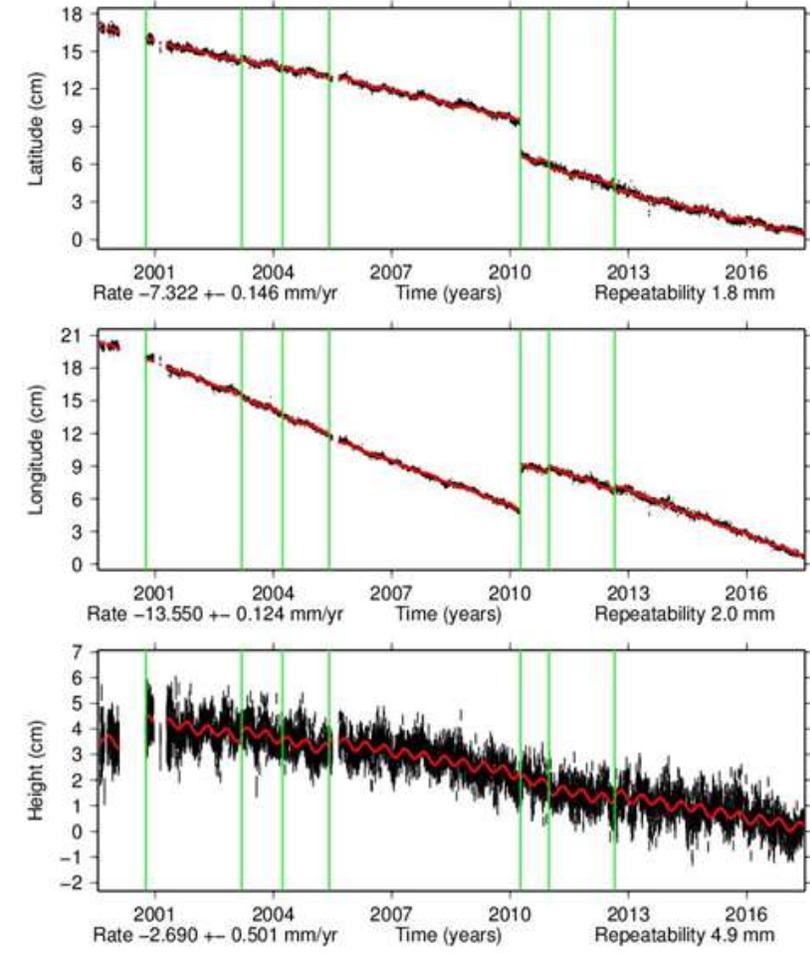
Time series for AREQ. (Peru)



Time series for ANTC. (Chile)



Time series for IID2. (Calif.-Nevada)

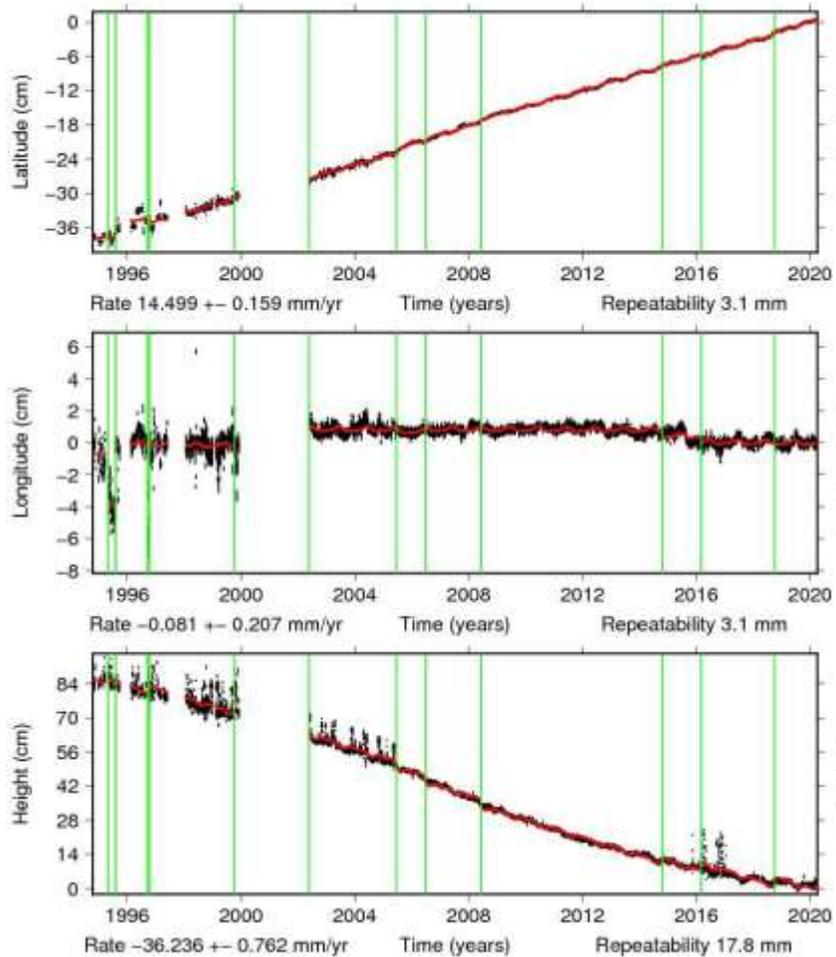


([https://sideshow.jpl.nasa.gov\\_post\\_series.html](https://sideshow.jpl.nasa.gov_post_series.html))

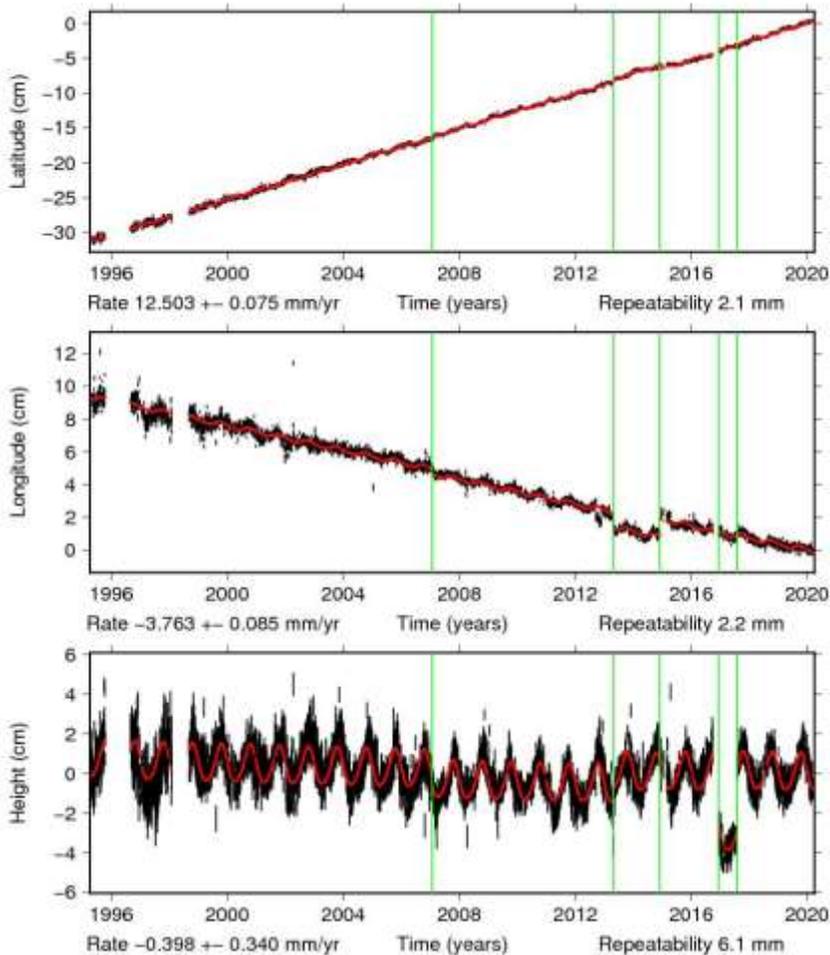
# Variación de las posiciones y velocidades en el tiempo

Cambios ambientales (hundimiento por desaguar el agua subterránea), variaciones estacionales (período anual) y cambios técnicos.

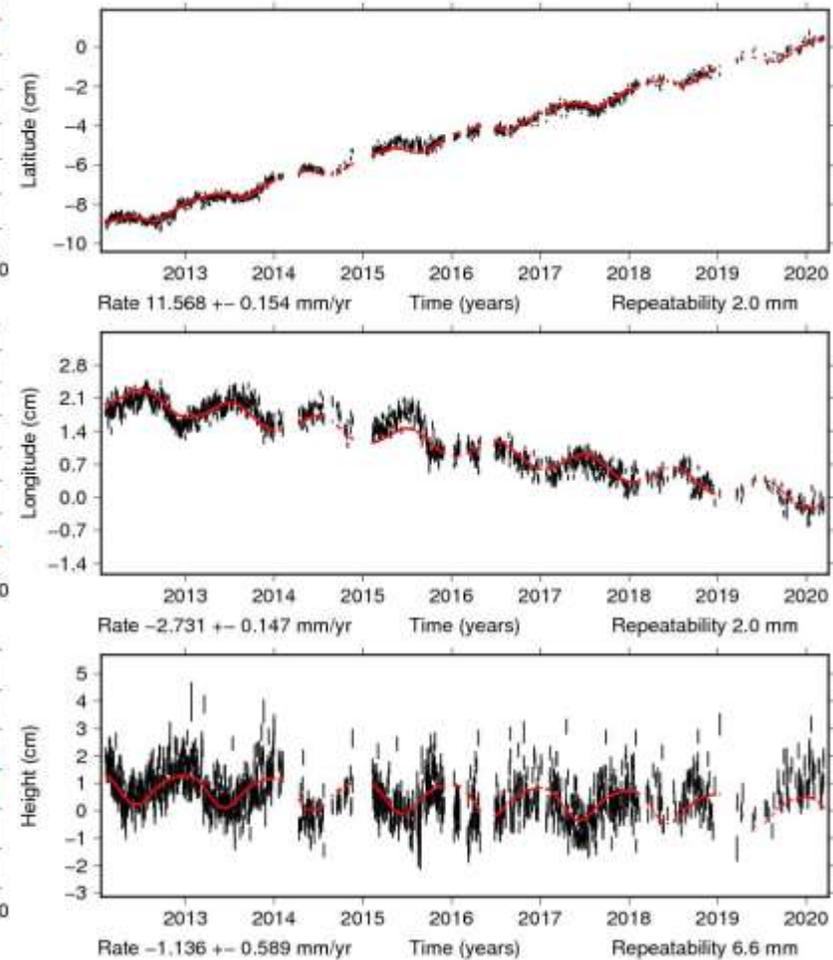
Time series for BOGT. (Colombia)



Time series for BRAZ. (Brasil)



Time series for CHAC. (Argentina)



([https://sideshow.jpl.nasa.gov\\_post\\_series.html](https://sideshow.jpl.nasa.gov_post_series.html))

# Variación de las posiciones y velocidades en el tiempo

En los archivos de coordenadas de las soluciones (SINEX, CRD) se indican los saltos y variaciones de la velocidad en el número del punto (DOMES NO.) como solución “i”.

## Ejemplos del ITRF2014

### Terremoto Arequipa 2001

```
AREQ A 3 C 94:365:86390 96:318:00000 95:341:00005
AREQ A 4 C 96:317:86389 01:174:86370 99:062:86390
AREQ A 5 C 01:176:86387 01:184:43200 01:179:64806
AREQ A 6 C 01:189:86387 07:228:43200 04:208:64806
AREQ A 7 C 07:227:86386 14:092:00000 10:341:43207
AREQ A 8 C 14:092:00000 15:046:43200 14:251:64800
```

### Cambios técnicos en Brasilia

```
BRAZ A 1 C 95:065:00000 95:287:00000 95:176:00000
BRAZ A 2 C 96:242:86389 98:030:00000 97:135:00006
BRAZ A 3 C 98:248:86388 07:071:00000 02:341:43206
BRAZ A 4 C 07:076:86386 12:262:86370 09:350:86392
BRAZ A 5 C 12:263:00000 12:332:86370 12:297:86385
BRAZ A 6 C 12:333:00000 13:115:43200 13:041:21600
BRAZ A 7 C 13:116:00000 14:338:00000 14:044:43200
BRAZ A 8 C 14:352:86384 15:024:00000 15:005:00008
```

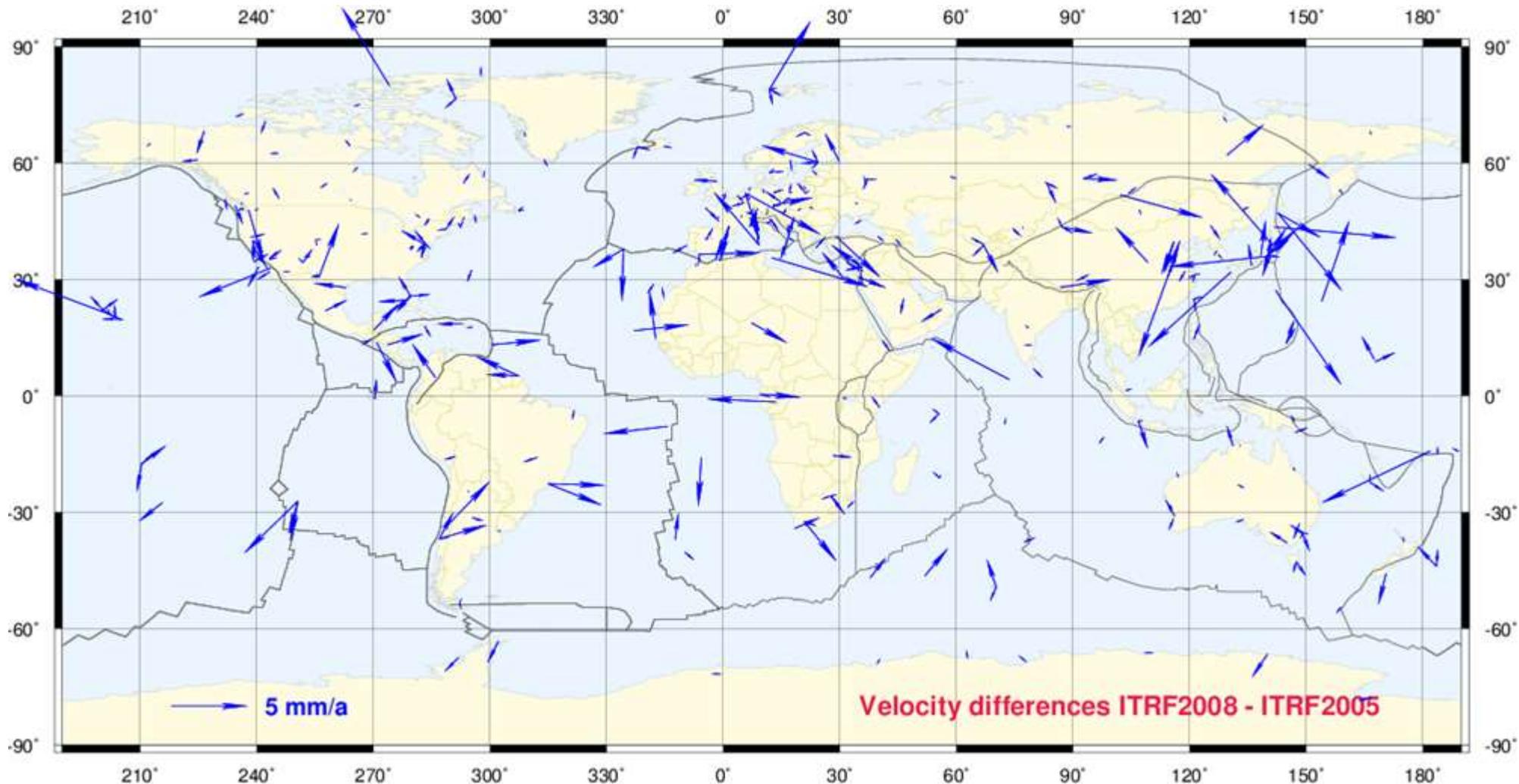
### Subsidencia en Bogotá

```
BOGT A 1 C 94:313:00000 97:152:00000 96:050:43200
BOGT A 2 C 98:025:00000 99:340:00000 98:365:00000
BOGT A 3 C 02:049:00000 05:188:00000 03:301:43200
BOGT A 4 C 05:193:00000 07:215:00000 06:204:00000
BOGT A 5 C 07:228:00000 07:327:43200 07:277:64800
BOGT A 6 C 07:351:86386 08:153:86370 08:069:43192
BOGT A 7 C 08:159:00000 09:247:00000 09:020:00000
BOGT A 8 C 09:253:86385 11:098:00000 10:175:00007
BOGT A 9 C 11:097:86385 15:046:43200 13:070:64807
```

Lamentablemente, los períodos de las soluciones no son idénticos de un ITRF al otro ni en IGS y SIRGAS. Hay que seleccionar los datos adecuados para interpolar de una fecha a otra.

# Variación de velocidades en el tiempo

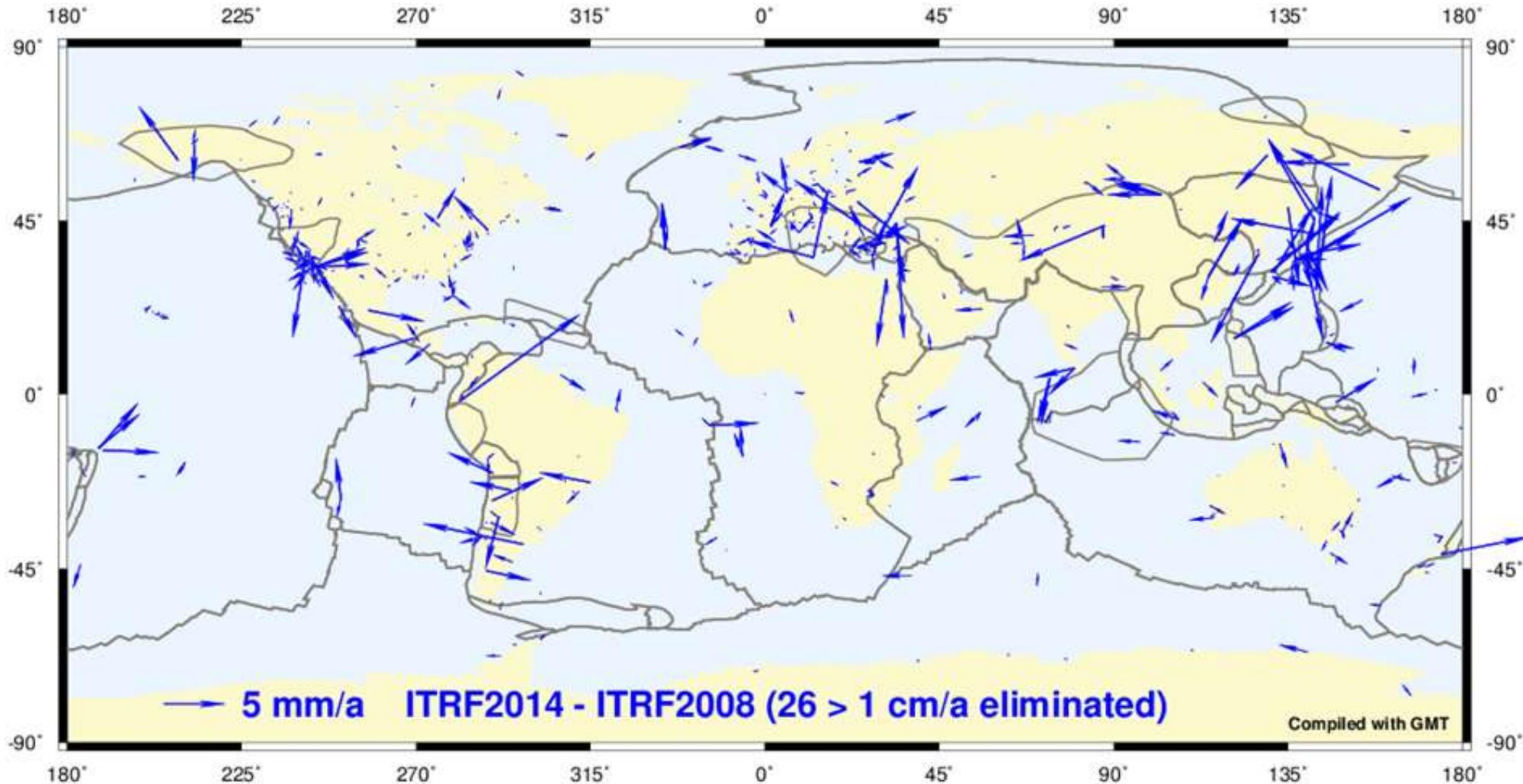
La variación de las velocidades en el tiempo se ve también en los ITRF consecutivos.



*Diferencias de velocidades  
ITRF2008 – ITRF2005  
(comparación de las últimas “soluciones”  
(no incluye valores atípicos > 1 cm/a)*

# Variación de velocidades en el tiempo

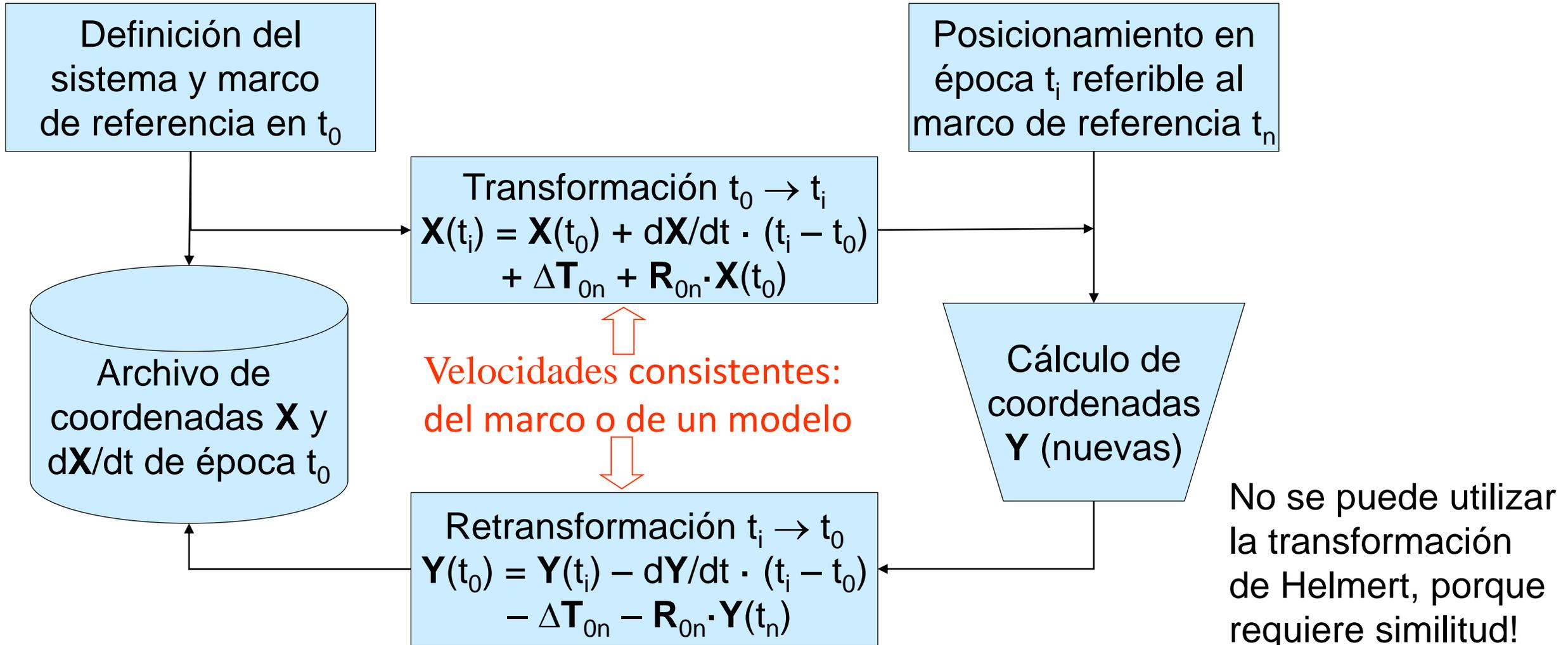
La variación de las velocidades en el tiempo se ve también en los ITRF consecutivos.



*Diferencias de velocidades  
ITRF2014 – ITRF2008  
(comparación de las últimas “soluciones”  
(no incluye valores atípicos > 1 cm/a)*

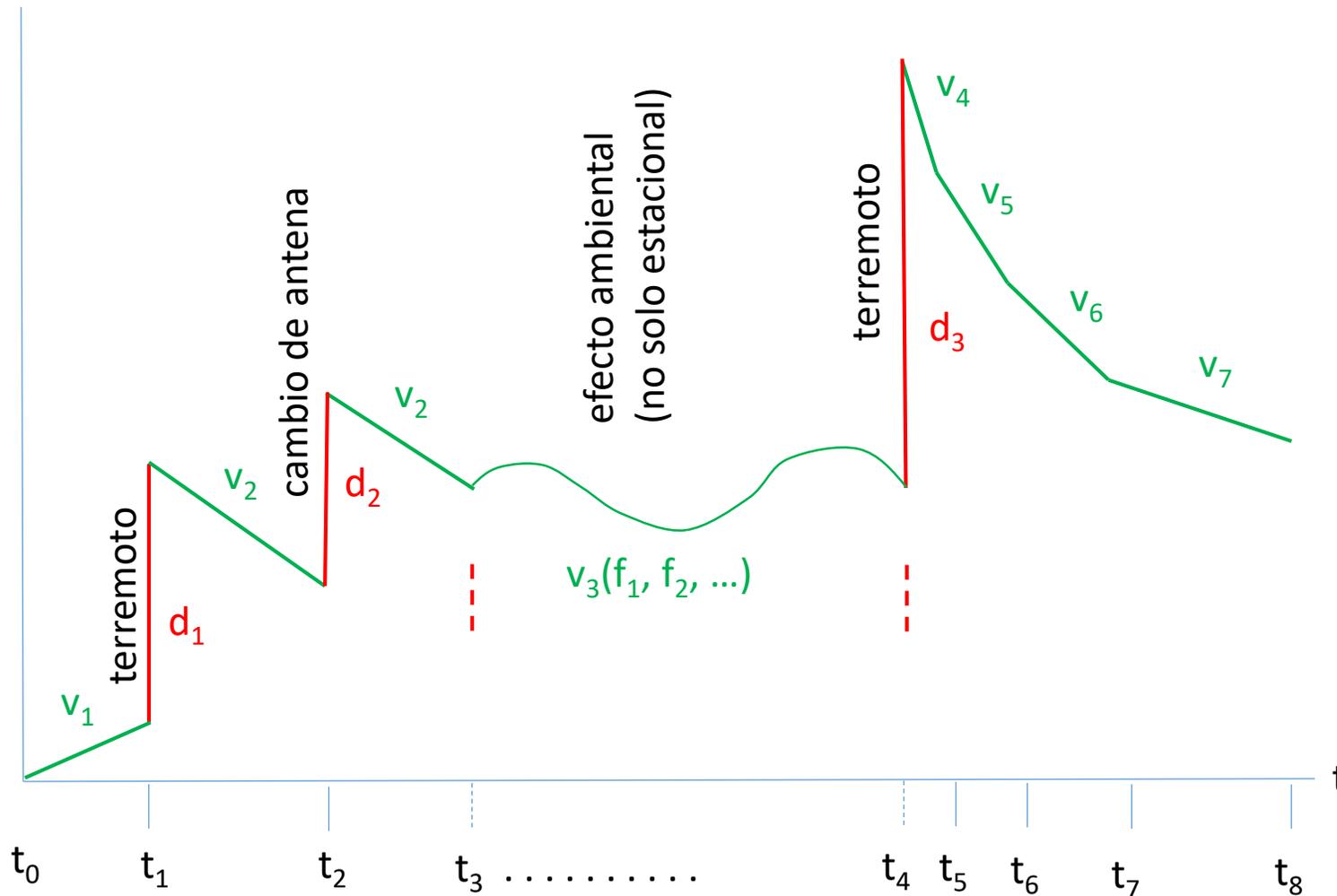
# Aplicación: transformación de coordenadas de un punto a una fecha arbitraria

Las coordenadas de una estación se transforman con la posición y la velocidad dadas en el marco de referencia, para puntos nuevos hay usar un modelo de velocidades.



# Aplicación: transformación de coordenadas de un punto a una fecha arbitraria

El problema de la transformación son los desplazamientos y las velocidades variables.



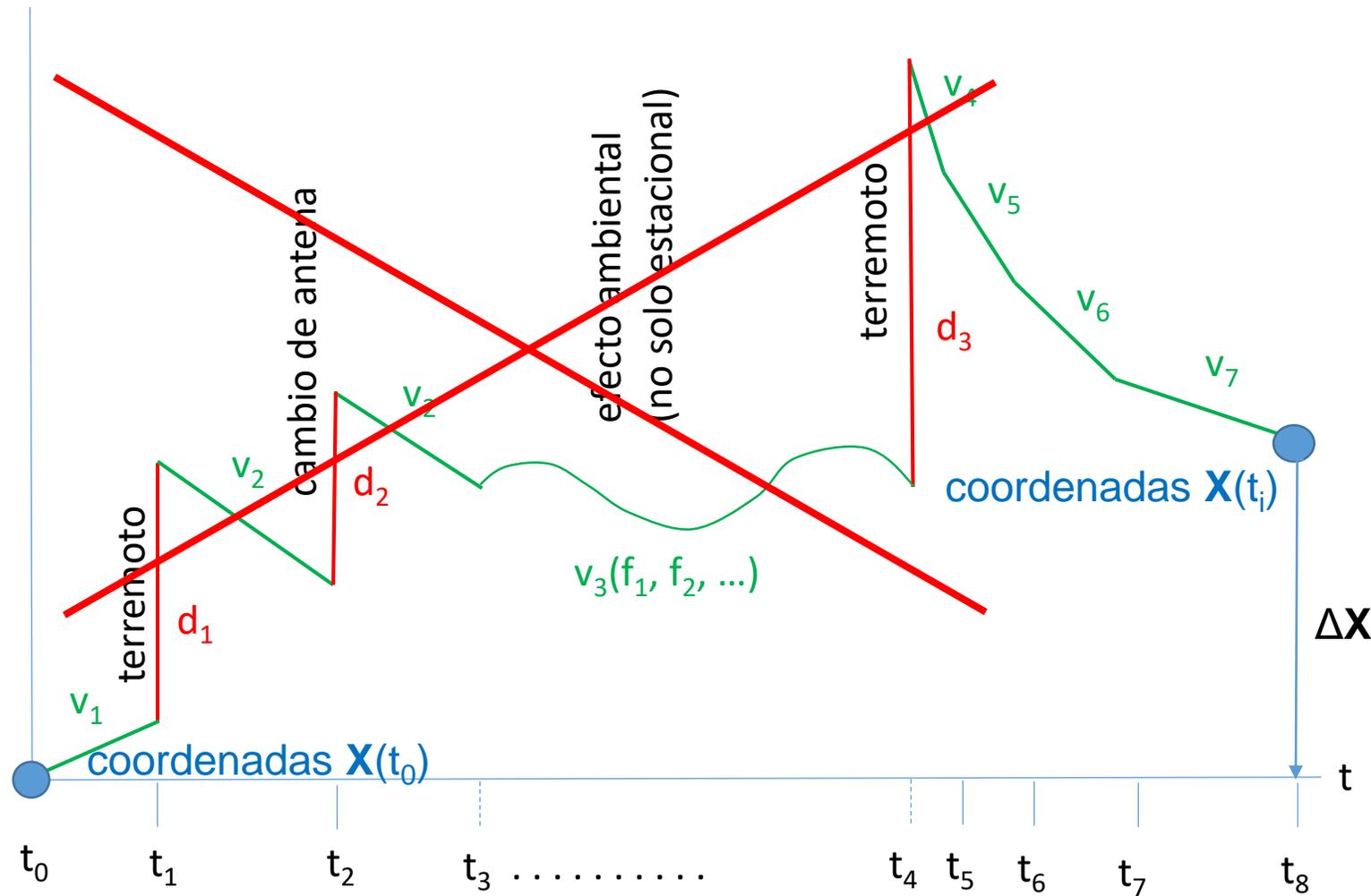
En este caso es necesario inter- o extrapolar, consecutivamente, con diferentes desplazamientos o saltos ( $d$ ) y velocidades ( $v$ ) variables en el tiempo.

Si se instala una estación nueva y se quiere transformar las coordenadas actuales al sistema de referencia (nacional) hay que seguir el mismo procedimiento, pero al revés.

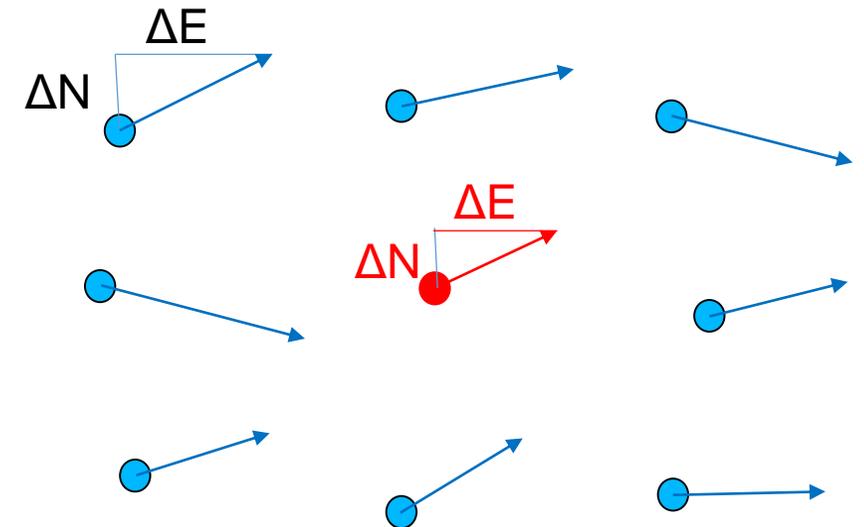
Esto es muy complicado!

# Alternativa: transformación de coordenadas de un punto a una fecha arbitraria

En vez de las velocidades variables se puede usar las diferencias de las coordenadas.

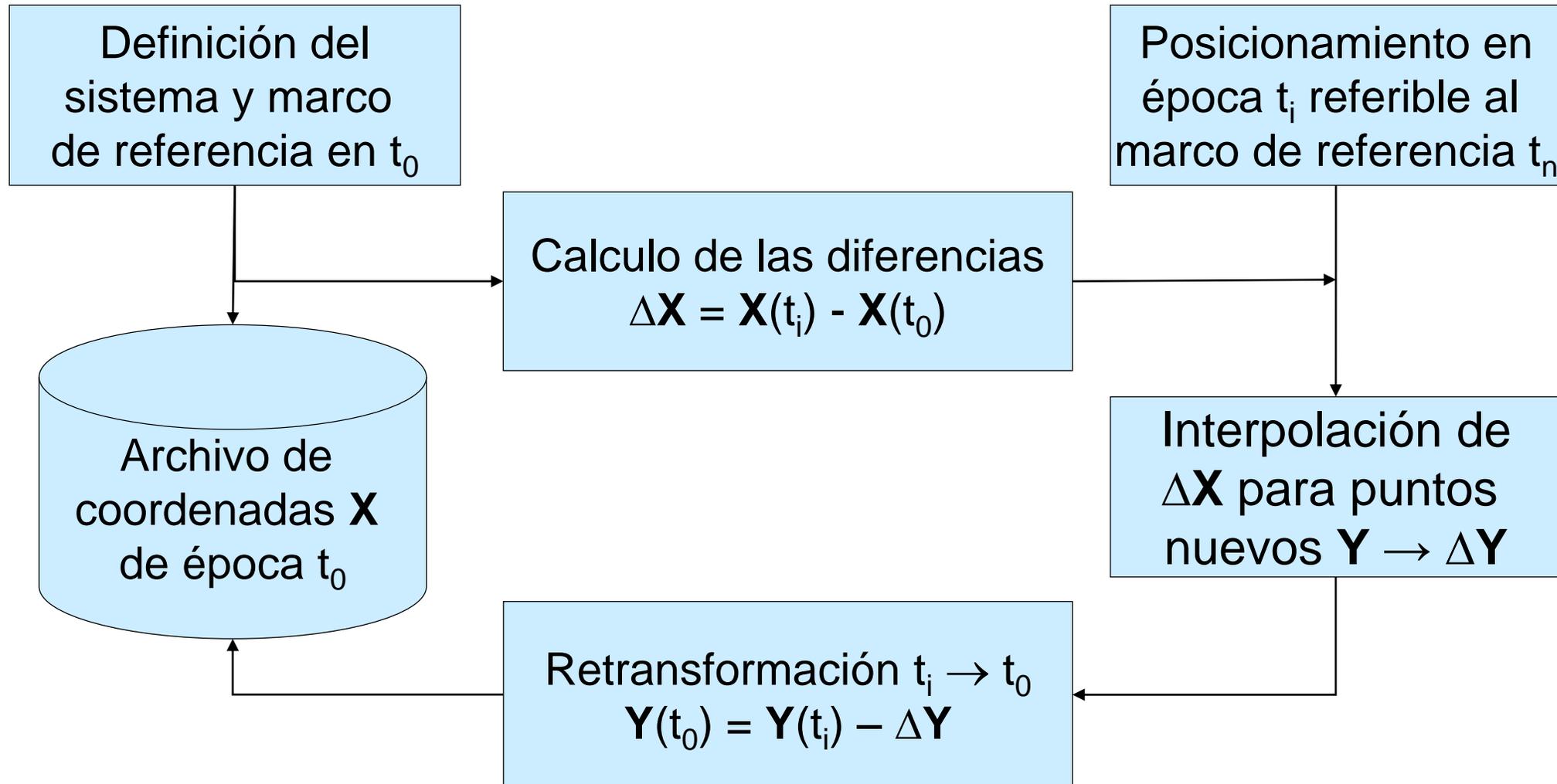


Se conocen las coordenadas del marco de referencia  $X(t_0)$  y  $X(t_i)$ , siendo la diferencia  $\Delta X$ . Para puntos nuevos ( $P_n$ ) se interpolan las  $\Delta X$  entre los puntos del marco de referencia.



# Transformación en la práctica

La transformación es, matemáticamente, simple. Un problema presenta la realización.



## Realización en la práctica

Para la realización del marco de referencia en la época actual se pueden utilizar las soluciones semanales del IGS (global) o de SIRGAS (regional).

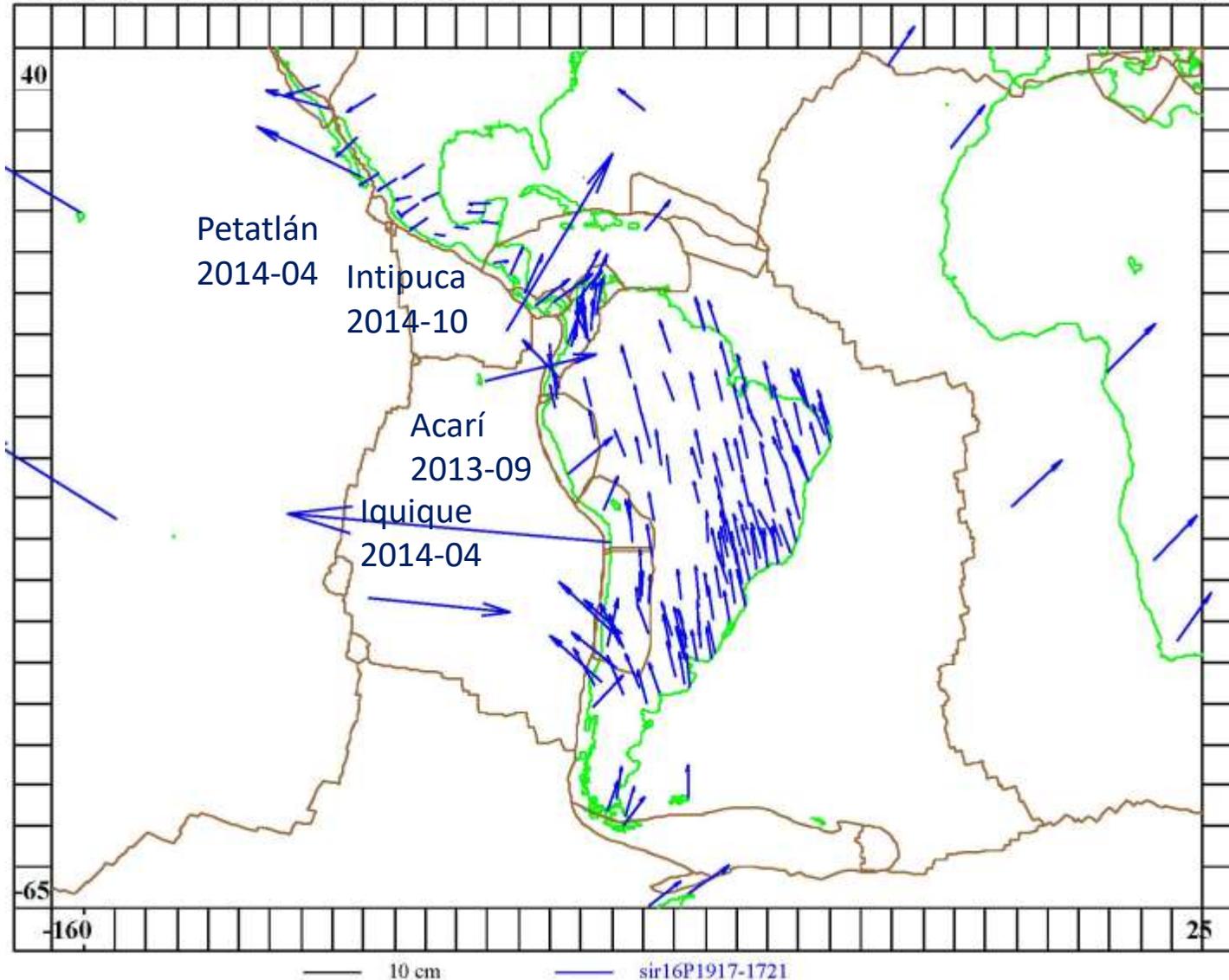
La interpolación de  $\Delta\mathbf{X}$  ( $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ) requiere suficientes estaciones del marco de referencia idénticas en la época de referencia y la época actual. Mientras que todas las estaciones del marco actual tienen velocidad, muchas estaciones nuevas no tienen coordenadas en la época de definición del marco de referencia (alrededor de 2000).

Por otra parte, las velocidades no siempre son representativas para el presente, y la época de referencia está varios años atrás (en ITRF2014 el 1 de enero de 2010). Un error de 5 mm/a está produciendo un error de 5 cm en las coordenadas extrapoladas.

En el año 2011 se estableció en SIRGAS un proyecto “Movimiento no lineal” MoNoLin. Este proyecto debía estudiar la factibilidad de transformar coordenadas actuales a un marco de referencia nacional sin velocidades constantes sino con otro modelo.

El mayor problema de este proyecto fue la falta de datos antiguos. Sin embargo, hubo algunos resultados prometedores.

# Resultado del proyecto MoNoLin



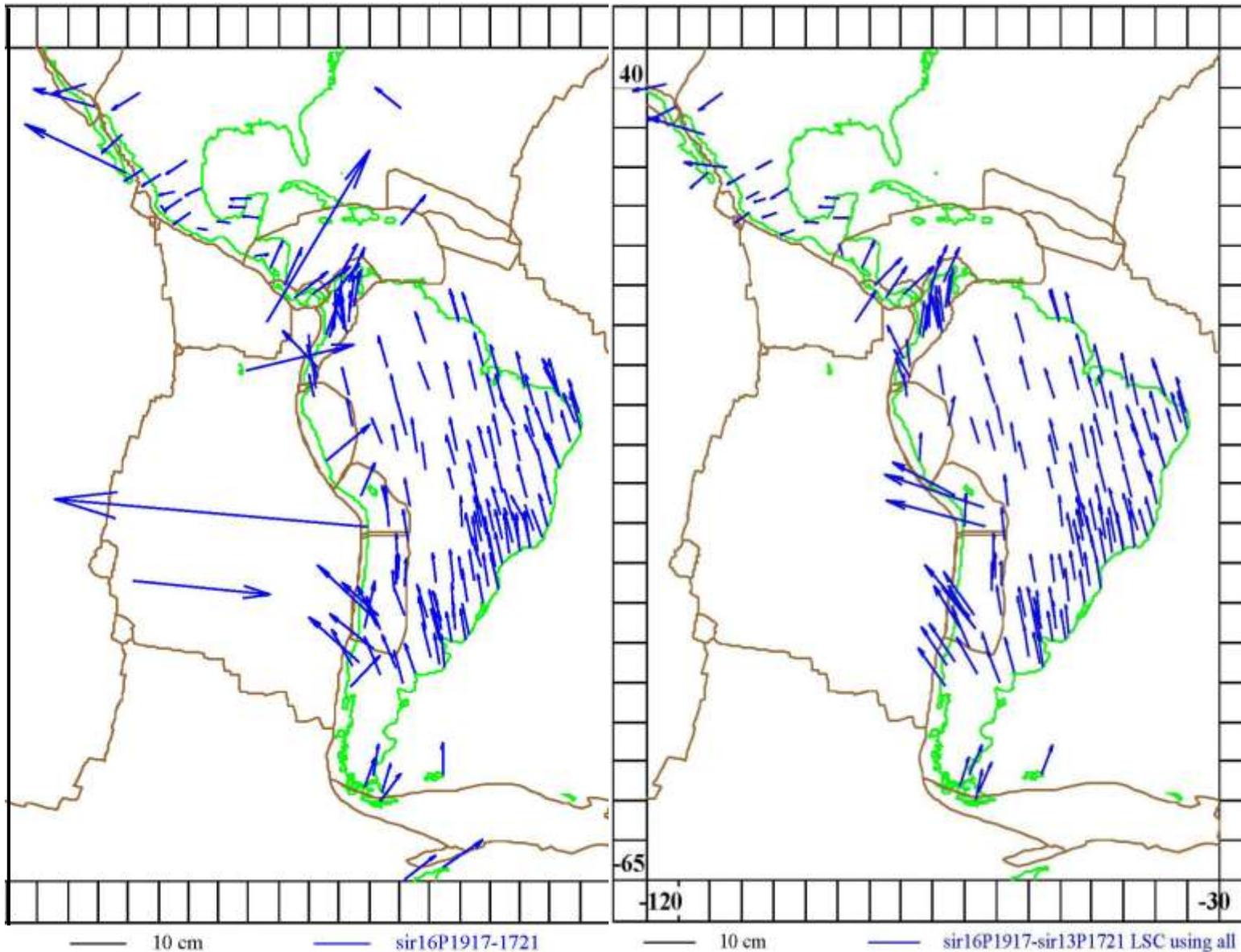
Datos del estudio:

Diferencias soluciones semanales  
sir16P1917 – sir13P1721.

Las diferencias no solo reflejan los movimientos de placas tectónicas sino también los desplazamientos por eventos sísmicos. Ejemplos son estaciones cercanas a cuatro epicentros de terremotos:

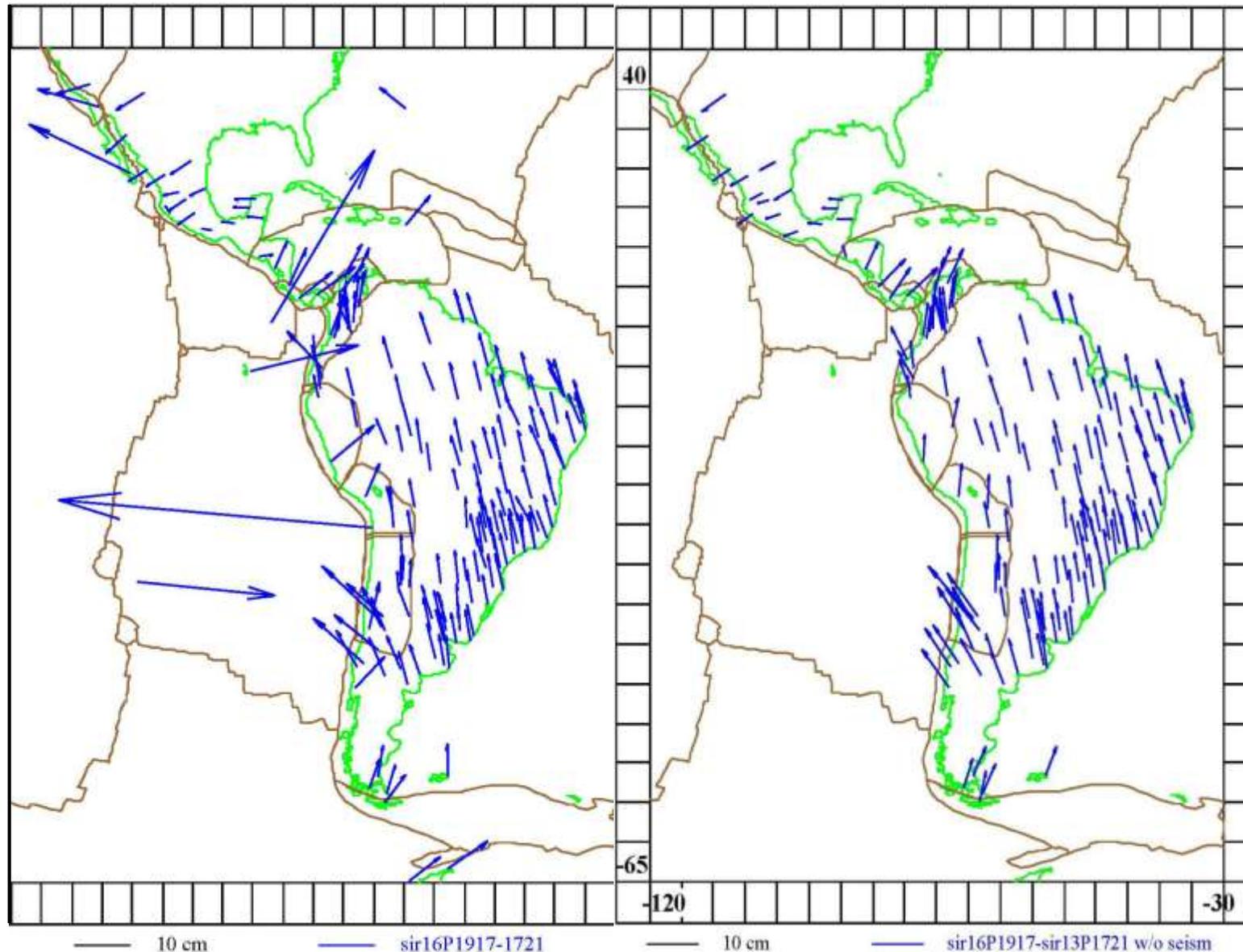
- Petatlán, MX, Mw = 7.2,
- Intipuca, SV, Mw = 7.3
- Acarí, PE, Mw = 7.1,
- Iquique, CL, Mw = 8.2,

# Resultado del proyecto MoNoLin



- Comparación  
sir16P1917 – sir13P1721
- izquierda: observado
  - derecha: interpolado por colocación usando todas las diferencias excepto las del punto de interpolación.

# Resultado del proyecto MoNoLin



## Comparación

sir16P1917 – sir13P1721

- izquierda: observado
- derecha: interpolado por colocación usando todas las diferencias excepto las del punto de interpolación y
  - MEXI, IPAZ (PCFC),
  - ISCO (COCO),
  - GLPS (NAZC),
  - IQQE (SOAM).

Hay que seleccionar muy bien las estaciones confiables para la interpolación.

## Conclusión

El modelado del movimiento de la superficie terrestre usando velocidades geodésicas con colocación por mínimos cuadrados da resultados excelentes para la representación e interpretación de deformaciones en y entre las placas tectónicas.

En aplicaciones prácticas debe tenerse especial cuidado con el uso de las velocidades constantes de los marcos de referencia porque no representan cambios eventuales en el tiempo.

Se debe continuar estudiando modelos para representar mejor el movimiento no lineal de las estaciones del marcos de referencia y puntos de posicionamiento nuevos.

**Muchas gracias por su atención!**