

Deformación de un segmento de la red vertical Chilena producto del Terremoto del 27 de febrero de 2010 basada en observaciones GPS y GRACE

Henry D. Montecino C.^{1,2}

S.R.C. de Freitas¹

J.C.S. Báez³

V.G. Ferreira⁴

henrymontecino@udec.cl

¹Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná - UFPR, Brasil

²Departamento de Cs. Geodésicas y Geomática
Universidad de Concepción - UdeC, Chile

³Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

⁴School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, China.

Simposio SIRGAS - Santo Domingo, 2015.

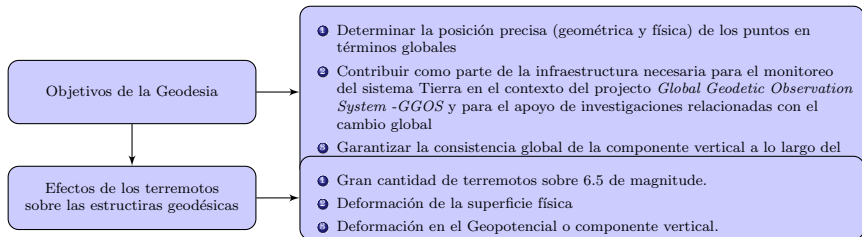


Motivación

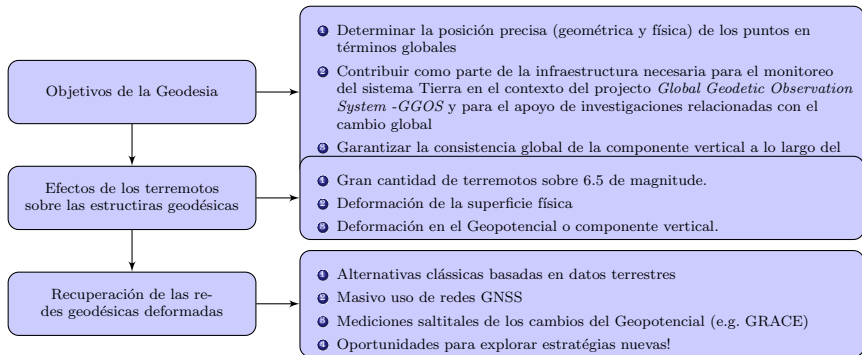
Objetivos de la Geodesia

- 1 Determinar la posición precisa (geométrica y física) de los puntos en términos globales
- 2 Contribuir como parte de la infraestructura necesaria para el monitoreo del sistema Tierra en el contexto del proyecto *Global Geodetic Observation System - GGOS* y para el apoyo de investigaciones relacionadas con el cambio global
- 3 Garantizar la consistencia global de la componente vertical a lo largo del tiempo

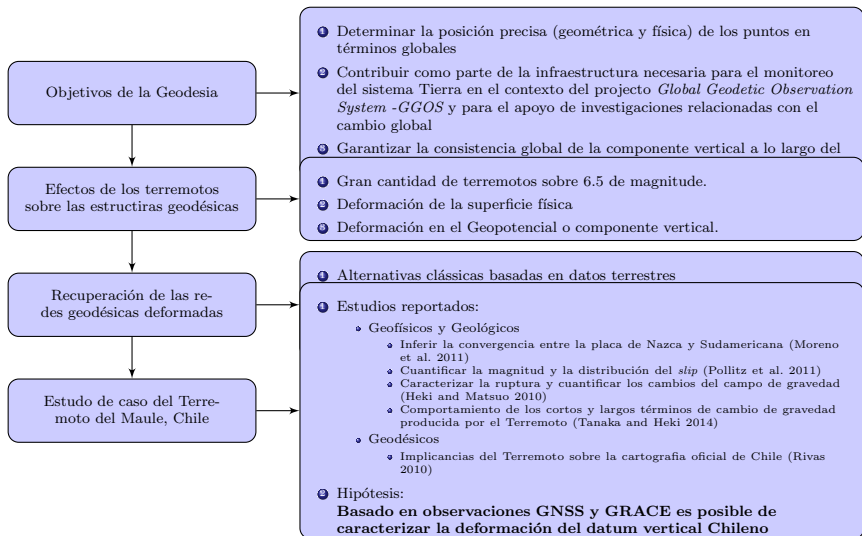
Motivación



Motivación

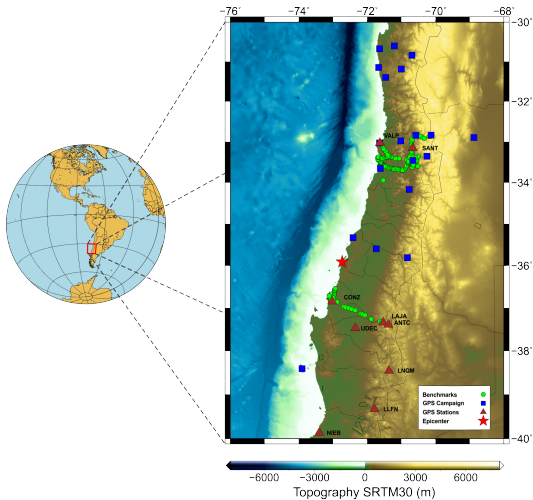


Motivación



Región de estudio

El estudio fue desarrollado en la región comprendida entre las coordenadas $-40^{\circ} < \varphi < -30^{\circ}$ y $-76^{\circ} < \lambda < -68^{\circ}$.



Observaciones GPS

- 10 Estaciones GPS de monitoreo continuo (aprox. 2008 até 2014)
- 28 Estaciones GPS de campañas (obs. min. 24 hrs)
- Procesamiento con software Bernese 5.0
- Fueron usadas las estrategias de procesamiento de acuerdo al estado del arte en GNSS
- Soluciones diarias en ITRF 2008
- Filtrado de las soluciones diarias para soluciones mensuales

Observaciones de GRACE

- Soluciones mensuales GRACE de Abril de 2002 a Junio de 2014, correspondientes a 136 soluciones mensuales de coeficientes esféricos harmónicos RL05 (nivel 2).
- Coeficientes esféricos harmónicos desarrollados hasta el grado y orden 60
- Centros de procesamiento: *GeoForschungsZentrum-GFZ*, *Jet Propulsion Laboratory-JPL*, y el *Center for Space Research of the University of Texas at Austin-CSR*.

Los coeficientes del JPL $C_{2,0}$, $C_{2,1}$ y $C_{2,2}$ fueron obtenidos a partir de SLR.

Modelo hidrológico y rebote post-glacial

- Modelaje de efectos hidrológicos

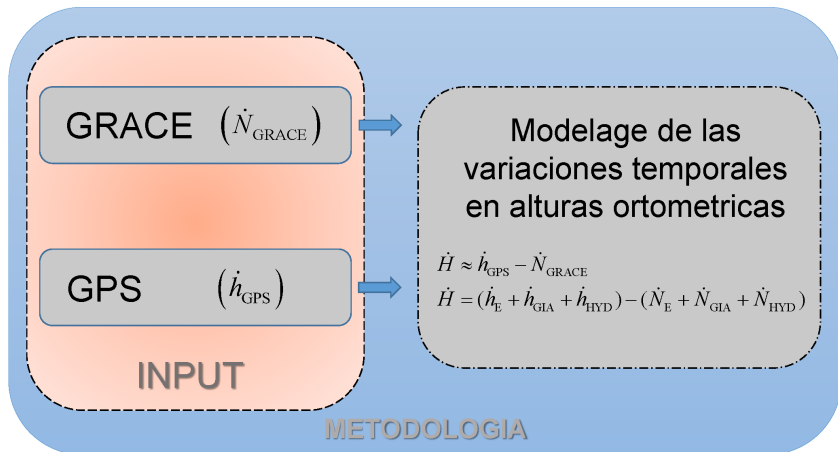
Por lo menos dos posibilidades pueden ser exploradas:

- Basado en un modelo hidrológico (e.g. *Global Land Data Assimilation System - GLDAS*)
- Basado en un modelo matemático armónico de componentes anuales y semi-anuales.

Esta última estrategia fue aplicada en nuestro estudio.

- Modelo de Rebote post-glacial Geruo et al. (2013)

- Glacial Isostatic Adjustment as GEOID Height Variation Rate
- Glacial Isostatic Adjustment as Uplift Rate
- Institución: JPL
- Units: mm/yr
- Sensor: GRACE
- Filter: Gaussian, radius: 200km
- Filter Max Degree:60



Soluciones temporales GRACE

Soluciones temporales del
campo de gravedad GRACE
(*JPL, GFZ, CSR*)

Variaciones del Geopotential en coeficientes armónicos
esféricos (*Spherical Harmonic Coefficients - SHC*) usado:

- Jan 2002 to Dec 2014
- Resolución espectral: 60
- Resolución temporal: 30 días

Soluciones temporales GRACE

Soluciones temporales del
campo de gravedad GRACE
(JPL, GFZ, CSR)

Residuales ($\delta\bar{C}_{nm}$, $\delta\bar{S}_{nm}$)

Variaciones del Geopotential en coeficientes armónicos
esféricos (*Spherical Harmonic Coefficients - SHC*) usado:

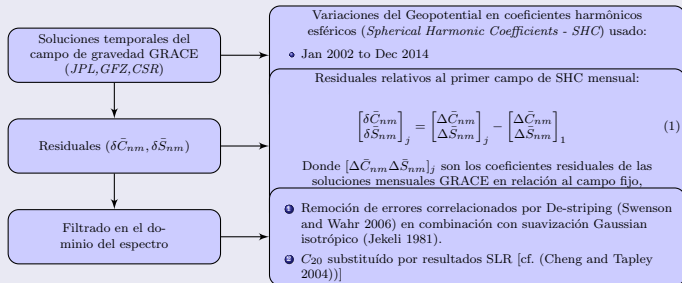
- Jan 2002 to Dec 2014

Residuales relativos al primer campo de SHC mensual:

$$\begin{bmatrix} \delta\bar{C}_{nm} \\ \delta\bar{S}_{nm} \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} \Delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} \Delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} \end{bmatrix}_1 \quad (1)$$

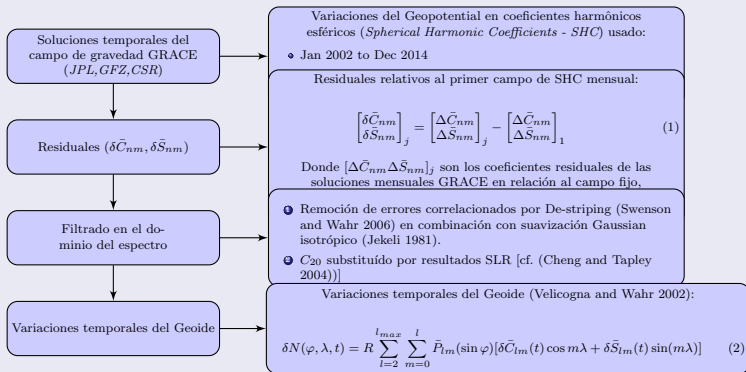
Donde $[\Delta\bar{C}_{nm}\Delta\bar{S}_{nm}]_j$ son los coeficientes residuales de las
soluciones mensuales GRACE en relación al campo fijo,
 $[\Delta\bar{C}_{nm}\Delta\bar{S}_{nm}]_j$ es la solución mensual de GRACE para el mes
 j , y $[\Delta\bar{C}_{nm}\Delta\bar{S}_{nm}]_1$ es el campo armónico fijo (primer mes).

Soluciones temporales GRACE



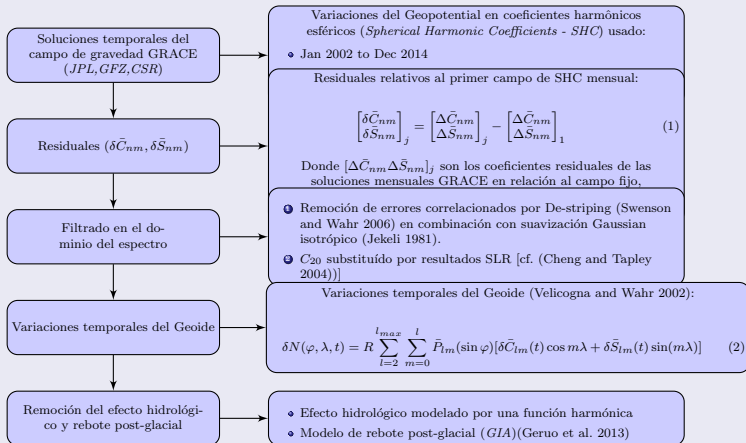
Métodos

Soluciones temporales GRACE



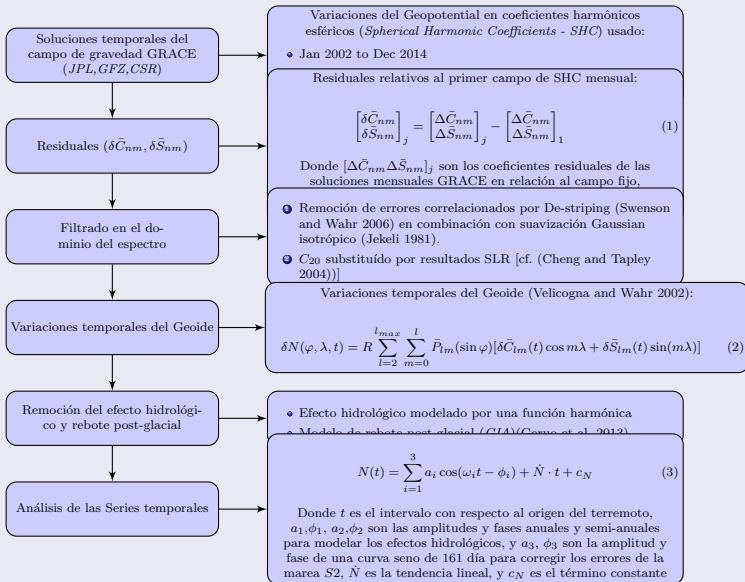
Métodos

Soluciones temporales GRACE



Métodos

Soluciones temporales GRACE



Soluciones temporales GPS

Soluciones diarias GPS

- ◆ Estaciones regionales
- ◆ Estaciones fiduciales

Soluciones temporales GPS

Soluciones diarias GPS

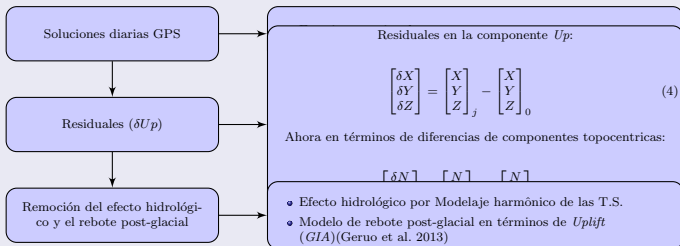
Residuales (δU_p)Residuales en la componente U_p :

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 \quad (4)$$

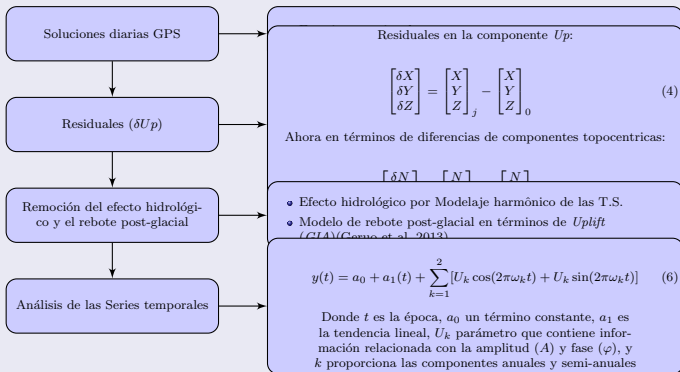
Ahora en términos de diferencias de componentes topocentricas:

$$\begin{bmatrix} \delta N \\ \delta E \\ \delta U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ E \\ U_p \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} N \\ E \\ U_p \end{bmatrix}_0 \quad (5)$$

Soluciones temporales GPS



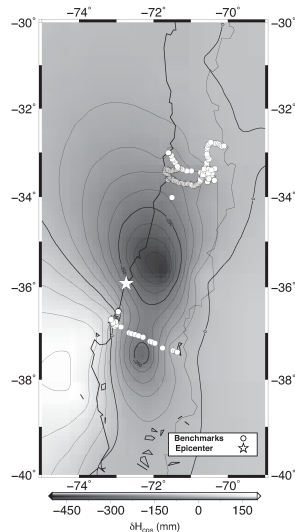
Soluciones temporales GPS



co-seismic jump

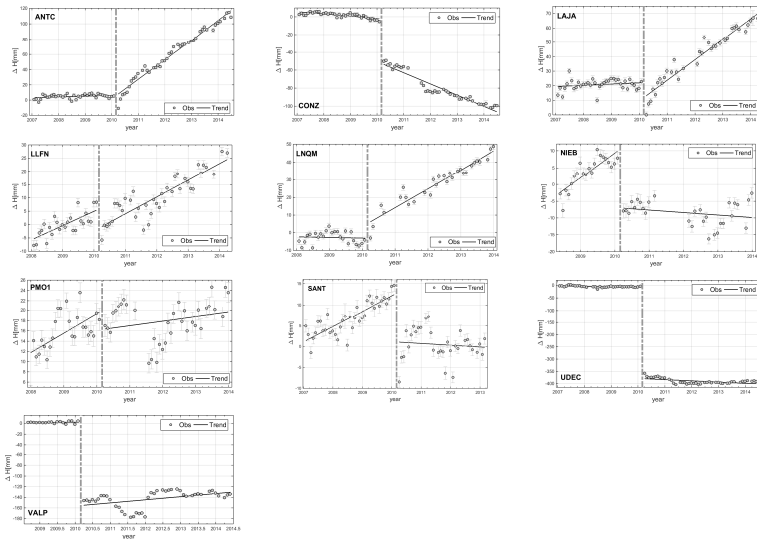
Estimación del efecto co-sismico en mm

Station	δh_{cos}	δN_{cos}	δH_{cos}
ANTC	-2.4	-0.14	-2.3
CONZ	-51.4	-0.11	-51.3
LAJA	-13.0	-0.09	-12.9
LLFN	-5.6	-0.01	-5.6
LNQM	1.6	-0.05	1.6
NIEB	-15.9	0.00	-15.9
PMO1	-6.1	0.06	-6.2
SANT	-11.0	-0.13	-10.9
UDEC	-373.0	-0.09	-372.9
VALP	-157.5	-0.13	-157.4



$$\Delta H_{cos} = c_a^H - c_b^H$$

Altitudes ortométricas Antes y después del Terremoto



$$\delta_{pos}^j = (\delta h^j - GIA_{\delta h}^j) - (\delta N^j - GIA_{\delta N}^j)$$

Tendencias de la altura ortométrica antes y después del Terremoto

Stn	a_1^{antes}	$a_1^{despues}$	Stn.	a_1^{antes}	$a_1^{despues}$
ANTC	2.3	24.9	NIEB	5.3	-1.19
CONZ	-1.5	-12.9	PMO1	6.2	0.93
LAJA	2.6	14.0	SANT	4.3	-1.5
LLFN	4.3	6.2	UDEC	-0.9	-5.4
LNQM	2.8	11.8	VALP	0.8	5.4

Ventajas y desventajas de la estrategia propuesta

- Bajo costo
- Soluciones libremente disponibles
- Análisis en barradura (GRACE)
- Largas series temporales
- Marco de referencia global(e.g. ITRF)
- Resolución espacial y temporal
- Costo de las observaciones GPS
- estrategias de procesamiento GRACE
- Interpolación de las variaciones de altura elipsoidal
- Remoción de diferentes señales en las observaciones de GRACE y GNSS

Conclusión

- La estimación de la deformación provocada por el Terremoto del Maule de 2010 sobre el sistema de alturas Chileno fue realizada a partir de una estrategia indirecta basada en datos GPS y GRACE.
- El terremoto generó en la mayoría de las estaciones estudiadas una subsidencia co-sísmica importante a ser considerada en la actualización de las alturas asociadas a los segmentos de la red localizados en las cercanías de la región de estudio
- Después del terremoto, las estaciones aumentaron en ritmo de cambio sustancialmente, pero mantuvieron el sentido de la tendencia
- Los efectos co y post sísmicos mostraron características de ruptura predominantes en dirección Este-Oeste en las proximidades al epicentro
- Se observó que la mayor parte de la deformación es recuperada desde las variaciones experimentadas en las alturas elipsoidales obtenidas de GPS.
- Sin embargo, las variaciones experimentadas sobre el geoides deben ser consideradas en largos periodos e.g. 15 años con propósitos de alcanzar los requerimientos de mantención de una red geodésica vertical moderna ($\pm 3\text{cm}$).

Perspectivas futuras

- Aun se están probando funciones para modelar los efectos co y post-sismicos, este último asociado a un periodo de relajación (τ).

$$H(t, t_0) = \sum_{k=1}^3 A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k) + a_0 \left\{ \begin{array}{l} a_1 t, t < t_0 \\ a_2 (1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}), t > t_0 \end{array} \right\}$$

- Se recomienda testear nuestra metodología a partir de re-nivelación en la región de estudio.
- Un modelaje más riguroso de la carga hidrológica y del rebote post-glacial podría experimentar algunas variaciones en relación a la estimación presentada.
- La metodología presentada podría servir para la actualización de un sistema de alturas a partir de componentes lineales y periódicas, estas últimas principalmente en regiones donde la señal hidrológica es predominante.
- Los autores visualizan que en el futuro, un modelo digital de elevación regional (e.g. LIDAR) o global, podría contribuir en la recuperación de la deformación geométrica a partir de una red GPS condicionada.

Referencias I

- Cheng, M. and Tapley, B. D. (2004). Variations in the earth's oblateness during the past 28 years. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B9):n/a–n/a.
- Geruo, A., Wahr, J., and Zhong, S. (2013). Computations of the viscoelastic response of a 3-d compressible earth to surface loading: an application to glacial isostatic adjustment in antarctica and canada. 192(2):557–572.
- Heki, K. and Matsuo, K. (2010). Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in central chile from satellite gravimetry. *Geophysical Research Letters*, 37(24):n/a–n/a.
- Jekeli, C. (1981). Alternative methods to smooth the earth's gravity field. Technical Report 327, The Ohio State University.
- Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Bolte, J., Klotz, J., Echtler, H., Baez, J., Bataille, K., Chen, J., Bevis, M., Hase, H., and Oncken, O. (2011). Heterogeneous plate locking in the south - central chile subduction zone: Building up the next great earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(3 - 4):413 – 424.
- Pollitz, F. F., Brooks, B., Tong, X., Bevis, M. G., Foster, J. H., Bürgmann, R., Smalley, R., Vigny, C., Socquet, A., Ruegg, J.-C., Campos, J., Barrientos, S., Parra, H., Soto, J. C. B., Cimbaro, S., and Blanco, M. (2011). Coseismic slip distribution of the february 27, 2010 mw 8.8 maule, chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(9):n/a–n/a.

Referencias II

- Rivas, L. (2010). Consecuencias del terremoto del 27 de febrero de 2010 en la red geodésica nacional y la cartografía. *Memorial del Ejército de Chile, D. comunicacional del ejército*, 485:136–149.
- Swenson, S. and Wahr, J. (2006). Post-processing removal of correlated errors in grace data. *Geophysical Research Letters*, 33(8):n/a–n/a.
- Tanaka, Y. and Heki, K. (2014). Long- and short-term postseismic gravity changes of megathrust earthquakes from satellite gravimetry. *Geophysical Research Letters*, 41(15):5451–5456.
- Velicogna, I. and Wahr, J. (2002). Postglacial rebound and earth's viscosity structure from grace. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B12):ETG 17–1–ETG 17–12.

Agradecimientos

Gracias por su atención!
Obrigado pela atenção!

