

Tècniques de geodèsia espacial aplicades a l'estudi de la Terra

Antoni Rius i Jordan^{1,3}
Manuel Hernández-Pajares^{2,3}
José Miguel Juan Zornoza^{2,3}
Jaume Sanz i Subirana^{2,3}

¹ Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.
Unitat de Recerca CSIC
² Universitat Politècnica de Catalunya
³ Xarxa Temàtica de Geodèsia

Introducció

Es poden mesurar diferències de temps amb precisions i exactituds de l'ordre del picosegon, és a dir, el temps que necessita la llum per recórrer 0,3 mil·límetres. A conseqüència d'aquesta capacitat han aparegut diverses tècniques per estudiar la Terra des de noves perspectives. Com a exemple podem esmentar dues tècniques basades en les lleis de l'electromagnetisme: la radiointerferometria de llargues bases o VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) i el posicionament relatiu fent ús de la constel·lació de satèl·lits artificials GPS (*Global Positioning System*). En aquest article no considerarem altres possibilitats basades en l'ús d'instrumentació làser.

La qualitat de les mesures, amb errors de l'ordre dels mil·límetres, té implicacions: els models físics han de ser precisos, com a mínim, al mateix nivell. Els observables, diferències entre els temps d'arribada de senyals electromagnètics emesos per quàsars, en el cas de la VLBI, o per satèl·lits artificials, en el cas del GPS, contenen informació sobre:

1. la posició relativa de l'emissor i del receptor,
2. la distribució de matèria al llarg de la trajectòria del senyal, que altera la velocitat de propagació,
3. la distribució de masses, que produeix variacions a la geometria de l'espai i, com a conseqüència, altera la direcció, la velocitat i la propagació, i
4. els retards instrumentals.

Tots aquests efectes han de ser modelats o mesurats amb la precisió indicada d'1 mm, aproximadament, de manera que no es degradi l'alta qualitat de les observacions.

Aquest article pretén presentar resultats obtinguts en diverses àrees de les ciències de la Terra. Aplicacions a l'astronomia, l'astrometria i la relativitat poden trobar-se, per exemple, a THOMSON *et al.* (1986). Aplicacions a l'estudi de la troposfera es poden trobar a BEVIS *et al.* (1992) i a la ionosfera a SARDÓN *et al.* (1994).

Elements observacionals bàsics

VLBI

Les radiofonts que s'observen són quàsars que no presenten estructura angular apreciable. Aquesta condició és necessària: una font puntual (una "delta de Dirac") produeix ones planes després de travessar grans distàncies. Per tant, és possible mesurar la diferència d'arribada d'un front d'ona a dues antenes diferents i interpretar aquesta mesura directament com la projecció del vector posició relativa en la direcció de la radiofont. Per contra, una font amb estructura produeix perturbacions a les ones i complica el procés de determinació de la diferència de temps d'arribada. La intensitat d'aquests quàsars ha de ser suficient perquè es puguin detectar amb antenes de diàmetres de l'ordre de vint metres. Antenes més grans es deformen en variar la seva temperatura i la seva orientació.

GPS

En aquest cas, s'observen satèl·lits artificials de la constel·lació GPS (uns 24) que emeten senyals prou intensos perquè puguin ser detectats amb antenes d'uns pocs centímetres de diàmetre.

La *taula 1* descriu algunes característiques de les radiofonts observades.

La *taula 2* presenta una comparació entre algunes de les característiques de la instrumentació necessària per a cada cas.

La comparació dels requeriments instrumentals suggereix una diferència important en el cost de la instrumentació i, com a conseqüència, la potencialitat que presenta la densificació de receptors GPS per tota la Terra i a bord de satèl·lits artificials. (Es preveu que gran part dels futurs satèl·lits de comunicacions portaran receptors GPS).

Geodinàmica

Moviments horitzontals

La superfície de la Terra està dividida en una catorzena, aproximadament, de plaques tectòniques, que presenten movi-

Radiofonts observades	VLBI	GPS
Radiofonts	quàsars	satèl·lits GPS
Nombre aproximat	60	24
Espectre EM	2,3 i 8,4 Ghz	1,2 i 1,6 Ghz
Estructura del senyal	soroll	senyal modulad
Moviment propi	no detectat	òrbites geocèntriques

Característiques	VLBI	GPS
Diàmetre de l'antena	20-40 m	pocs centímetres
Moviments d'antena	sí	no
Receptors	TWM, FET, HEMT	receptors GPS
Observables/temps	56 Mbits/segon	1 Mbit/dia

Taula 1. Característiques de les radiofonts observades

Taula 2. Comparació d'instrumentació VLBI i GPS

ments relatius de l'ordre del centímetre per any (vegeu, per a detalls, STEIN 1994). A la figura 1 es representen les fronteres entre aquestes plaques (línies vermelles) juntament amb regions on la litosfera es deforma com a resultat d'aquest moviment (zones grogues).

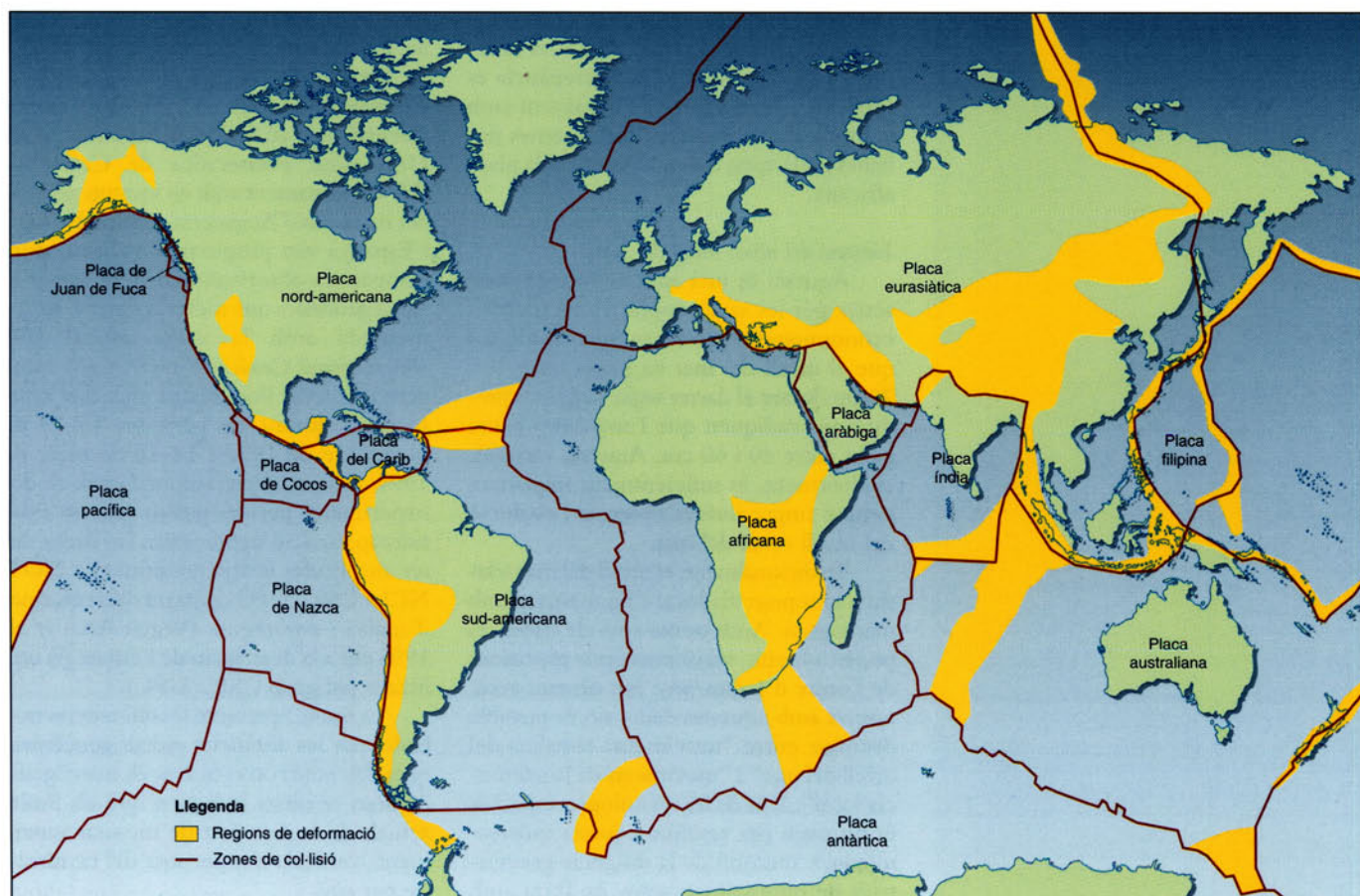
A la figura 2 es representa el model cinemàtic anomenat NUVEL-1, que descriu el moviment de les diverses plaques. Les fletxes amb dues punxes representen les velocitats de separació entre plaques divergents, i les d'una punxa representen velocitats de subducció. Aquests resultats s'obtenen combinant observacions de les anomalies magnètiques dels fons oceànics, les direccions de les falles transfor-

mants i els vectors de desplaçament en terratrèmols localitzats a les fronteres entre les plaques.

Totes aquestes dades permeten obtenir un model global que representa l'activitat mitjana durant els darrers milions d'anys. La distribució de dades geològiques no és uniforme, per això els models geològics no són uniformement acurats. Per exemple, la interacció de la placa africana i l'euroasiàtica no conté dades d'anomalies magnètiques, i les estimacions es recolzen principalment en dades obtingudes a altres fronteres.

A la figura 3 (RYAN *et al.* 1994 i ZARRAOA *et al.* 1994) es representen les velocitats de les estacions europees deter-

Figura 1: Representació de les fronteres de les plaques tectòniques (línies vermelles) juntament amb regions on la litosfera es deforma com a resultat d'aquest moviment (zones grogues)



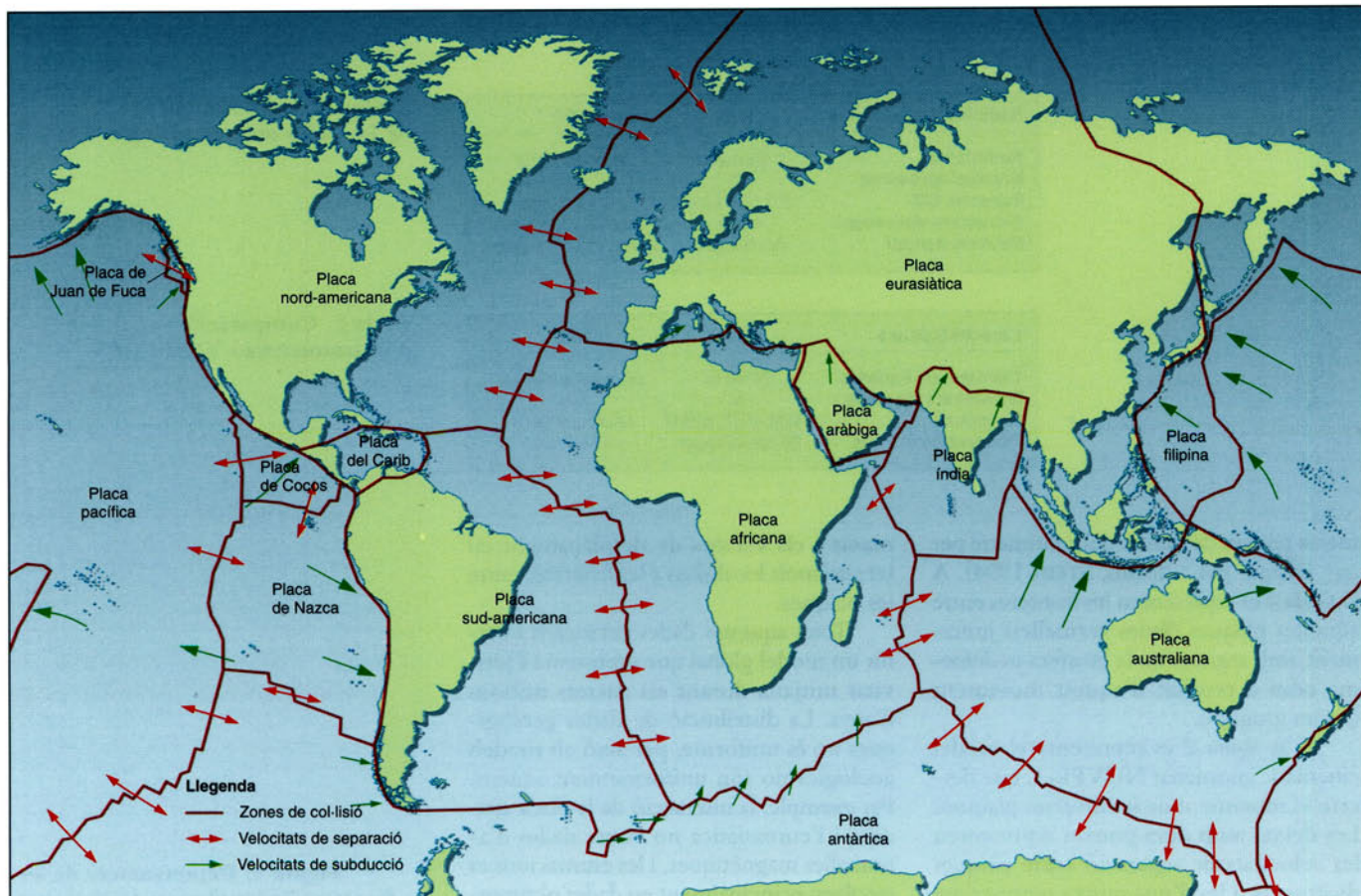


Figura 2: Model cinemàtic anomenat NUVEL-1. Descriu el moviment de les diverses plaques

minades a través del models geològics, assumint que les antenes estan a la placa euroasiàtica (vectors sense el·lipse d'error), i els resultats d'experiments amb la VLBI (vectors amb el·lipse d'error). Per a les antenes de Noto i Matera la discrepància és superior a l'error formal i consistent amb la hipòtesi que aquestes dues antenes italianes participen del moviment de la placa africana.

Variació del nivell mitjà del mar

Aquesta és una àrea de recerca molt activa per les seves implicacions socials i econòmiques. Algunes mesures indiquen que el nivell del mar ha pujat entre 10 i 20 cm durant el darrer segle, i algunes prediccions indiquen que l'any 2100 haurà pujat entre 40 i 60 cm. Aquesta variació, evidentment, és suficientment important perquè tingui interès observar l'evolució del nivell mitjà del mar.

Tradicionalment, el nivell del mar relatiu a la topografia local s'ha mesurat amb mareògrafs. Amb trenta anys de dades, es poden obtenir variacions amb precisions de l'ordre d'1 mm/any. No obstant això, només amb aquestes dades no és possible distingir entre "moviments absoluts del nivell del mar" i "moviments de la referència local". L'ús de les tecnologies espacials és un camí per resoldre aquesta indeterminació: mesures de la distància geocèntrica de punts situats sobre la Terra amb

precisions absolutes per sota del centímetre o relatives de l'ordre de 10^{-9} .

Per demostrar aquesta capacitat, un consorci format per grups de recerca de les universitats de Nottingham (NOT) i de Newcastle (NCL), d'Anglaterra, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) d'Espanya i la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), juntament amb els instituts geogràfics nacionals d'Anglaterra, França, Portugal i Espanya van proposar, i realitzar, dues campanyes observacionals fent servir la xarxa geodèsica que indica la figura 4, suplementada amb la xarxa global IGS (*International Geodetic Service*). Cada campanya va tenir lloc durant cinc dies consecutius durant els períodes 15-19 de novembre de 1993 i 14-18 de març de 1994. La proximitat temporal entre els dos experiments permet pensar que no existirà cap variació significativa. Les dades van ser analitzades independentment a NOT, NCL i CSIC/UPC utilitzant diferents eines d'anàlisi i estratègies. (Vegeu RIUS *et al.* 1995 per a la descripció de l'estratègia utilitzada pel grup CSIC/UPC).

La figura 5 presenta les diferències trobades per les distàncies radials geocèntriques dels punts on es troben els mareògrafs. Aquests resultats indiquen que els límits actuals de la capacitat de mesurar moviments verticals són per sota del centímetre per any.



Conclusions

En aquest article hem revisat breument les implicacions que les noves tecnologies derivades de la recerca espacial tenen en l'estudi de moviments tectònics. La forma i les dimensions de la Terra es poden mesurar amb precisions i exactituds submil·limètriques. Això ha obert un camp nou en l'estudi de la Terra.

Agraïments

Aquest treball ha estat parcialment finançat pel Ministerio de Educación y Ciencia, projecte DGICYT PB93-1235.

Per a més informació

Per a més detalls es pot consultar: <http://www.ieec.fcr.es>

Figura 3: Representació de les velocitats de les estacions europees determinades a través de models geològics, assumint que les antenes estan a la placa euroasiàtica (vectors sense el-lipse d'error), i els resultats d'experiments amb la VLBI (vectors amb el-lipse d'error)

Figura 4: Xarxa geodèsica utilitzada en dues campanyes observacionals de l'evolució del nivell mitjà del mar

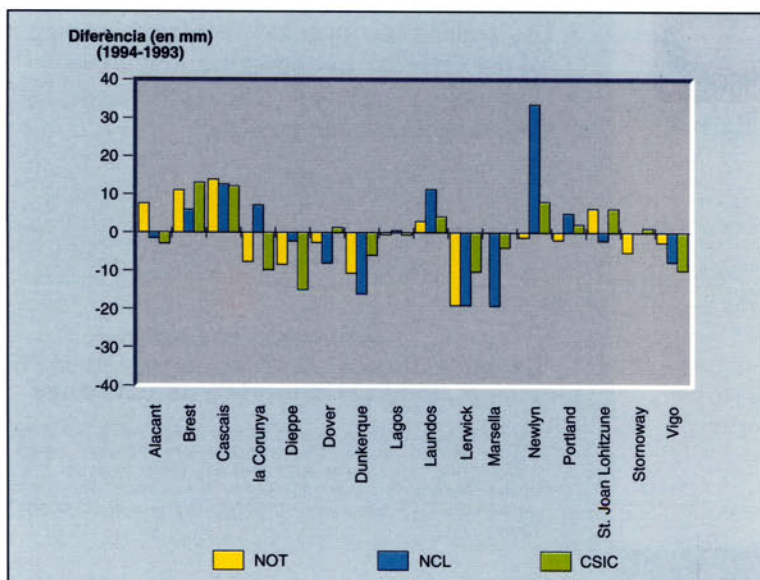


Figura 5: Diferències trobades per les distàncies radials geocèntriques dels punts on es troben els mareògrafs

Bibliografia

BEVIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T. A., ROCKEN, C., ANTHES, R. A. i WARE, R. H. 1992. "GPS Meteorology: Remote Sensing of Water Vapor using the Global Positioning System", a *Journal of Geophysical Research*, volum 97, núm. D14.

RIUS, A., JUAN, J. M., HERNÁNDEZ-PAJARES, M. i MADRIGAL, A. 1995. "Measuring geocentric radial coordinates with a non-fiducial GPS network", a *Bulletin Geodesique*, 69, 320-328.

RYAN, J. W., CLARK, T. A., MA, C., GORDON, D.,

CAPRETTE, D. S. i HIMWICH, W. E. 1994. "Global Scale Tectonic Plate Motions Measured with CDP VLBI Data", a *Geodynamic Series*, volum 23. American Geophysical Union. Washington DC.

SARDÓN, E., RIUS, A. i ZARRAOA, N. 1994. "Estimation of the Transmitter and Receiver Differential Biases and the Ionospheric Total Electron Content from Global Positioning Observations", a *Radio Science*, volum 29, núm. 3.

STEIN, S. 1994. "Space Geodesy and Plate Motions", a *Geodynamic Series*, volum 23. American Geophysical Union. Washington DC.

THOMSON, A. R., MORAN, J. M. i SWENSON, G. W. 1986. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Ed. Wiley InterScience.

ZARRAOA, N., RIUS, A., SARDÓN, E. i RYAN, J. W. 1994. "Relative Motions in Europe Studied with a Geodetic VLBI Network", a *Geophysical Journal International*, 117, núm. 3.



Exemplar

Mapes de Catalunya (segles XVII-XVIII)

1997

Generalitat de Catalunya
Departament de Política Territorial i Obres Públiques
Institut Cartogràfic de Catalunya

L'Institut Cartogràfic de Catalunya publica el

Calendari 1997

Mapes de Catalunya (segles XVII-XVIII)

- Reproducció de 13 mapes de Catalunya elaborats entre els segles XVII i XVIII.
- Les làmines són en color, de 39 x 49 cm, separables del full del calendari per poder-les emmarcar.
- L'original de cadascun d'aquests mapes es troba a la Cartoteca de Catalunya (ICC).



Generalitat de Catalunya
Departament de Política Territorial i Obres Públiques
Institut Cartogràfic de Catalunya

Parc de Montjuïc – Telèfon 34-3-425 29 00 – Telefax 426 74 42 – 08038 Barcelona
Balmes, 209-211 – Telèfon 34-3-218 87 58 – Telefax 218 89 59 – 08006 Barcelona
Emili Grahit, 10 A – Telèfon 34-72-20 04 93 – Telefax 20 04 93 – 17002 Girona
Doctor Fleming, 19 – Telèfon 34-73-27 47 76 – Telefax 27 47 76 – 25006 Lleida
Anselm Clavé, 1 – Telèfon 34-77-23 01 56 – Telefax 23 01 56 – 43004 Tarragona