

# Modelització de la ionosfera i la protonosfera a partir del sistema de posicionament global (GPS)

Fernando Vicario Arjona<sup>1</sup>  
Jaume Sanz i Subirana<sup>1,3</sup>  
Manuel Hernández-Pajares<sup>1,3</sup>  
José Miguel Juan Zornoza<sup>1,3</sup>  
Antoni Rius i Jordan<sup>2,3</sup>

1 Universitat Politècnica de Catalunya  
2 Consejo Superior de Investigaciones Científicas  
3 Xarxa Temàtica de Geodèsia

## Resum

Es presenta una estratègia basada en tècniques tomogràfiques i algorismes neuronals per a l'estimació global del contingut total d'electrons (*Total Electron Content*, TEC) a la ionosfera i la protonosfera a partir de dades GPS (*Global Positioning System*). L'aplicació numèrica del model s'ha dut a terme amb observacions procedents de 67 estacions permanents de la xarxa IGS (*International Geodetic Service*), distribuïdes per tot el planeta, corresponents al dia 24 de juny de 1995. S'ha obtingut un alt nivell de repetibilitat en les constants instrumentals dels satèl·lits i estacions, la qual cosa constitueix un bon indicador de la qualitat dels resultats obtinguts.

## Introducció

A mitjan anys 70 el Departament de Defensa dels EUA va projectar el llançament d'una constel·lació de satèl·lits amb l'objectiu bàsic de permetre un posicionament molt precís en temps real. Aquest sistema, concebut per a usos militars i amb un accés limitat a usuaris civils, ha donat lloc al que ara es coneix com el sistema de posicionament global.

D'una manera simplificada, es pot dir que la posició s'obté en resoldre un problema de triangulació on, conegudes les posicions dels satèl·lits i les seves distàncies a un receptor, es determina la posició d'aquest últim. La distància de cada satèl·lit al receptor es pot obtenir a partir del temps que tarda a propagar-se el senyal entre tots dos (mesures de pseudodistància) i/o també, a partir de la diferència de fase entre el senyal portador transmès pel satèl·lit i el generat per l'oscil·lador local a l'instant de la recepció. Aquestes mesures estan afectades per diversos errors, relatius a la pro-

pagació del senyal, l'instrumental, ..., que es tradueixen en errors en la determinació de la posició.

Una de les fonts principals d'error és l'atmosfera terrestre. Com és ben sabut, en la propagació dels senyals electromagnètics influeixen tant la troposfera com la ionosfera o la protonosfera, encara que de manera diferent: A la *troposfera* (0-70 km) la propagació dels senyals electromagnètics està afectada principalment per les condicions de pressió i temperatura—component sec, determinista i fàcil de modelar—i, en un grau més petit, pel vapor d'aigua—component humit, modelat com un procés estocàstic. A la *ionosfera* (70-1 000 km) l'efecte predominant és causat pels electrons lliures, essent més difícil de modelar i d'un ordre de magnitud superior al de la troposfera. La *protonosfera* (>1 000 km) és la capa més externa. La densitat d'electrons lliures és, aproximadament, dos ordres de magnitud inferior al de la ionosfera, encara que s'han de tenir en compte, ja que el camí que recorre el senyal electromagnètic està contingut, en la major part, en aquesta regió.

Per a freqüències més grans de 30 MHz (com és el cas de les freqüències de transmissió GPS) la ionosfera i la protonosfera introdueixen retards directament proporcionals al seu contingut total d'electrons lliures i inversament proporcionals al quadrat de la freqüència. El caràcter dispersiu d'aquests medis permet estimar els retards esmentats utilitzant dues freqüències diferents. Aquest és el tractament estàndard en GPS de precisió, malgrat que l'ús de dues freqüències encareix i complica la instrumentació.

En alguns casos, no obstant això, per l'equip utilitzat, o altres causes, no es pot

disposar de mesures per a dues freqüències. Llavors, cal recórrer a un model de distribució del TEC, prou precís per corregir aquests efectes. A continuació es presenta la manera de determinar aquest model.

### El model tomogràfic

A partir dels retards introduïts pel medi en les mesures de pseudodistància i fase dels senyals rebuts dels satèl·lits, es pretén estimar el TEC en la direcció radial per a la ionosfera i la protonosfera.

En termes precisos, es defineix el TEC entre dos punts com el nombre total d'electrons lliures continguts en una columna d'1 m<sup>2</sup> de secció que uneix aquests punts:

$$I_{rc}^{sat} = \int_{rc}^{sat} n(s) ds \quad (1)$$

on  $n(s)$  és la densitat electrònica.

Com ja s'ha esmentat, el retard ionosfèric—de signe positiu per a les mesures de pseudodistància i negatiu per a les de fase—es pot determinar a partir de mesures de pseudodistància i fase per a dues freqüències diferents (BLEWITT 1990). El valor que s'ha obtingut així du superposats els retards instrumentals del satèl·lit i l'estació a manera de constants additives  $k_{rc}$ ,  $k^{sat}$ :

$$(I_{rc}^{sat})_{obs} = I_{rc}^{sat} + k_{rc} + k^{sat} \quad (2)$$

Així, l'equació (1), juntament amb la relació (2), constitueix una equació integral que permet obtenir el TEC en la direcció d'observació, juntament amb els retards instrumentals esmentats.

El model tomogràfic que adoptem es basa en el fet de discretitzar l'equació (1) de la manera següent:

- 1) Es consideren  $n$  capes concèntriques (resolució vertical).
- 2) Cada capa es divideix en un nombre determinat de cel·les (resolució angular), no necessàriament el mateix, i s'assumeix que la densitat d'electrons és constant dins de cada cel·la.
- 3) Es descompon el TEC en la direcció d'observació en suma de les contribucions causades per les diferents cel·les travessades pel raig satèl·lit-receptor, d'acord amb l'equació (figura 1):

$$(I_{rc}^{sat})_{obs} = \sum_c T_{cl} \frac{s_{rc}^{sat}}{\Delta h_c} + k_{rc} + k^{sat} \quad (3)$$

on  $I_{rc}^{sat}$  és el TEC en la direcció d'observació,  $T_{cl}$  és el TEC vertical de la cel·la  $l$ -èsima de la capa  $c$ ,  $s_{rc}^{sat}$  és la porció de raig continguda en la cel·la  $l$ -èsima de la capa  $c$  i  $\Delta h_c$  és el gruix de la capa  $c$ .

En establir l'equació (3) per a cada parell satèl·lit-receptor del conjunt de satèl·lits i receptors disponibles, resulta un sistema d'equacions que, en resoldre per mínims quadrats, proporciona una estimació del TEC per a cada cel·la i dels retards instrumentals dels satèl·lits i estacions. Com que aquests retards són constants i només depenen del receptor o del satèl·lit, l'estudi de la repetibilitat de les seves estimacions per a diferents intervals de temps constitueix un test per determinar la qualitat dels resultats obtinguts.

### Implementació del model

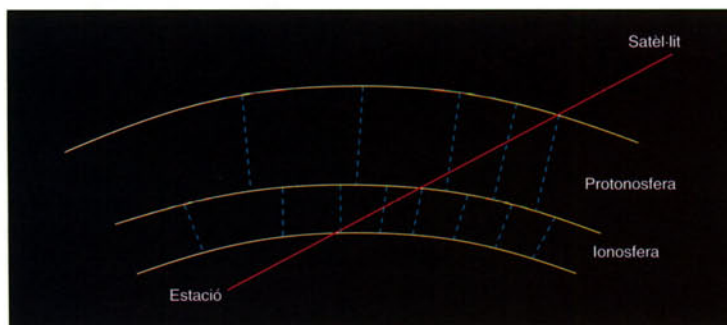
S'han processat dades de 67 estacions de la xarxa permanent IGS (ZUMBERGE *et al.* 1994) corresponents al dia 24 de juny de 1995 (figura 2).

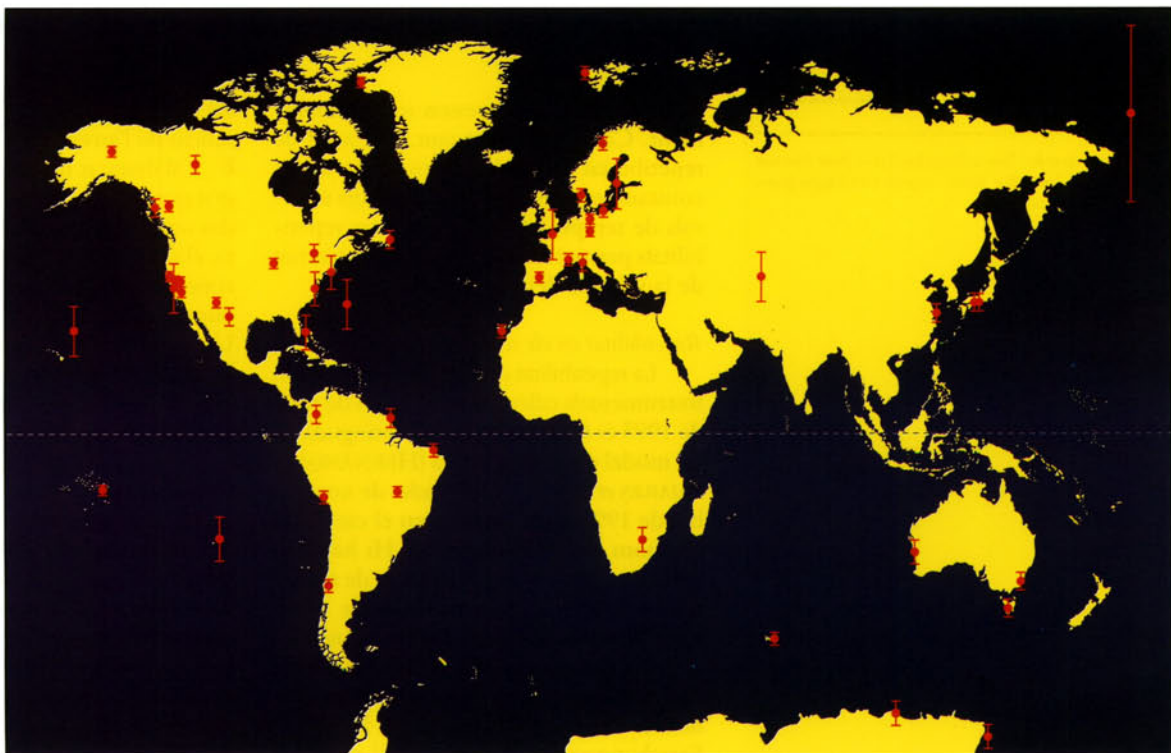
#### Especificacions inicials

Els criteris adoptats per al càlcul han estat els següents:

- a) Discretització—capes i cel·les—: s'ha adoptat un model de dues capes. La primera capa està compresa entre 75 i 625 km d'altura i la segona entre 625 i 5 000 km. Amb la introducció de la segona capa es pretèn separar els efectes causats per les regions altes de la ionosfera i la protonosfera dels pròpiament associats a la ionosfera. S'ha considerat un nombre de cel·les diferent per a les dues capes (900 per a la primera i 100 per a la segona) a causa del fet que el gradient de densitat d'electrons lliures és molt més gran a la primera capa que a la segona. Pel que fa a la reticulació de cada capa (*gridding*), s'ha optat per utilitzar cel·les de mida diferent i s'han adaptat de manera que totes siguin travessades, aproximadament, pel mateix nombre de raigs. Els inconvenients d'aquest mètode en contra de l'elecció d'una retícula regular són la major dificultat d'implementació i el cost computacional.

**Figura 1.** En aquesta anàlisi es descompon la ionosfera i la protonosfera en cel·les de mida adaptable a la distribució dels raigs, en els quals se suposa la densitat electrònica constant





Per a la construcció efectiva de la retícula s'ha utilitzat una xarxa neuronal de Kohonen-SOMA (*Self Organizing Map Algorithm*)— (vegeu KOHONEN 1990 i també MURTAGH i HERNÁNDEZ-PAJARES 1995). També s'ha obtingut un mapa topològic bidimensional de les cel·les.

- b) Elecció del dia: l'elecció del dia 24 de juny de 1995 obeeix als motius següents:
- 1) assegurar un nombre elevat d'estacions,
  - 2) *anti-spoofing*—degradació parcial del senyal— desactivat, i
  - 3) absència de tempestes geomagnètiques—d'acord amb els índexs d'activitat *ap* (NOAA 1995).
- c) Elecció de les estacions: de les estacions permanents de la xarxa IGS s'han elegit les que estan equipades amb receptors Rogue o Turbo-Rogue. D'aquesta manera s'assegura l'homogeneïtat en els equips receptors, especialment pel que fa a les antenes i els seus centres de fase.
- d) Sistema de referència: per poder assegurar un cert grau d'estacionarietat, i també per poder processar les dades de manera global—a escala planetària—, s'ha adoptat un sistema de referència inercial.
- e) Període d'integració: la mida de l'interval d'integració està condicionat pel nombre i la distribució de les observacions. Intervals massa curts poden no contenir un nombre suficient d'observacions per estimar el model. D'altra banda, intervals massa llargs poden fer menys realista la hipòtesi d'estacionarietat adoptada<sup>1</sup>. En el nostre cas, s'han establert intervals de sis hores i s'han

processat de manera independent les dades corresponents a cadascun.

#### Alguns detalls del càlcul

Les principals etapes del càlcul són les següents:

1. Edició de les dades, detecció i correcció dels *cycle-slips*<sup>2</sup> en les fases i el càlcul de les constants d'inicialització: mòdul Turboedit del programari GIPSY/OASIS-II (Jet Propulsion Laboratory, JPL) (BLEWITT 1990).
2. Construcció del *grid* irregular: càlcul dels centres de les cel·les i del mapa de Kohonen associat a cada capa.
3. Estimació, per mínims quadrats—i de forma simultània—, del TEC i els retards instrumentals dels satèl·lits i receptors, sota la hipòtesi d'estacionarietat per a cada un dels intervals de sis hores.

El nombre d'observacions per a cada interval de temps ha estat aproximadament de 65 000 (265 000 en total). La primera fase d'execució (edició de les dades) ha suposat unes tres hores de càlcul, en canvi en la segona (obtenció del TEC, residus i retards instrumentals) s'hi han invertit unes dotze hores (tres hores per període). Els programes s'han executat sobre una estació de treball tipus Sun Sparc 10.

#### Resultats

Com s'ha esmentat en la introducció, els retards instrumentals són quantitats constants que únicament depenen de cada satèl·lit o receptor en particular. En el nostre model, aquests retards s'estimen conjuntament amb el TEC a partir de blocs d'observacions agrupades en intervals de

**Figura 2.** Representació esquemàtica de la distribució de les estacions processades amb la "barra d'error" que indica el grau de repetibilitat entre les quatre estimacions independents del retard instrumental associat (la barra de la part superior dreta correspon a una estació fictícia amb 1 m de retard diferencial L1-L2)

#### Notes:

1. Una possible alternativa per tal de resoldre aquest problema consistiria a aplicar el filtre de Kalman (JUAN *et al.* 1995).
2. Salts de cicle en les fases, causats per pèrdues momentànies del senyal durant l'observació.

**Nota:**

3. Per realitzar-lo s'han utilitzat les *Radial Basis Function* del tipus *Thin Plate Spline*, seguint l'estratègia plantejada a HAYKIN 1994.

sis hores, que es processen independentment. Cal esperar, per tant, un nivell de repetibilitat alt en les estimacions de les constants esmentades per a diferents intervals de temps. L'estudi d'aquestes repetibilitats permet realitzar un primer contrast de la validesa del model.

*Repetibilitat en els retards instrumentals*

La repetibilitat obtinguda per als retards instrumentals calculats amb dades de juny de 1995 és força millor que l'obtinguda en un model previ d'una capa (HERNÁNDEZ-PAJARES *et al.* 1995) amb dades de novembre de 1993, especialment en el cas de les estacions i a l'hemisferi sud. Hi ha contribuït, en part, el major nombre de receptors presents a la xarxa IGS de 1995 –pràcticament el doble– (figura 2 i taula 1).

Cal destacar, també, la compatibilitat, de l'ordre de 0,2 ns, entre els valors dels nostres retards i els obtinguts pel Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR 1995), també per al 24 de juny.

*TEC radial*

A la figura 3, com a exemple, es representen les imatges del TEC radial per a la ionosfera i la protonosfera (gràfics superior i inferior, respectivament) per al primer inter-

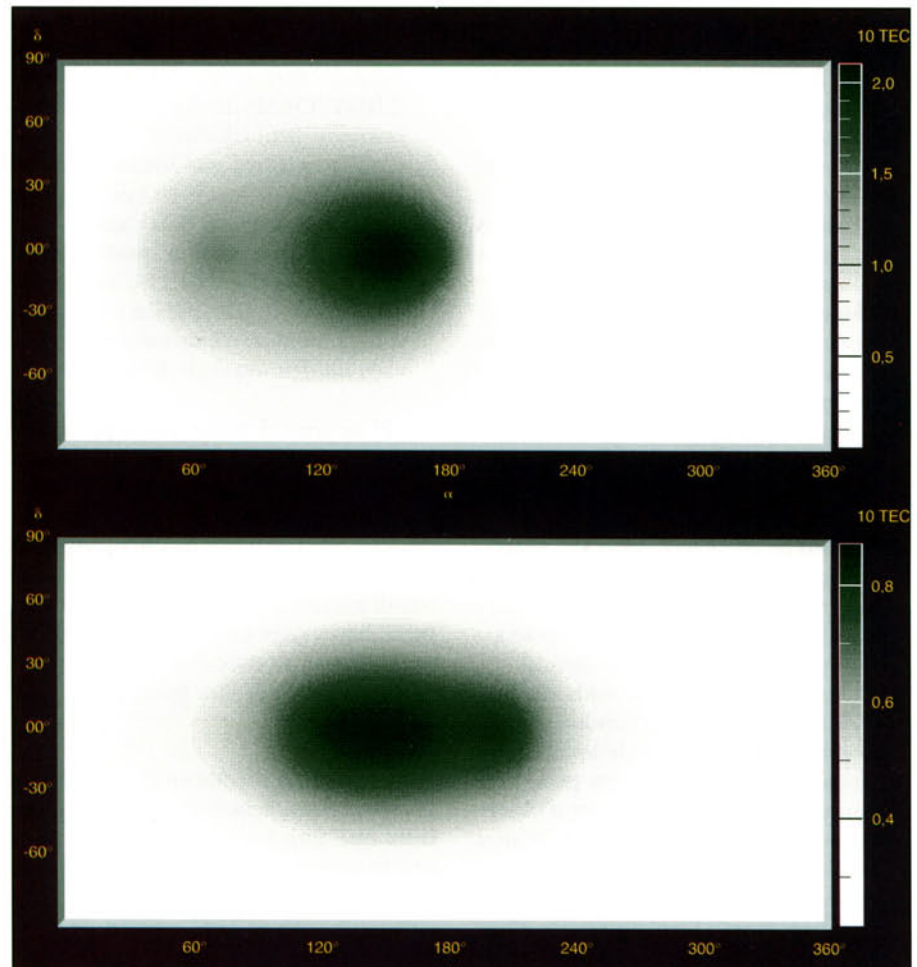
val de temps (de les 0 a les 6 hores TU), en funció de l'ascensió recta  $\alpha$  i la declinació  $\delta$ . Cal destacar que a la segona capa, malgrat que la densitat mitjana d'electrons d'uns dos ordres de magnitud inferior a la primera, el valor del TEC radial obtingut per a les zones equatorials i tropicals resulta ser unes dues vegades inferior al de la primera capa. Un detall que es pot apreciar és el retard de la ionització respecte de la posició del Sol,  $\alpha \approx 90$  deg el 24 de juny de 1995, pràcticament solstici d'estiu.

**Conclusions**

S'ha presentat una estratègia per a l'estimació global del TEC a la ionosfera i la protonosfera a partir de dades GPS, basada en tècniques tomogràfiques i amb la utilització d'algorismes neuronals. En l'enfocament adoptat, s'estima el TEC a escala planetària respecte d'un sistema de referència inercial que permet processar de manera global el conjunt d'observacions disponibles (265 000 en total, agrupades en quatre blocs corresponents a intervals de sis hores).

L'estratègia proposada és vàlida per a un nombre de capes (resolució vertical) o de cel·les qualsevol. En tot cas, les úniques limitacions estan imposades pel nombre

**Figura 3.** Imatges de la distribució del TEC entre 70 i 625 km (part superior) i entre 625 i 5 000 km (part inferior). Observeu que les escales són diferents



d'observacions disponibles i/o els requeriments de l'entorn de càlcul (memòria, temps de CPU).

En el nostre cas, s'ha considerat un model global de dues capes amb 900 i 100 cel·les, respectivament. La primera capa, compresa entre 75 i 625 km, està associada a la ionosfera, i la segona, compresa entre 625 i 5 000 km, a la protonosfera i regions altes de la ionosfera. A causa de la manca d'homogeneïtat en la distribució de les observacions disponibles, s'ha elegit una retícula irregular –cel·les de mida diferent–, construïda mitjançant tècniques de *clustering* neuronals, que han permès determinar la mida de les cel·les de manera que siguin travessades per un nombre de raigs similar (satèl·lit-receptor).

Les observacions utilitzades provenen de 67 estacions permanents de la xarxa IGS distribuïdes per tot el planeta. S'han processat en quatre blocs corresponents a intervals de sis hores cadascun, per al dia 24 de juny de 1995. Cal destacar l'alt nivell de repetibilitat de les constants instrumentals dels receptors i els satèl·lits, obtingut en comparar les estimacions corresponents als diferents blocs. Això constitueix un indicador efectiu de la bondat del model proposat i les estimacions obtingudes.

En comparar els resultats amb els obtinguts per altres autors o en altres campanyes, s'ha pogut observar una millora apreciable de les estimacions, també causada, en part, per una major densificació de la xarxa d'estacions GPS el juny de 1995. D'altra banda, es mostra la importància relativa de la protonosfera, que en qualsevol cas s'ha de tenir en compte a l'hora de modelar el contingut electrònic que interactua amb els senyals GPS, tal com assenyala KLOBUCHAR *et al.* (1994).

#### Agraïments

Aquest treball ha estat cofinançat pels projectes del Ministerio de Educación y Ciencia PB93-0123 i PB94-1205. Així mateix, agraïm al JPL la disponibilitat del programari GIPSY/OASIS-II, com també a l'IGS la disponibilitat de les observacions.

#### Per a més informació

Per a més detalls, es pot consultar:  
<http://maite125.upc.es/gage2/gage2.html>

Adreça electrònica de contacte:  
[matmhp@mat.upc.es](mailto:matmhp@mat.upc.es)

| Repetibilitat <i>σ</i> media | Estacions | Satèl·lits |
|------------------------------|-----------|------------|
| Dades juny 1995              | 12 cm     | 7,4 cm     |
| DLR/DFD juny 1995            | 20 cm     | 4,7 cm     |
| Dades novembre 1993          | ~20 cm    | ~4 cm      |

**Taula 1. Repetibilitat dels retards instrumentals**

## Bibliografia

- BLEWITT, G. 1990. "An automatic editing algorithm for GPS data", a *Geophysical Research Letters*, volum 17, núm. 3, pàg. 199-202.
- DLR, 1995. *Instrumental delays, anonymous ftp.*
- HAYKIN, S. 1994. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. MacMillan. Nova York.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M., RIUS, A., JUAN, J. M. I MADRIGAL, A. M. 1995. "Study of the global electron content using GPS", a *EGS Meeting*. Hamburg, Alemanya.
- JUAN, J. M., RIUS, A., HERNÁNDEZ-PAJARES, M., SANZ, J. 1995. *A Two-Layer model of the Ionosphere using Global Positioning System data*. Sotmés a arbitratge a *Radio Science*.
- KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H., BAILEY, G. J. I DAVIES, K. 1994. "Limitations in Determining Absolute Total Electron Content from Dual-Frequency GPS Group Delay Measurements", a *Beacon Satellite Symposium*. Aberystwyth. Juliol de 1994.
- KOHONEN, T. 1990. "The self-organizing map", a *Proceedings of the IEEE*, volum 78, pàg. 1464-1480.
- MURTAGH, F. I HERNÁNDEZ-PAJARES, M. 1995. "Clustering moderately-sized datasets using the Kohonen map approach", a *Statistics in transition*, volum 2, núm. 2, pàg. 151-162.
- NOAA, 1995. *Geomagnetic indices, anonymous ftp at ftp.ngdc.noaa.gov (140. 172.172.193) in directory /STP/GEOMAGNETIC\_DATA/INDICES/KP\_AP.*
- SARDÓN, E., RIUS, A. I ZARRAOA, N. 1994. "Estimation of the transmit and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations", a *Radio Science*, volum 29, núm. 3, pàg. 577-586.
- ZUMBERGE, J., NEILAN, R., BEUTLER G. I GURTNER, W. 1994. "The International GPS Service for Geodynamics-Benefits to Users", a *ION GPS-94*. Salt Lake City, Utah.

# Empezar sobre una base sólida



**C**uando se están estableciendo las bases para la construcción de un edificio o autopista o de un sistema completo de información geográfica, se necesita una tecnología avanzada en topografía y cartografía. Existe un sistema suficientemente flexible que contiene una amplia gama de aplicaciones; una solución que resuelve todas las necesidades de captura de datos: INTERGRAPH.

## Una base sólida para su proyecto

Para mejorar la eficacia en los proyectos o levantamientos para ingeniería, se requiere:

- Conexión con libretas electrónicas.
- Diseño parametrizado.
- Proyecto, simulación y cálculo de redes geodésicas.
- Modelos digitales del terreno.
- Aplicaciones para la implantación y diseño en ingeniería.
- Aplicaciones para cálculo y análisis de movimiento de tierras.

INTERGRAPH ofrece estas herramientas como parte de un sistema total e integrado, para la captura, gestión, análisis y presentación de información geográfica. Con INTERGRAPH, todos los ficheros relacionados con un proyecto forman parte de una base de datos única. La información compartida ayuda a los distintos departamentos a comunicarse adecuadamente, evitando la duplicación de datos, mejorando la productividad.

## Un compromiso sólido de formación y asistencia

Para INTERGRAPH, la formación y asistencia al usuario son temas prioritarios. A partir del conocimiento de las tareas cotidianas en topografía e ingeniería, se consigue mejorar la productividad y la eficacia, introduciendo adecuadamente los gráficos interactivos. Este compromiso con el usuario ha convertido a INTERGRAPH en el líder mundial en cartografía asistida por ordenador. Empezar con INTERGRAPH supone establecer una base sólida, para cualquier proyecto en topografía, ingeniería o cartografía.

## Un sistema único. Todas las soluciones.

Para más información, dirigirse a:  
INTERGRAPH ESPAÑA, S. A.

c/. Gobelos, 47 - 49 LA FLORIDA

28023 MADRID Tel.: 91 - 372 80 17

EDIFICIO UNIBER c/. Aribau, 197-199

08021 BARCELONA Tel.: 93 - 200 52 99

c/. Las Mercedes, 8 48930 LAS ARENAS

GETXO (VIZCAYA) Tel.: 94 - 463 40 66

# INTERGRAPH