

EL GEOIDE UB91 TORNAT A VISITAR : COMPARACIÓ AMB DEFLEX'91, DEFLEX'94 I MODEL GLOBAL EGM96.

Martin Furones, Àngel i Térmens, Assumpció

RESUM

Una de les principals tasques a fer un cop s'ha determinat el geoide per a una determinada àrea és la comprovació d'aquest per mètodes independents als que han servit per al càlcul del mateix geoide.

En aquest cas s'ha comprovat la solució per a Catalunya (UB91) amb desviacions de la vertical (campanyes DEFLEX'91 i DEFLEX'94), tot esperant disposar de dades combinades GPS-anivellació que l'ICC està realitzant.

Finalment hem aprofitat l'ocasió per avaluar el paper dels models globals en aquestes determinacions, principalment degut a la recent disponibilitat del model EGM96.

1 Introducció.

Una de les grans finalitats dintre de l'àmbit de la Geodèsia és la determinació de la superfície de referència per les alçades o Geoide, que es defineix com a superfície equipotencial respecte a la gravetat i normal a la seva direcció; amb l'avanç de tècniques com l'oceanografia, dinàmica de satèl·lits o la mateixa enginyeria, el coneixement precís d'aquesta superfície té, cada cop, una importància més gran .

El 1991 l'ICC va calcular aquesta superfície per a Catalunya, resultant el geoide UB91 (figura 1) . Aquesta solució va ser el resultat d'una col·laboració entre el Departament de Matemàtica Aplicada i Anàlisi de la Universitat de Barcelona i l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), juntament amb el *Department of Geophysics (University of Copenhagen)* i el *Kort & Matrikelstyrelsen (KMS)*, ambdós de Dinamarca. L'UB91 va ser calculat a partir de les següents dades [1]:

- Model global OSU89 fins a l'ordre 360.
- Model digital del terreny de 500 metres de resolució provenint de la *Defence Map Agency (DMA)* dels Estats Units, juntament amb un model batimètric proporcional per l'ICC i un model perifèric per França i la resta de l'estat espanyol de 5' de resolució anomenat ETOPO5, proporcionat per en R.Forsberg (KMS).
- 2.422 observacions de gravetat distribuïdes per tot Catalunya de forma homogènia, proporcionades per en A. Casas, del Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica de l'Universitat de Barcelona . 14.175 anomalies de la gravetat proporcionades per el *Bureau Gravimétrique International (BGI)* sobre un àrea compresa entre 40° i 44° de latitud, i -1° i 5° de longitud per tenir mesures de la gravetat al sud de França, Aragó i a la Mediterrània per tal d'evitar errors de frontera; tot i això les dades disponibles al Mediterrani varen ser molt escasses.

Finalment, per al càlcul es van utilitzar les següents tècniques:

- Tècnica eliminar-restaurar (*remove-restore*).
- Model residual del terreny amb el programari cedit per en R.Forsberg (KMS).
- Col·locació mínim quadràtica de les 1718 observacions que estaven situades més a prop d'una xarxa regular de 2.5' (tot i que la solució final es presenta sobre una xarxa de 5') amb el programari cedit per en C.C. Tscherning del *Department of Geophysics (University of Copenhagen)*.

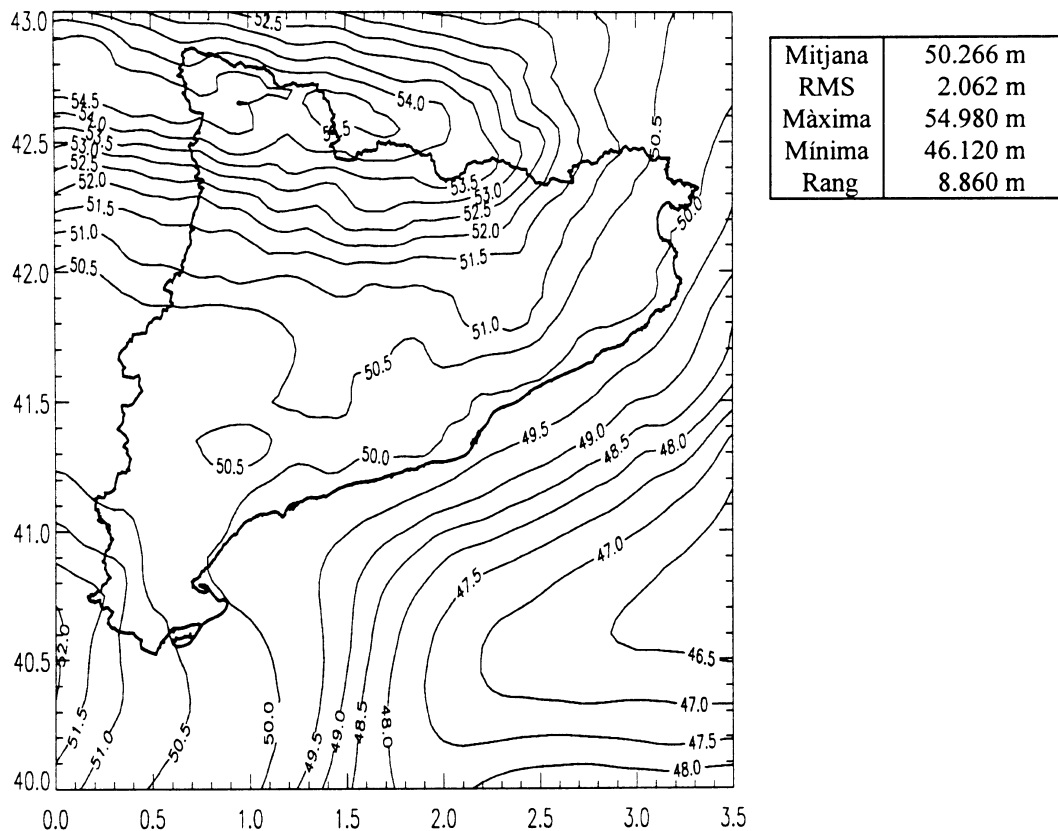


Figura 1: Geoide UB91.

Una primera comprovació de l'UB91 ve donada per la mateixa col·locació mínim quadràtica (degut a la gran redundància de dades emprades). Encara que és justificable el fet de realitzar altres comprovacions, independents de la tècnica emprada pel seu càlcul, per tal de garantir a l'usuari la seva validesa o, almenys, la precisió que pot esperar si utilitza aquesta solució.

Hi han dues maneres bàsiques de comprovació: mitjançant desviacions de la vertical i amb poligonals combinades GPS-anivellació; l'ICC disposa d'un total de 46 desviacions de la vertical que han servit per a una primera comprovació de l'UB91 a la espera de l'observació de la poligonal, pensada sobre la línia de costa degut a que la solució UB91 no incorpora dades marines, éssent la línia de costa una de les possibles zones problemàtiques.

2 Resultats de les campanyes DEFLEX'91 i DEFLEX'94.

El 1991, juntament amb el càlcul del propi geoide, es va planificar una primera campanya per tal d'observar les desviacions de la vertical a uns determinats punts amb coordenades geodèsiques conegudes, així es va poder fer la predicció d'aquestes desviacions amb el propi programa emprat per al càlcul del geoide, es a dir, es van calcular les desviacions de la vertical directament mitjançant les anomalies de la gravetat i la col·locació mínim quadràtica [9].

La tècnica utilitzada per a l'observació de les desviacions de la vertical és la utilització de cambra zenital i comparador fotogramètric [2]. Aquesta observació es va realitzar a un total de 25 punts on van col·laborar l' *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie* (ETH-Zürich) i el propi personal de l'ICC. Un cop feta la observació i realitzada la predicció resta, només, fer la comparació per tal d'obtenir els residus, aquestes dades es poden veure a la taula 1 i les figures 2, 3 i 4. L'error que es pot esperar amb aquesta tècnica és de l'ordre de 0.5"-1" [3], [8], i, com es pot veure a la taula estadística, els resultats dels residus per aquesta campanya entren dintre de les toleràncies que s'esperen i no s'observa cap sistematisme.

CAMPANYA DEFLEX'91		
	η	ξ
Mitjana	0.32''	0.17''
RMS	0.90''	0.93''
Màxima	1.83''	1.73''
Mínima	-1.45''	-1.53''
Rang	3.28''	3.26''

Taula 1: Residus calculats amb les observacions i col·locació mínim quadràtica.

El 1994 es va planificar i observar un altre campanya de desviacions de la vertical a càrrec del mateix equip (IGP-ICC); tot i que no es van complir els objectius principals d'aquesta campanya, pensada per tal d'obtenir observacions sobre els Pirineus i la costa (a priori les zones més problemàtiques), es van obtenir observacions a 18 punts (figures 2, 3 i 4) que es poden utilitzar per a la comprovació de l'UB91 de la mateixa manera que es va treballar a la campanya de 1991.

La predicció, però, es va fer de forma diferent. Recordem que les desviacions de la vertical no són més que les derivades parcials de la funció d'ondulació del geòide en direcció N-S i E-W [4], [7], respectivament :

$$\xi = -\frac{dN}{dS\phi} = -\frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \phi} ; \quad \eta = -\frac{dN}{dS\lambda} = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial N}{\partial \lambda}$$

Així, si disposem d'una malla regular amb les ondulacions del geòide es pot treballar com es fa al tractament d'imatges digitals i teledetecció on, per tal d'obtenir la diferenciació d'imatges digitals, pixel a pixel, s'utilitzen diferències de valors en lloc de derivades, és a dir: les derivades primeres sobre els eixos X e Y a un punt genèric poden definir-se, respectivament, per:

$$\Delta f_X = \frac{[f(X, Y) - f(X-1, Y)]}{\Delta X} = \frac{\partial f}{\partial X} ; \quad \Delta f_Y = \frac{[f(X, Y) - f(X, Y-1)]}{\Delta Y} = \frac{\partial f}{\partial Y}$$

Si ara considerem els nou punts veïns d'un punt genèric, aquestes derivades parcials es poden obtenir aplicant un filtre sobre tota la imatge [6]. En el nostre cas s'ha utilitzat el següent operador espacial :

Direcció N-S

-1	-3	-1
0	0	0
1	3	1

Direcció E-W

1	0	-1
3	0	-3
1	0	-1

Degut a que les coordenades dels punts geodèsics on s'han observat les desviacions de la vertical no coincideixen amb les coordenades dels nodes on tenim les ondulacions, aquest mètode no deixa de ser una interpolació, però no s'esperen grans discrepàncies amb els valors obtinguts directament mitjançant la col·locació ja que la ondulació del geòide és una funció suficientment suau. Aquesta darrera observació es pot comprovar a la taula 2 on podem veure les dades estadístiques dels residus dels punts de la campanya DEFLEX'91, calculades amb les observacions i les prediccions fetes amb l'aplicació del filtre, i els podem comparar amb els obtinguts directament amb col·locació mínim quadràtica a la taula 1.

CAMPANYA DEFLEX'91		
	η	ξ
Mitjana	0.15''	-0.15''
RMS	1.26''	1.31''
Màxima	3.11''	1.97''
Mínima	-2.33''	-3.18''
Rang	5.45''	5.16''

Taula 2: Residus calculats amb les observacions i la tècnica del filtratge.

La determinació dels punts de la campanya DEFLEX'94 es van calcular mitjançant l'ús de l'esmentada tècnica d'interpolació. A la taula 3 podem veure els resultats obtinguts dels residus per als 18 punts emprats, on podem extreure les mateixes conclusions que als punts de la campanya DEFLEX'91, és a dir, els residus entren dintre de les toleràncies que s'esperaven i no s'observa cap sistematisme.

CAMPANYA DEFLEX'94		
	η	ξ
Mitjana	-0.63''	-0.25''
RMS	1.00''	1.27''
Màxima	0.60''	1.49''
Mínima	-2.36''	-2.75''
Rang	2.96''	4.24''

Taula 3: Residus calculats amb les observacions i la tècnica del filtratge.

Finalment, a la taula 4 podem veure els resultats globals de les dues campanyes (DEFLEX'91 predita directament amb la col·locació mínim quadràtica i DEFLEX'94 mitjançant el filtre d'interpolació), i a on també s'inclouen 3 punts observats per l'*Instituto Geográfico Nacional* (IGN) i determinats amb la tècnica de filtratge. En total disposem de 46 punts.

A les figures 2, 3 i 4 es pot veure que una de les zones més conflictives (valors més grans dels residus) és la línia de costa, i que els Pirineus s'han quedat sense massa punts; però una visió global dels valors obtinguts indiquen que el geoide UB91 s'ajusta bastant bé al camp gravitatori de la zona.

DEFLEX'91 + DEFLEX'94		
	η	ξ
Mitjana	-0.15''	-0.12''
RMS	0.94''	1.07''
Màxima	1.83''	1.73''
Mínima	-2.36''	-2.75''
Rang	4.19''	4.48''

Taula 4: Residus calculats per als 46 punts disponibles.

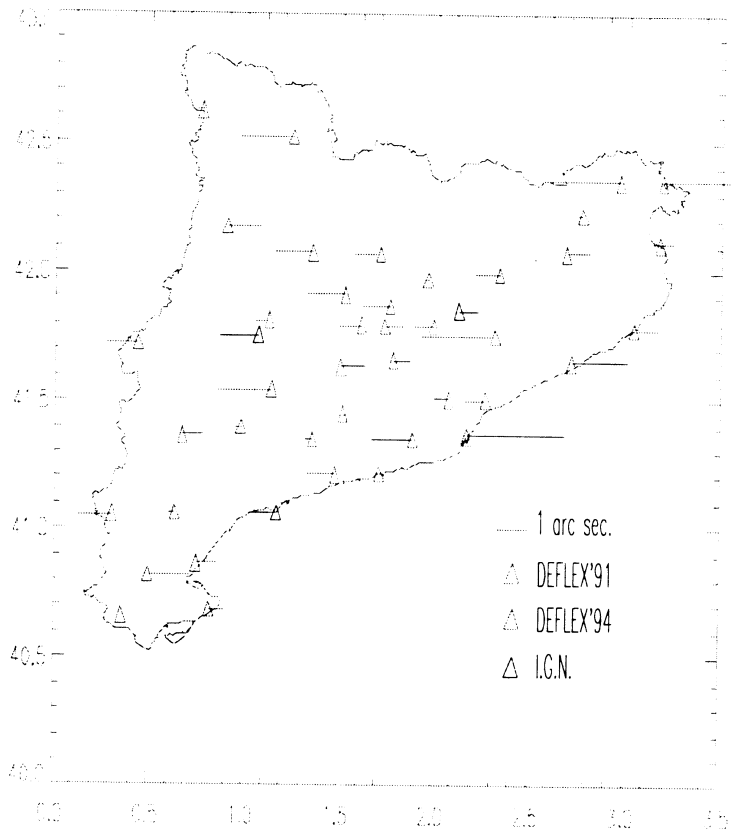
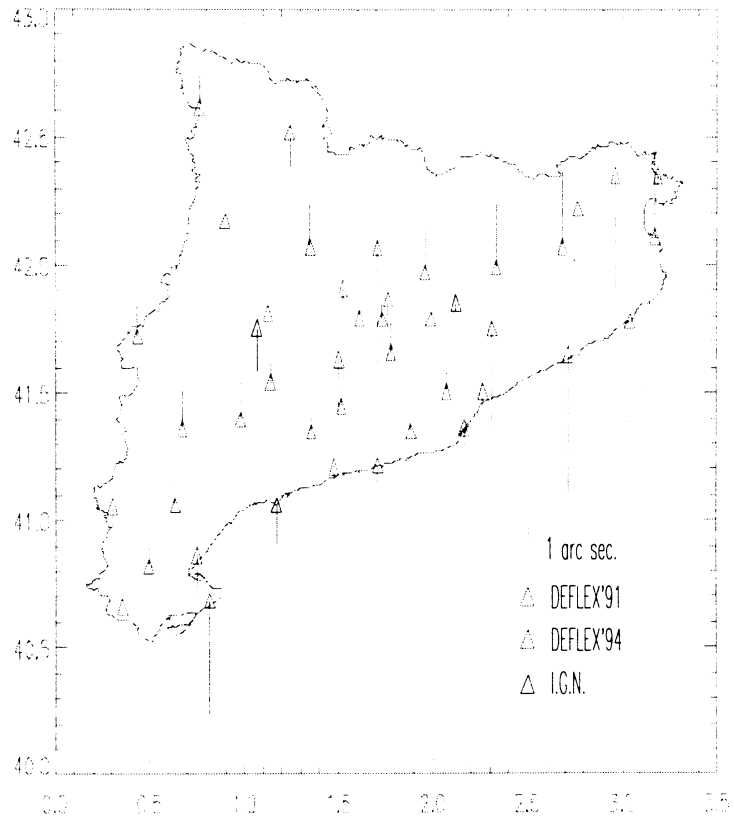


Figura 2: *Component residual η .*



igura 3: *Component residual ξ .*

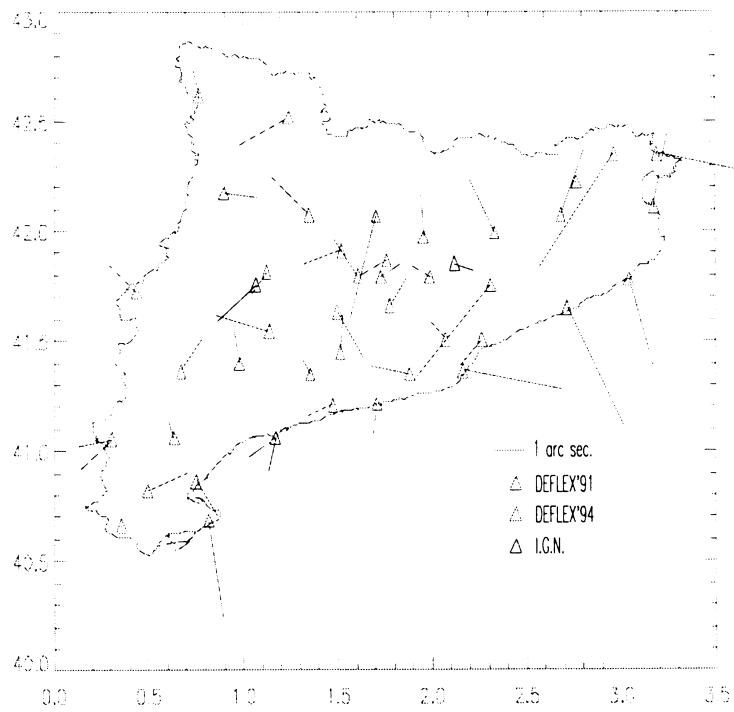


Figura 4: *Composició components residuals.*

3 Comparació del model global EGM96 amb UB91.

Com ja s'ha dit, l'UB91 va ser calculat a partir del model global OSU89, a la figura 5 es mostren les diferències entre el geoide local i el seu model global on podem veure que, principalment, es millora la resolució del model global en aquelles zones més muntanyoses; cal recordar que la solució UB91 no inclou dades marines, així que els valors en aquestes zones s'han de prendre amb la cura adient.

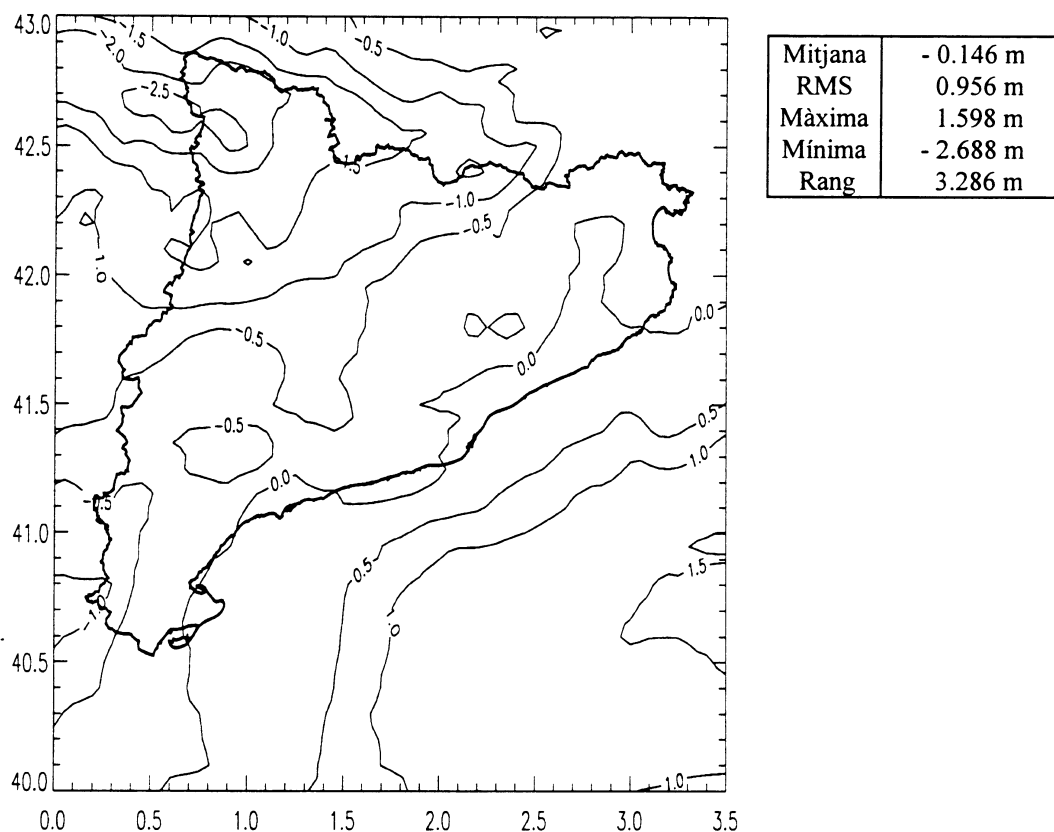


Figura 5: *Geoide UB91 i les seves diferències amb l'OSU89.*

El 1996 va sorgir el model global EGM96 (*Earth Gravitational model*) [5]; aquest model suposa una millora respecte als anteriors models globals degut a que s'incorporen noves dades gravimètriques de regions on abans no eren disponibles: Xina, l'antiga Unió Soviètica, Àfrica, Sud-Amèrica, inclou dades millorades en regions com Canadà, Austràlia, Europa i Estats Units, incorpora dades obtingudes amb gravimetria aerotransportada sobre l'Àrtic i Groenlàndia, incorpora dades altimètriques i anomalies gravimètriques de diferents satèl·lits, així com un nou model digital del terreny global; amb tot cal esperar que la solució per a Catalunya s'apropi molt més a aquest nou model global que a l'utilitzat per al seu propi càlcul, això es pot veure a la figura 6 on les diferències, sobretot als Pirineus, no són tan grans com les vistes a la figura 5.

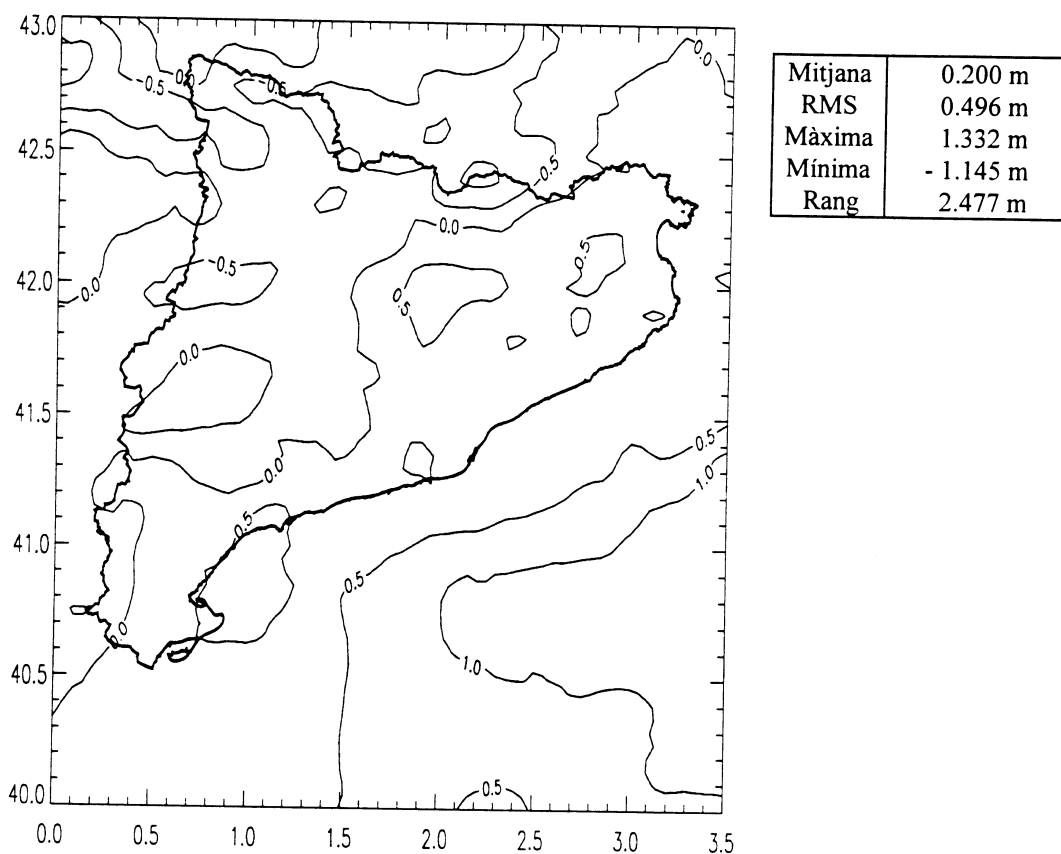


Figura 6: Geoide UB91 i les seves diferències amb l'EGM96.

Realment el model global EGM96 es comporta molt millor que l'OSU89, això ens confirma que l'UB91 és una solució que respon molt bé al camp gravitatori local. Tot i això es pot notar una certa tendència global, és a dir, una inclinació on la línia de terra segueix la direcció SW-NE (corba zero de la figura 6).

Una altra manera d'analitzar aquests models seria fer la predicció de les desviacions de la vertical a partir dels coeficients dels models globals i comparar-los amb les observacions per tal d'obtenir els residus i analitzar-los. El resum estadístic d'aquests residus, amb els 46 punts observats, el podem veure a la taula 5 on podem trobar que la millora de l'EGM96 sobre l'OSU89 es pot veure al valor de la mitjana, i la millora de l'UB91 sobre aquests dos models es presenta als valors del RMS.

	OSU89		EGM96		UB91	
	η	ξ	η	ξ	η	ξ
Mitjana	0.52"	-0.98"	0.08"	-0.08"	-0.15"	-0.12"
RMS	2.77"	3.26"	2.93"	2.96"	0.94"	1.07"
Màxima	6.92"	6.17"	6.03"	5.33"	1.83"	1.73"
Mínima	-4.78"	-9.67"	-5.35"	-9.23"	-2.36"	-2.75"
Rang	11.70"	15.84"	11.38"	14.56"	4.19"	4.48"

Taula 5: Estadístiques de les diferències entre les desviacions de la vertical dels diferents models de geoide i les observacions per als 46 punts disponibles.

4 Conclusions.

Els resultats mostren que la campanya DEFLEX'94 (pensada inicialment per a omplir els forats deixats, per DEFLEX'91, en els Pirineus i la costa) confirma els obtinguts amb la anterior campanya DEFLEX'91 i diuen clarament que l'UB91 és una solució bona per a la zona de càlcul, on l'error esperat és de 1 ppm ([1],[3]). Confirmant la seva validesa d'utilització per als possibles usuaris d'un geoide local a falta de més comprovacions futures començades a desenvolupar a càrrec de l'ICC.

A més s'ha pogut comprovar que el model global EGM96 es comporta d'una manera més acurada que el model OSU89. Aquest comportament es pot observar en el RMS de les diferències d'ondulacions i en el sistematisme dels residus de les desviacions de la vertical.

5 Agraïments.

Els autors agraeixen la col·laboració d'en B. Bürki de l'IGP (ETH-Zürich) en les campanyes DEFLEX'91 i DEFLEX'94, així com la tasca feta per en M. Soro (DEFLEX'91-94) i la M. Román (DEFLEX'94), de l'ICC.

REFERENCIES.

- [1] Andreu M.A. i Simó C. *Determinació del geoide UB91 a Catalunya*. Institut Cartogràfic de Catalunya, monografia tècnica número 1, 1992.
- [2] Bürki B. *Die operationelle bestimmung von lotabweichungen mit erläuterungen zur transportablen zenitkamera TZK3 des IGP und zum computergestützten auswertesystem*. Bericht des IGP, vol. 91. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie-ETH, Zürich, 1985.
- [3] Colomina I. *Estado actual y perspectivas de la determinación del geoide en Cataluña*. Primera semana cartográfica de Barcelona. Jornadas Topocartográficas, Barcelona, 1992.
- [4] Heiskanen W.A. i Moritz H. *Geodesia física*. IGN, cuarta edición, 1985.
- [5] <http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96>.
- [6] Jensen J.R. *Introductory digital image processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [7] Moritz H. *Advanced Physical Geodesy*. Herbert Wichmann Verlag, second edition, Karlsruhe, 1980.
- [8] Sevilla M.J. *Programas de cálculo para la determinación de la dirección de la vertical por fotografías cenitales de estrellas*. Técnica Topográfica, número 37, 1981.
- [9] Tscherning C.C. *A Fortran IV program for the determination of the anomalous potential using stepwise least square collocation*. Reports of the department of Geodetic Science, num. 212, Ohio State University, 1972.