

è stato previsto l'inquadramento nel sistema nazionale unificato e secondo la rappresentazione conforme di Gauss; da ciò l'immediata utilizzazione dei trigonometrici dell'I.G.M., già disponibile in questo sistema, a fronte della scarsa utilizzazione dei vertici catastali, con la conseguente ridotta compatibilità.

Ai tre sistemi d'inquadramento d'interesse nazionale su esposti se ne aggiunge, negli anni '50, un quarto. Infatti, per quanto riguarda l'Europa, fino alla II<sup>a</sup> Guerra Mondiale ogni Stato, analogamente all'Italia, si era costruito un proprio sistema di riferimento. Questi sistemi erano completamente scollegati, sia per la limitatezza delle tecniche di rilievo dell'epoca, sia per una spiccata autonomia manifestata dagli stati di allora.

La I<sup>a</sup> e la II<sup>a</sup> Guerra Mondiale dimostrarono l'esigenza militare di un sistema cartografico uniforme e, alla fine della II<sup>a</sup> Guerra Mondiale il consenso generale per la cartografia a media e grande scala andò verso la rappresentazione di Gauss, detta anche di Mercatore trasversa, che presuppone la suddivisione del globo in fusi a prevalente sviluppo N-S delimitati da assegnati meridiani. Dopo la fine della II guerra mondiale, conseguentemente all'instaurarsi di un clima di cooperazione tendente ad unificare metodi e sistemi in ogni campo, fu sentita l'esigenza di uniformare le cartografie e quindi anche i sistemi di riferimento. In verità l'esigenza di unificazione nacque proprio durante la guerra e per motivi bellici legati all'operatività delle forze armate. Nel successivo dopoguerra la necessità si trasferì anche al campo civile. D'altra parte, la diffusione delle macchine calcolatrici elettroniche permetteva di affrontare calcoli di mole prima impensabile. Nell'ambito dell'Associazione Internazionale di Geodesia molti Stati europei concordarono di procedere ad un calcolo di compensazione di insieme di una selezione delle rispettive reti geodetiche, onde riferire le coordinate dei punti ad un unico sistema. Fu scelta come superficie di riferimento l'ellissoide di Hayford ed il centro di emanazione fu stabilito a Potsdam, ma l'orientamento dell'ellissoide non fu tale da annullare in quel punto la deviazione della verticale, bensì fu anche lasciata una deviazione residua in modo da minimizzare le deviazioni della verticale negli altri punti di azimut e longitudine astronomici noti, specialmente nelle zone periferiche dell'Europa: fu, cioè, assunto quello che viene detto "orientamento medio europeo". Fu anche stabilito di contare le longitudini dal meridiano di Greenwich, ed il sistema di riferimento fu denominato "European datum 1950", in sigla ED50 (fig. 7).

L'I.G.M., per ottemperare ad impegni di carattere internazionale, soprattutto militari, inserì nella propria cartografia i reticolati geografico e piano relativi rispettivamente al sistema geodetico ED50 ed alla rappresentazione UTM associata. Un reticolato di paralleli e meridiani, cioè un reticolato geografico, è stato per lungo tempo lo strumento convenzionale per definire la posizione di un punto su una carta. Però le unità di latitudine e longitudine hanno dimensioni differenti e ciò comporta complessità e tempo per il posizionamento e la misura. Essenziali per molti scopi, latitudine e longitudine sono misurate in



Figura 7

gradi, minuti e secondi. Queste unità di misura sono più complesse se paragonate con i semplici numeri delle coordinate piane: incrementi uguali di longitudine diminuiscono in dimensione lineare quando ci si allontana dall'equatore, mentre incrementi uguali di latitudine sono quasi costanti lungo un meridiano.

Il reticolato geografico può essere sostituito da un reticolato cartografico, cioè un reticolato cartesiano, composto da rette ugualmente spaziate. È il reticolato N, E che conosciamo. Chunque,

Definizione
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ellissoide: Internazionale (Hayford)</li> <li>• <math>a = 6\,378\,388</math></li> <li>• <math>f = 1/297</math></li> <li>• Orientamento: medio europeo 1950 (European datum 1950)</li> <li>• origine delle longitudini Greenwich</li> </ul>
Realizzazione
<p>Non ha una propria realizzazione, essendo nato per esclusivi scopi di omogeneizzazione cartografica per la cartografia a media e piccola scala, ma si basa su una rete di inquadramento consistente in una selezione delle reti di 1° ordine europee; il calcolo di compensazione è stato eseguito nel 1950 dall'A.M.S. (Army Map Service), poi D.M.A. (Defence Mapping Agency), oggi N.I.M.A. (Imagery Mapping Agency). Le coordinate geografiche sono state ricalcolate in base a questa compensazione e al datum geodetico di cui sopra, con origine delle longitudini su Greenwich. La compensazione ED50 può essere usata per taluni scopi pratici, soprattutto di tipo cartografico, ma non per quelli geodetici, né operativi né tantomeno scientifici</p>
Rappresentazione cartografica:
<p>Di Mercatore Trasversa Universale (per gli americani "Universal Transverse Mercator") territorio nazionale praticamente compreso in due fusi di 6° di ampiezza, con meridiani centrali a 9° e 15° di longitudine est Greenwich (fusi 32 e 33 del sistema internazionale)</p> <p>fattore di contrazione <math>m_0 = 0.9996</math></p> <p>falsa origine per le coordinate Est: 500 km</p> <p>falsa origine per le coordinate Nord: 0 nell'emisfero Nord; 10 000 km nell'emisfero Sud. Nel sistema ED50 M. Mario ha coordinate:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\varphi = 41^\circ 55' 31.487''</math></li> <li>• <math>\lambda = 12^\circ 27' 10.93''</math></li> </ul>

Tabella 4 - Sistema di riferimento ED50



Figura 8

con una modesta formazione culturale ed un semplice strumento, può velocemente e precisamente definire la posizione di un punto in termini di coordinate piane, così come, dati due punti, determinare direzione e distanza. Su una carta correttamente compilata, tale reticolato cartografico garantisce inoltre la precisione dimensionale. Anche se la carta è stata piegata e deformatata, un posizionamento accurato può ancora essere fatto con riferimento alla linea più vicina del reticolato.

I vantaggi del reticolato cartografico furono per primi intuiti dai militari. Ciò avvenne particolarmente in Europa, dove le stesse aree furono ripetutamente oggetto di guerre e di cambio di appartenenza. In Nord America i militari raramente ebbero il tempo e la necessità di preparare poco più che carte dimostrative e il concetto del reticolato cartografico non fu compreso che nella seconda parte del XX secolo. L'esercito statunitense, scioccato dalle proprie lacune cartografiche durante l'ultimo conflitto, iniziò l'impresa di istituire un sistema cartografico mondiale dotato di reticolato piano. La NATO seguì il concetto americano e dalla metà degli anni '50 i paesi aderenti decisero di adottare le rappresentazioni di Mercatore traversa su scala mondiale. L'uso della proiezione di Gauss, come è più giusto chiamarla; si è subito esteso fin dai primi anni '50; essa fu presto adottata per usi civili da numerose nazioni che non avevano ancora sviluppato un proprio sistema cartografico e l'ONU giocò in questo un ruolo chiave.

Gli Stati Uniti sono ormai l'ultima delle nazioni sviluppate che non hanno il reticolato chilometrico sulle proprie carte, tranne che per le piccole scale. Negli anni '50 i militari americani completarono infatti la cartografia nazionale alla scala 1:250.000 con reticolato cartografico, ma l'edizione civile di quelle carte, così come di quelle a scala maggiore, pubblicate dall'USGS (Servizio Geologico statunitense) in qualità di unico organo cartografico nazionale, riportavano solo i riferimenti UTM in cornice. Nel 1973 l'USGS adottò la rappresentazione UTM ed il relativo reticolato e le cartografie alle scale 1:250.000 e 1:100.000 furono presto modificate di conseguenza. Analoga operazione iniziò per la cartografia alla scala 1:24.000, ma dopo venti anni meno del 30% era stato modificato. Nel 1994 poi il Servizio Geologico cominciò ad eliminare il reticolato chilometrico appena inserito, ritornando alle indicazioni in cornice, fatto dovuto in gran parte alle pressioni economiche dell'USFS (Servizio Forestale degli Stati Uniti), finanziatore di parte di quella cartografia. Infatti l'USFS ha a lungo preferito il sistema pubblico di rilevamento del territorio (*Public Land Survey System, PLSS*) come sistema di riferimento. Il PLSS fu istituito nel 1785 ma non ricopre la maggior parte degli Stati Uniti ad Est, né il Texas. È un sistema primitivo, vecchio due secoli; le sue unità di misura non sono né precise né concepite per essere prontamente convertite in un altro sistema, quindi incompatibili con i moderni metodi di calcolo.

La decisione venne proprio quando il GPS stava maturando verso una totale accessibilità e le proteste degli utenti, in numero via via crescente, hanno condotto ad un ritorno al reticolato UTM completo sulle carte a grande scala. È probabile che tale reticolato sarà aggiunto a tutte le serie cartografiche in scala da 1:24.000 fino a 1:1.000.000 con l'eccezione delle carte finanziate dall'USFS, che ammontano a circa 10.500 elementi, più o meno il 20% delle carte 1:24.000 che coprono gli Stati Uniti.

Con poche altre eccezioni, il resto del mondo ha adottato il reticolato UTM come base per le proprie carte a grande scala.

In Italia per il reticolato gaussiano relativo al sistema ED50 venne adottata la denominazione UTM, per distinguerlo da quello relativo al sistema nazionale, che viene denominato di Gauss-Boaga, pur essendo identica la rappresentazione. La denominazione corretta è però UTM-ED50, oggi indispensabile per distinguerla dalla UTM-WGS84 ed evitare gravissime confusioni.

L'I.G.M. adottò quindi il sistema ED50 per il taglio della nuova cartografia alla scala 1: 50.000 e il relativo reticolato UTM, per cui c'è omogeneità, in queste carte, tra le coordinate geografiche dei vertici e le coordinate gaussiane desumibili dal reticolato.

In seguito le norme della C.G.I. prescissero lo stesso inquadramento geografico per le carte tecniche, in modo che queste siano sottomultipli dei fogli 1: 50.000.

Questa decisione, quanto mai infelice, aggiunse confusione a confusione. Infatti in queste carte tecniche, costruite ovviamente nel sistema nazionale, l'omogeneità fra coordinate gaussiane (Gauss-Boaga) del reticolato e coordinate geografiche dei vertici non esiste.

Tabella 5 - Sistema di riferimento IGM83

Definizione
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Ellissoide:</b> Internazionale (Hayford) <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>a = 6378388</math></li> <li>• <math>f = 1/297</math></li> </ul> </li> <li>■ <b>Orientamento:</b> medio italiano su 33 azimut di Laplace <ul style="list-style-type: none"> <li>• origine delle longitudini Roma M. Mario (definizione astronomica 1940)</li> <li>• <math>\varphi = 41^{\circ} 55' 25.51''</math></li> <li>• <math>\lambda = 0^{\circ} (12^{\circ} 27' 08.400'' \text{ est da Greenwich})</math></li> </ul> </li> </ul>
Realizzazione
Rete di triangolazione fondamentale dell'I.G.M. revisionata, dimensionata su 56 lati geodimetrici e due basi invar e orientata su 33 azimut di Laplace. Calcolo di compensazione in blocco del 1983
Rappresentazione cartografica
Conforme di Gauss territorio nazionale compreso in tre fusi, di $6^{\circ}$ di ampiezza, con meridiani centrali a $-3^{\circ} 27' 8.400''$ , $2^{\circ} 32' 51.600''$ e $8^{\circ} 32' 51.600''$ di longitudine da M. Mario fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$ falsa origine per le coordinate Est: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6500 km (<math>1^{\circ}</math> fuso)</li> <li>• 7500 km (<math>2^{\circ}</math> fuso)</li> <li>• 8500 km (<math>3^{\circ}</math> fuso)</li> </ul>

Il sistema geodetico-cartografico europeo (ED50-UTM) è il sistema usato per il "taglio" (delimitazione degli elementi cartografici secondo trasformate di archi di meridiani e paralleli) della maggior parte della cartografia attualmente in produzione a livello nazionale (I.G.M.) e regionale. Non è impiegato come sistema d'inquadrimento, anche se presso l'I.G.M. sono disponibili le coordinate in questo sistema dei vertici della rete trigonometrica fondamentale. Anche qui la denominazione corrente di "coordinate UTM" si riferisce esclusivamente alle coordinate cartografiche. Uno stesso punto ha nel sistema UTM coordinate differenti (di decine o centinaia di metri, a parte le false origini) da quelle nel sistema "Gauss-Boaga". Tale scostamento è dovuto principalmente al diverso datum geodetico, ma in parte anche ai differenti calcoli di compensazione che hanno dato origine ai valori delle coordinate. La rete fondamentale si presenta in sostanza "distorta" in maniera diversa nei due sistemi. Per quanto sopra, il passaggio dalle coordinate UTM alle "Gauss-Boaga" o viceversa è eseguibile solo con formule di corrispondenza di tipo empirico, con parametri stimati ai minimi quadrati, valide in genere in zone di estensione limitata e solo per applicazioni cartografiche a media e piccola scala.

Espressioni di tipo polinomiale per questa trasformazione sono state ricavate dal Prof. Piero Bencini e dallo scrivente, a solo scopo cartografico, rispettivamente per la cartografia a media e piccola scala.

La disponibilità di nuove misure eseguite dopo il '50 e di moderni strumenti di calcolo permettevano ora di pensare ad un nuovo e più preciso sistema italiano, che fu realizzato, per opera del Prof. Bencini, alla fine degli anni '70, e prese il nome di IGM83.

L'IGM83 costituisce per l'Italia il primo vero sistema di riferimento nazionale ed un notevole miglioramento rispetto a Roma40: esso possiede misure sicure e ridondanti anche per il dimensionamento (lati) e per l'orientamento (azimut), e nasce da una compensazione in un unico blocco che garantisce l'omogeneità dei risultati e consente di valutare le precisioni conseguite.

L'ellissoide utilizzato è sempre quello internazionale e per il punto di emanazione, ancora Roma M. Mario, sono state mantenute fisse le coordinate astronomiche precedenti (1940); l'orientamento è invece dato da 33 azimut di Laplace introdotti in calcolo, mentre il dimensionamento proviene da 56 lati geodimetrici e da due moderne basi misurate con fili invar, quella italiana di Piombino ed una francese in Corsica (fig. 8).

La scelta di cambiare il sistema di riferimento ufficiale di una nazione è una decisione che comporta pesanti conseguenze; infatti, l'intero patrimonio cartografico risulta di colpo superato e si avvia un periodo di incertezza nel quale i due sistemi, vecchio e nuovo, devono convivere prima che il nuovo raggiunga una diffusione tale da costituire uno standard indiscusso. Tale periodo, nel quale s'ingenerano complicazioni ed ambiguità, può essere, nel caso dell'intera cartografia di una nazione, anche molto lungo: basti pensare che per la realizzazione del vecchio "25.000" è

occorso circa un secolo, e che il nuovo "50.000" in produzione dagli anni '60 copre attualmente solo 3/4 del territorio nazionale e parte dei fogli prodotti risultano già obsoleti.

È quindi normale che prima di decidere un cambio di sistema di riferimento siano valutati con attenzione i reali benefici che si otterranno in relazione agli oneri che da tale decisione derivano ed ogni caso è indispensabile che il nuovo sistema proposto abbia, almeno come previsione, i requisiti per una lunga durata. Nel caso dell'IGM83 le considerazioni di cui sopra hanno condotto alla conclusione di rinviare ad un prossimo futuro il cambio di sistema di riferimento, essenzialmente perché, già alla metà degli anni '80, era iniziata in tutto il mondo la diffusione dei metodi satellitari GPS e si prevedeva un loro notevole sviluppo nel giro di pochi anni, puntualmente confermato nei fatti. Per il pieno sfruttamento del GPS, infatti, risulta conveniente l'adozione di sistemi di riferimento mondiali e geocentrici, ed è in questa direzione che oggi tutti si stanno muovendo. Per questo motivo l'IGM83, pur essendo migliore dei precedenti sistemi nazionali, non è mai stato adottato ufficialmente e può essere quindi utilizzato solo per scopi scientifici. In verità, se anche si fosse voluto, sarebbe stato ben difficile definire quale autorità poteva prendere una tale decisione, dopo la soppressione della Commissione Geodetica!

### I sistemi di riferimento continentali e mondiali

I sistemi geodetici locali impiegati in geodesia e cartografia prima dell'avvento dei sistemi satellitari sono basati, come abbiamo visto, su ellissoidi orientati in modo da approssimare bene localmente la superficie geoidica.

In questo modo risultano ridotti e trascurabili nelle applicazioni operative gli scostamenti tra verticale e normale ellissoidica, e le misure angolari eseguite sul terreno possono essere riferite alle figure ellissoidiche senza apportarvi correzioni. Ciò può ritenersi valido nell'ambito di una

nazione di superficie limita anche, con peggiore approssimazione, per zone più estese (ad esempio per l'intera Europa o per gli Stati Uniti).

L'esigenza di avere sistemi di riferimento sempre più estesi è andata crescendo nel corso degli ultimi decenni in concomitanza con l'aumentare della velocità di scambi di vario tipo (economici, commerciali, culturali, scientifici, ecc.) fra ogni parte del mondo.

Già nei primi anni '50 era apprezzata l'idea d'istituire un sistema di riferimento unico per tutto il globo, a cui poter riferire i prodotti cartografici metrici sia analogici che digitali, ed in ultima analisi tutte le informazioni per cui sia significativa la collocazione spaziale; infatti sono intuitivi i molteplici vantaggi derivanti dal poter utilizzare un unico sistema di coordinate per tutta la Terra.

L'avvento della geodesia satellitare ha reso poi indispensabile l'adozione di riferimenti unici e geocentrici che fossero in accordo con il moto dei satelliti che, così come le traiettorie dei missili intercontinentali, sono riferite al centro di massa della Terra fisica.

Alla fine degli anni '50 gli Stati Uniti, principalmente per esigenze di carattere militare, hanno sviluppato sistemi di riferimento mondiali studiati in modo da ottenere una buona approssimazione media in ogni parte del globo. Negli ultimi decenni molti dati di posizione di elevata precisione si sono accumulati. Sono state completate poligonali di estensione transcontinentale, determinate posizioni con metodi satellitari Doppler, deviazioni della verticale con metodi astrogeodetici e sono soprattutto disponibili grandi quantità di misure gravimetriche su scala mondiale.

Tutti questi fattori combinati hanno reso possibile definire e realizzare un nuovo sistema di riferimento di applicabilità mondiale e con origine coincidente con il centro di massa della Terra fisica.

Un sistema orientato a tale scopo, per essere anche strumento di correlazione tra i differenti sistemi geodetici locali, deve essere geocentrico

e solidale con la Terra. Tale sistema è denominato ECEF, acronimo di *Earth-Centered Earth-Fixed*: è geocentrico poiché il centro del sistema coincide con il centro di massa della Terra; solidale nel senso che il sistema è "fissato" alla Terra e quindi la segue nei suoi grandi moti (rotazione e rivoluzione) ma non per i moti di nutazione, precessione, ecc.

I primi sistemi ad avere queste caratteristiche, e quindi denominati mondiali, sono stati sviluppati dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti. Poiché la rapida evoluzione tecnologica ha reso migliorabili, alla luce delle nuove scoperte, le definizioni e le realizzazioni, siamo passati, nel giro di pochi anni, dal capostipite WGS60 al WGS66 ed al WGS72, che costituiscono modelli sempre più attendibili della realtà fisica terrestre, fino al WGS84.

Nel 1988 il Servizio Internazionale per la Rotazione Terrestre (IERS) ha definito un nuovo sistema di riferimento convenzionale terrestre, denominato ITRS (*IERS Terrestrial Reference System*). La sua origine coincide con il centro di massa della terra, l'asse Z del sistema contiene l'Origine Convenzionale Internazionale (CIO), l'asse X è diretto verso il meridiano zero (Greenwich) e l'asse Y completa una terna cartesiana destrorsa. Lo IERS pubblica annualmente una realizzazione del sistema, denominata ITRF (*IERS Terrestrial Reference Frame*) con riferimento all'anno di validità (ad esempio ITRF92). Ciascuna di queste realizzazioni (*frames*) del sistema consiste in un set di coordinate e di velocità di vertici delle reti mondiali VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), SLR (*Satellite Laser Ranging*) e GPS permanenti che contribuiscono all'IERS.

WGS84 è l'acronimo di "World Geodetic System 1984" e definisce il sistema come geodetico, mondiale, riferito al 1984; esso costituisce un modello matematico della Terra da un punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, costruito sulla base delle misure e delle conoscenze scientifiche e tecnologiche disponibili al 1984.

Il sistema WGS84 è un sistema terrestre convenzionale (CTS) definizione con la quale sono indicati i sistemi geocentrici solidali con la Terra e riferiti ad elementi convenzionalmente fissati (Polo medio, Greenwich); esso è derivato dal WGS72 al quale sono state apportate varie modifiche, alcune delle quali erano necessari per accordarlo con le più recenti definizioni dell'IERS. L'origine delle coordinate coincide con il centro di massa della Terra; l'asse Z è diretto verso il polo Nord terrestre convenzionale (CTP - *Conventional Terrestrial Pole*) definito dal BIH (*Bureau International de l'Heure*) al 1984.0; l'asse delle X è l'intersezione del piano del meridiano zero definito dal BIH al 1984.0 (quello passante per Greenwich) con il piano equatoriale associato al CTP; l'asse delle Y completa una terna ortogonale destrorsa e giace sul piano equatoriale 90° gradi ad Est dell'asse X; la terna cartesiana è solidale con la Terra. L'origine e gli assi delle coordinate sono anche il centro e gli assi dell'ellissoide associato al sistema, con l'asse Z come asse di simmetria dell'ellissoide.

Tabella 6 - Sistema di riferimento WGS84

Definizione
È costituito da una terna cartesiana OXYZ con origine nel centro di massa convenzionale della Terra ed asse Z diretto secondo l'asse di rotazione terrestre convenzionale. Alla terna è associato un ellissoide con centro nell'origine ed assi coincidenti con quelli della terna stessa (ellissoide geocentrico) Ellissoide: WGS84 • $a = 6\,378\,137$ • $f = 1/298.257223563$
Realizzazione globale
Rete di stazioni permanenti gestite dal DoD (Dipartimento della Difesa) USA Costellazione satelliti GPS
Realizzazione europea
Rete EUREF89 = ETRF89
Realizzazione italiana
Rete IGM95
Rappresentazione cartografica
Al sistema WGS84 non è associato ufficialmente alcun sistema cartografico, anche se è sempre più frequente l'adozione, già attuata dall'I.G.M., della UTM con inquadramento WGS84 (in analogia all'UTM-ED50), denominato UTM-WGS84 o, più correttamente, UTM-ETRF89

Nel definire tale ellissoide, denominato ellissoide WGS84, la Difesa statunitense decise di uniformarsi all'impostazione della "Unione Internazionale di Geodesia e Geofisica" che aveva portato all'adozione del sistema di riferimento geodetico GRS80 e venne scelto quindi un ellissoide biassiale, geocentrico ed equipotenziale. I parametri utilizzati per definire tale ellissoide sono il semiasse maggiore  $a$ , la costante gravitazionale  $GM$ , il coefficiente normalizzato zonale gravitazionale di secondo grado  $C_{20}$  e la velocità angolare della Terra  $\omega$ ; tali parametri coincidono con quelli dell'ellissoide GRS80 ad eccezione del coefficiente zonale di secondo grado che differisce dall'analogo coefficiente  $J_2$  proprio del GRS80.

Il sistema geodetico mondiale WGS84 è il sistema di riferimento adottato nel posizionamento mediante satelliti GPS.

La Sottocommissione EUREF dell'IAG (Associazione Internazionale di Geodesia) responsabile della realizzazione del sistema di riferimento europeo ha definito, per il continente europeo, il sistema di riferimento terrestre europeo (ETRS), ne ha curato la realizzazione (ETRF) nel 1989 e provvede ai suoi aggiornamenti annuali, comprensivi di integrazioni ed estensioni. Il sistema ETRF89 è una realizzazione del sistema WGS84.

A dispetto dei cartografi, la superficie terrestre non è assolutamente statica. Il monitoraggio continuo di satelliti orbitanti, prima di tutti quelli della costellazione GPS, indicano che l'attuale centro di massa della Terra è spostato di circa 2 metri rispetto a quello assunto nel WGS84. Inoltre i moti della placca tettonica ed altri fattori di origine astronomica conferiscono piccole velocità traslazionali e rotazionali ai punti delle stazioni di controllo. Le moderne tecniche di misura consentono d'individuare questi moti che generalmente sono minori di 10 cm per anno.

Nel sistema IERS il continente europeo mostra un movimento annuo di circa 3 cm in direzione Nord-Est, una quantità che potrebbe essere un disturbo per alcune applicazioni pratiche. Per evitare impraticabili variazioni annue nelle coordinate, l'EUREF ha adottato un sistema europeo, il cosiddetto ETRS89, che si muove insieme alla parte continentale stabile verso NE; ciò è stato fatto mantenendo fisse al valore 1989.0 le coordinate dei punti delle stazioni europee che contribuiscono all'IERS. In analogia all'IERS, la Sottocommissione EUREF pubblica ogni anno nuove e più precise realizzazioni dell'ETRS89, chiamate ETRF90, ETRF91, ecc.

Dal 1989 ad oggi, attraverso campagne annuali internazionali, la rete ETRF89 (fig. 9) è stata raffittita e progressivamente estesa verso Nord e verso Est, includendo oggi gran parte dei paesi dell'ex blocco orientale (ETRF96).

Il primo WGS84 fu definito sulla base delle posizioni di un insieme di stazioni TRANSIT (Doppler) e del confronto tra il riferimento DoD (*Department of Defense*) WGS72 già esistente ed il sistema CTS elaborato dal *Bureau International de l'Heure*. L'obiettivo principale era quello di allineare il sistema WGS84 (in termini di origine, scala e orientamento) con il sistema CTS (correva l'anno 1984). Successivamente tale allineamento è stato



affinato ed oggi c'è un nuovo WGS84 che, per la maggior parte delle applicazioni può essere considerato coincidente con il sistema ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Lo scostamento tra la nuova versione (assimilabile al nuovo set di coordinate delle 10 stazioni GPS del DoD) e l'ITRF è di ordine decimetrico, contro il metro della precedente realizzazione. Inoltre il livello di accordo tra il WGS84 e l'ITRF è costantemente monitorato da periodici calcoli sulle effemeridi condotti sia dalla NIMA (*National Imagery Mapping Agency*) che dall'IGS (*International Service for Geodynamics*). Questi confronti sono stati condotti su base giornaliera fin dall'inizio del 1994 ed hanno rivelato discordanze sulla posizione dell'origine inferiori a 15 cm, differenze sull'orientamento di circa 6 millisecondi d'arco e differenze di scala di 0.5 parti per milione. La versione migliorata del WGS84 è stata indicata con la sigla WGS84 (G730). La "G" indica che il miglioramento è stato tecniche GPS, mentre "730" indica il numero della settimana GE in cui si è reso disponibile presso la NIMA questo nuovo sistema di riferimento (il primo giorno della settimana 730 corrisponde al 2 gennaio 1994). A causa del movimento delle placche tettoniche e quindi anche delle stazioni solidali alla crosta terrestre, un certo set di coordinate di stazioni può essere associato solo ad una determinata epoca nel caso in cui si vogliono raggiungere precisioni assolute dell'ordine del decimetro. Per le placche tettoniche contenenti delle stazioni DoD si è riscontrato uno spostamento orizzontale massimo di 7 cm in un anno; nel caso peggiore, ignorare tali variazioni comporterà errori che nell'arco di 10 anni supereranno il mezzo metro su scala mondiale. Ora che la rete di riferimento per il GPS ha raggiunto un livello di accuratezza decimetrico, si rende necessario mantenere questo

Figura 9 - Stazioni GPS nel sistema EUREF



Figura 11 - La rete IGM95

livello di precisione e sicuramente occorrerà tenere conto del movimento delle placche tettoniche e degli effetti delle maree terrestri. Per quanto riguarda la realizzazione italiana del WGS84, cioè la rete WGS84 (fig. 11), è utile aggiungere alcune considerazioni. La rete è ora completata su tutto il territorio nazionale, è omogenea, ha distribuzione uniforme, è facilmente accessibile, ha coordinate WGS84 definitive e definitivi parametri di passaggio al sistema nazionale. Essa è stata concepita per rivoluzionare in brevissimo volger di tempo le metodologie d'intervento sulla rete geodetica, con il ricorso alle tecniche GPS. Dai risultati conseguiti e dalle riflessioni indotte, oltre che dalla necessità di utilizzare il patrimonio di dati geodetici e cartografici preesistenti viene lo stimolo a riesaminare il sistema Roma40. Infatti non vi è dubbio che approfondire la conoscenza delle caratteristiche della "vecchia rete" è la strada più corretta per un'efficace integrazione tra questa e la nuova rete e per l'individuazione delle possibili soluzioni al problema della trasformazione delle coordinate, o meglio al problema del cambiamento del sistema di riferimento. Non a caso si è detto "possibili soluzioni" e non "soluzione", giacché il cambiamento di datum, problema geodetico e non semplicemente geometrico, presenta una gamma di possibili soluzioni, tutte comunque sperimentali; gamma di possibili soluzioni in funzione di varie possibili ipotesi "a priori" su cui basare lo sviluppo delle soluzioni stesse. La combinazione della rete IGM95, realizzazione italiana del sistema WGS84, della rappresentazione UTM che vi è

associata, del modello di ondulazioni geoidiche e delle tecniche GPS, rappresenta il più consistente passo verso la precisione, la completezza, l'interscambiabilità e la piena utilizzazione delle informazioni territoriali.

Con lo sviluppo di questo modello praticamente unico, risulta finalmente possibile ed opportuno che tutte le carte riportino un unico sistema di riferimento ma purtroppo non è ancora così. Fare cartografia è un'operazione lenta e costosa e convertire le carte da un datum ad un altro non è semplice. Così le carte in circolazione sono tuttora riferite ai "vecchi" sistemi.

È comunque necessario affrontare il problema del cambiamento di datum.

Con i metodi di posizionamento satellitare si ottengono coordinate cartesiane in una terna geocentrica o coordinate geografiche riferite all'ellissoide geocentrico. Per trasformare tali coordinate nel sistema locale relativo alla zona in cui si sta operando è necessario ricorrere ad algoritmi con parametri determinati probabilisticamente, per poter adattare i risultati delle misure satellitari (in sé molto precisi) alle inevitabili deformazioni della rete che realizza il sistema locale.

Un qualsiasi ellissoide orientato localmente si discosta in modo notevole da quello geocentrico adottato nel sistema WGS84, non solo per i diversi parametri ma soprattutto per la posizione del centro e l'orientamento degli assi (fig. 12). Di conseguenza, le coordinate geografiche di uno stesso punto nel datum globale risultano sensibilmente diverse: gli scostamenti, tradotti in lunghezze, possono essere anche di parecchie centinaia di metri.

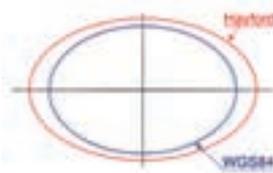
La tabella sottostante mostra le differenze dimensionali tra l'ellissoide del sistema geodetico italiano, identico a quello dell'ED50, ed il corrispondente WGS84.

Dunque l'ellissoide WGS84 è più piccolo sia nella dimensione equatoriale che in quella polare.

La figura 12 mostra schematicamente come le variazioni di dimensione e di origine si riflettono sulla latitudine geodetica o ellissoidica e sulle coordinate piane (gaussiane) Nord di un punto della superficie terrestre. Analoghe variazioni si verificano sulla longitudine ellissoidica e sulle coordinate Est.

La figura 13 mostra le variazioni di coordinate geografiche di alcuni punti tra sistema ED50 e WGS84 (facilmente traducibili in metri ricordando che alle nostre latitudini un secondo d'arco di parallelo varia da 21 a 25 metri, mentre un secondo d'arco di meridiano è praticamente costante e vale circa 31 m), unitamente alle corrispondenti variazioni di coordinate piane.

Dal confronto tra le coordinate geografiche rischia di scaturire una considerevole confusione sulle variazioni delle coordinate piane definibili con l'adozione della rappresentazione di Gauss.



Sistema	a [m]	b [m]
Nazionale	6 378 388	6 356 911.95
WGS84	6 378 137	6 356 752.31
ED50	6 378 388	6 356 911.95

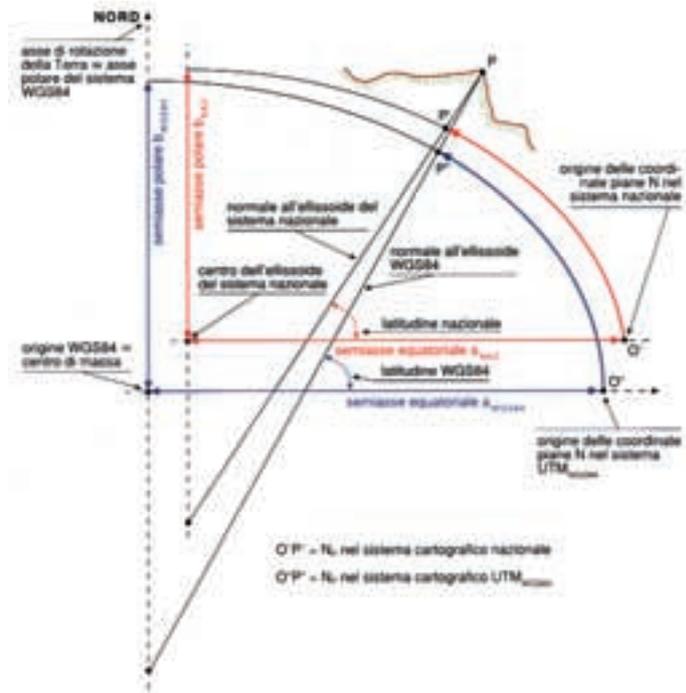
Infatti gli scostamenti in coordinate gaussiane non sono gli stessi dei valori lineari degli scostamenti in coordinate ellissoidiche!! Ciò perché la lunghezza dell'arco sotteso da un grado di latitudine o longitudine dipende dalla dimensione dell'ellissoide, ma ancor più perché cambia il punto origine. È dunque vitale fornire all'utente l'informazione completa e la formazione necessaria alla comprensione del problema.

Per trasformare le coordinate geografiche e piane da un sistema ad un altro necessario applicare ad ogni punto delle variazioni  $\Delta E$  e  $\Delta N$ ,  $\Delta \varphi$  e  $\Delta \lambda$  che, per l'origine che hanno, fondate sulle misure e quindi affette da errori, sono funzioni del punto: cioè gli spostamenti da applicare a ciascun punto variano con la posizione. Sta in ciò una profonda analogia con la teoria del modulo di deformazione nelle rappresentazioni cartografiche; esso varia infatti, in generale, con il variare del punto ed al variare della direzione, secondo la ben nota legge dell'ellisse di Tissot. In questo caso però non è dato di conoscere la legge di variazione, se non empiricamente ed in modo discreto, così come empiricamente e in modo discreto è conoscibile la metrica dei due sistemi.

Le variazioni metriche delle coordinate geografiche sono sempre molto differenti dalle corrispondenti variazioni di coordinate gaussiane.

Per la cartografia a piccola scala si può calcolare una coppia di variazioni medie da apportare alle coordinate cartografiche senza introdurre errori significativi. Ad esempio per la cartografia alla scala 1: 50.000 le differenze tra i valori medi per elemento cartografico e i valori veri all'interno non sono significativi per la maggior parte delle applicazioni, poiché generalmente quelle carte consentono, ad esempio, la digitalizzazione di particolari con una precisione tra  $\pm 10$  e  $\pm 15$  m. Sarebbe allora relativamente facile determinare le variazioni di coordinate piane e geografiche per ciascuno dei 634 fogli (e per i sottomultipli 1:5.000 e 1:10.000). È un lavoro in fase di avanzata attuazione presso la Direzione Geodetica dell'I.G.M. e sarà disponibile al più tardi entro il 1998. Naturalmente, a più lungo termine, si potrebbero modificare le note marginali indicando sulle carte le correzioni necessarie per trasformare le coordinate dei prodotti grafici e di quelli digitali nell'appropriato sistema di riferimento. A regime è poi auspicabile che sulla carta sia stampato il solo reticolato chilometrico UTM-WGS84 e sul bordo i contrassegni per la costruzione del reticolato geografico, lasciando eventualmente alle note marginali le informazioni sulle relazioni con i precedenti sistemi di riferimento geodetici (Roma40 e ED50) e cartografici (Gauss-Boaga e UTM-ED50).

Quanto sopra vale per il recupero delle informazioni territoriali esistenti e riferite al sistema nazionale. Per le operazioni d'inquadramento geodetico il problema è diverso e più complesso. La trasformazione fra due diversi datum locali in una stessa area (ad esempio tra quello della rete nazionale e quello della rete catastale) viene spesso eseguita con metodi empirici o comunque con criteri semplificati, basati sul fatto che le due superfici di riferimento, seppur diverse, sono molto vicine tra di loro, e la principale differenza è quella di orientamento.



L'ipotesi di cui sopra viene meno nel caso della trasformazione tra un sistema geocentrico globale come il WGS84 e un sistema geodetico locale: le due superfici ellissoidiche in questo caso sono notevolmente distanziate (di decine di metri) ed è necessario ricorrere ad algoritmi di trasformazione più generali.

Il cambio di datum è prepotentemente salito alla ribalta con il GPS: in pratica, è necessario che il rilievo GPS comprenda alcuni punti noti nel "vecchio" sistema geodetico in cui il rilievo stesso va inquadrato; è così possibile calcolare i parametri della trasformazione validi per la zona. Per effetto delle distorsioni non eliminabili che caratterizzano le reti geodetiche (specie quelle meno recenti), la stima dei parametri risulta più o meno approssimata. La trasformazione di datum è quindi fonte d'incertezze che si sovrappongono a quelle di misura (molto basse con il GPS).

Un metodo di trasformazione fondato su chiari presupposti teorici è quello basato su una rototraslazione nello spazio. La rototraslazione semplice inserisce un rilievo GPS in una rete geodetica preesistente variandone solo l'orientamento complessivo (nello spazio) senza modificare le posizioni relative dei punti. La precisione intrinseca del rilievo GPS non viene quindi degradata dalla trasformazione. Nella pratica, come già si è

Figura 12 - Sezione meridiana sul meridiano centrale del fuso



Differenze (sistema ED50 - sistema WGS84)					
N	247904	102901	149801	196902	249901
$\Delta \varphi$ (")	3,446	3,643	3,436	3,345	4,219
$\Delta \lambda$ (")	3,861	3,707	3,275	3,219	2,542
$\Delta \varphi$ (m)	-107	-113	-113	-110	-126
$\Delta \lambda$ (m)	-81	-82	-76	-67	-64
$\Delta N$ (m)	186,92	186,74	187,59	181,49	182,86
$\Delta E$ (m)	80,57	79,77	84,00	89,87	57,41

Fonte: IG

Figura 13

accennato, occorre tener conto che ogni *datum* è in realtà realizzato dalla rete geodetica ad esso associata, e risente quindi degli errori di misura e dei conseguenti errori di orientamento e di scala che producono distorsioni e deformazioni della rete stessa. Il modello teorico della rototraslazione (trasformazione a sei parametri), che funzionerebbe perfettamente se le reti fossero prive di errori, deve essere modificato, introducendo parametri aggiuntivi (in generale un fattore di scala) che permettano di modellare in qualche modo le imperfezioni delle reti. La rototraslazione pura è applicabile solo quando la rete preesistente, in cui il rilevamento GPS viene inserito, presenta distorsioni modeste, altrimenti l'approssimazione diventa inaccettabile; essa è invece da applicare, ad esempio, quando la finalità primaria della rete non sia cartografica ma ingegneristica (progettazioni e costruzioni di infrastrutture) o di monitoraggio di movimenti e necessita quindi di sfruttare a pieno la precisione del GPS. Per applicazioni cartografiche a piccola scala, ad esempio per le carte utilizzate nella navigazione marittima ed aerea, in cui i requisiti di precisione sono bassi, si possono a volte trascurare le rotazioni tra i due sistemi realizzando una traslazione semplice (trasformazione a 3 parametri).

Poiché generalmente in un sistema locale sono disponibili ellissoidiche  $\varphi$  e  $\lambda$  (latitudine e longitudine), la quota geoidica  $H$  ed eventualmente, ma con minor affidabilità e precisione, la quota ellissoidica  $h$  (data dalla somma di  $H$  con l'ondulazione geoidica  $N$ ), è opportuno anzitutto esprimere il modello di trasformazione in funzione del suddetto tipo di coordinate. A tale scopo si rivelano adatte le ben note formule di Molodenskij che consentono di scindere i contributi dei punti noti solo in planimetria da quelli noti solo in quota (vedi M. Pierozzi in Bollettino di Geodesia e Scienze Affini n° 1, 1989, pp. 45-55).

Per ottenere una migliore approssimazione e tener conto delle distorsioni e delle deformazioni delle reti, il procedimento più frequentemente adottato consiste nell'introdurre un fattore di scala (settimo parametro) nella trasformazione. La rototraslazione con fattore di scala è detta anche trasformazione di similarità o conforme in quanto mantiene invariati gli angoli delle figure nello spazio (giacenti su piani variamente inclinati) e quindi la forma delle figure che costituiscono il rilievo originario, variandone la scala complessiva e l'orientamento per adattarlo alla rete in cui viene inserito.

L'introduzione di un fattore di scala si basa sull'ipotesi che sia associabile un modello di deformazione isotropa costante per tutta la zona. Se la situazione si discosta da questa ipotesi, il modello riduce la propria validità e le opzioni possibili sono solo due:

- cambiamento di modello con l'introduzione di ulteriori,
- scomposizione della zona in porzioni dove il modello iniziale sia sufficientemente giustificato.

Aumentare il numero dei parametri della trasformazione per cercare di modellare meglio le distorsioni della rete è operazione che va eseguita con cautela e cercando di non perdere di vista il significato geometrico della trasformazione stes-

sa. In sostanza bisogna evitare una "sovrapparametrizzazione", che porta solo apparentemente a buoni risultati. Aumentando il numero dei parametri da stimare (passando ad esempio da espressioni lineari a formule polinomiali) i residui sui punti noti utilizzati per la *stima dei parametri* divengono in genere minori; non è detto, però, che il modello si comporti altrettanto bene per altri punti non considerati nel calcolo dei parametri.

È necessario subito osservare che almeno due fattori diversi concorrono a rendere in linea di principio poco significativi i parametri così stimati: da una parte l'introduzione delle quote geoidiche  $H$  in luogo di quelle ellissoidiche, normalmente non disponibili nel sistema locale, che costituisce una violazione delle ipotesi del modello adottato; dall'altra una notevole correlazione risultante fra i sette parametri, se stimati, come sempre accade, per zone di estensione limitata in rapporto alle dimensioni degli ellipsoidi di riferimento dei due sistemi (problema geometricamente mal condizionato).

D'altra parte l'eccessiva correlazione fra i parametri ha un'influenza negativa essenzialmente sulla significatività geometrica degli stessi e non sull'efficacia nel loro impiego per il passaggio fra i due sistemi di riferimento all'interno delle piccole zone che li hanno generati.

Per quanto riguarda le quote il risultato può essere migliorato introducendo per le ellissoidiche una loro stima ottenuta correggendo quelle geoidiche con i valori di separazione ( $N$ ) approssimati di cui oggi siamo in possesso; una più approfondita conoscenza del geoide, auspicabile in un prossimo futuro, migliorerà la situazione.

Nella maggior parte delle campagne di misura GPS eseguite in Italia, inserendo il rilievo ottenuto nelle reti nazionale e catastale, si sono ottenuti residui massimi dell'ordine dei 15-20 cm, accettabili per operazioni di raffittimento a scopo cartografico o per lavori di aggiornamento catastale.

Le esperienze sinora eseguite hanno comunque mostrato che, a causa delle distorsioni delle "vecchie" reti trigonometriche, la trasformazione di *datum* risulta sempre critica. Quei 15-20 cm sono un limite invalicabile...

Lo sfruttamento delle metodologie GPS nel contesto dei riferimenti locali è possibile dunque solo eseguendo un passaggio tra sistemi che, anche se condotto nel modo migliore, peggiora la qualità delle determinazioni realizzate in WGS84. Per ottenere risultati accettabili nei termini sopra detti, è necessario suddividere il territorio in zone di estensione abbastanza limitata e determinare un set di parametri per ogni zona. Nei parametri, in sostanza, si "scaricano" prevalentemente le distorsioni locali della rete, ma il risultato della trasformazione (cioè le coordinate nel sistema locale che da essa si ottengono) è in genere buono e omogeneo con la rete. Calcolando la trasformazione per zone molto ampie la significatività dei parametri risulta migliore (nel senso che i parametri esprimono meglio gli effettivi scostamenti traslazionali e di orientamento tra i due sistemi geodetici) ma i