

GEOforUS

*Geography & Technology Network
di Giovanni Biallo*

LA GEOREFERENZIAZIONE DELLE INFORMAZIONI TERRITORIALI

di
Luciano Surace

Articolo estratto da:
GEOforUS - Geography & Technology Network

il social network dedicato al mondo delle tecnologie geografiche
a cui tutti partecipano proponendo e pubblicando articoli e news

pubblicato su www.geoforus.it da gennaio 2010

LA GEOREFERENZIAZIONE DELLE INFORMAZIONI TERRITORIALI

Premessa

La cartografia è stata una delle prime manifestazioni di civiltà. Essa si è evoluta da forme primitive di disegno fino a carte accuratissime e raffinate, dapprima in formato analogico e oggi in forma digitale. Le caratteristiche fondamentali delle carte - così come dei Sistemi Informativi Geografici e Territoriali - sono il contenuto, l'attualità e la precisione. Il contenuto dipende in larga misura dalla scala e l'attualità dalla data del rilevamento, mentre la precisione ci dice quanto bene sono georeferenziati o georeferenziabili i particolari in un predefinito sistema di riferimento.

La variegata gamma di possibili approcci al problema dell'acquisizione e della gestione delle informazioni territoriali scongiurerebbe il tentativo di definire in forma esaustiva cosa debba intendersi con il termine georeferenziazione, uno dei tanti neologismi con cui l'era dell'informazione globale ci costringe a convivere. Una possibile definizione che privilegia l'approccio topografico e metrologico, oggettivamente prevalente, finalizzata alla comprensione di quanto sarà sviluppato nel presente lavoro, consiste nell'intendere come georeferenziazione delle informazioni territoriali quel complesso di attività che consentono di stabilire una serie di corrispondenze biunivoche tra:

- un'informazione territoriale, intesa come categoria informativa, inserita o da inserire in un sistema informativo di definita risoluzione;
- il fenomeno territoriale attraverso cui si manifesta e/o si materializza l'informazione;
- l'epoca del rilevamento del fenomeno;

- la stima della posizione spaziale che compete al fenomeno, definita da una sequenza di coordinate di affidabilità nota, in un assegnato sistema di riferimento.

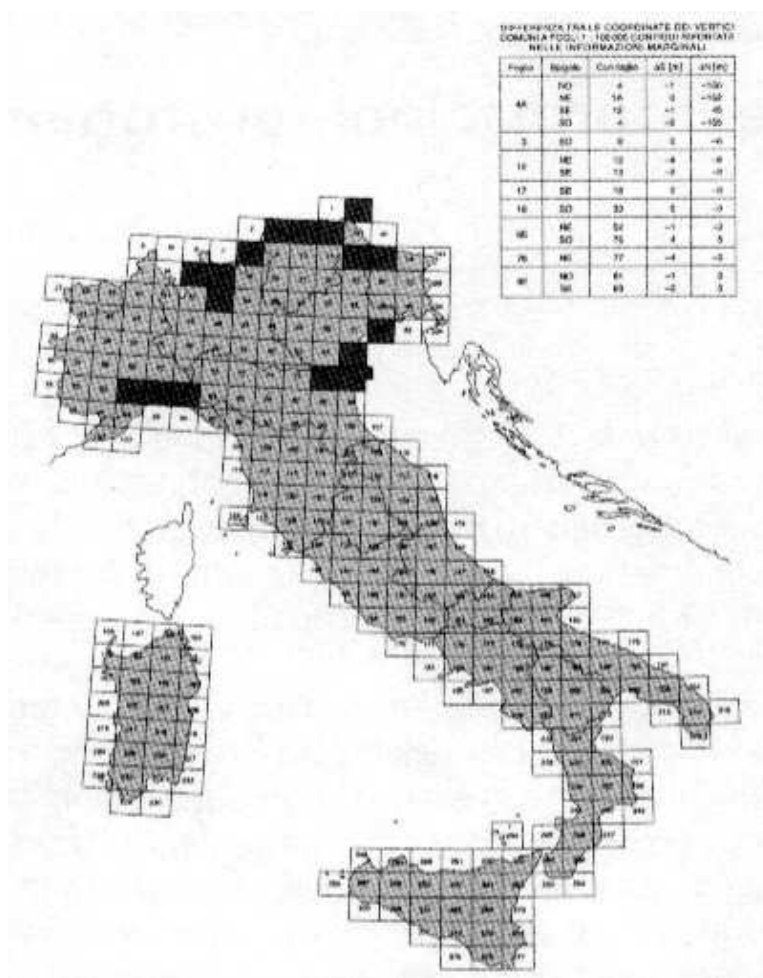
Di quest'ultimo punto è necessario esaminare in dettaglio ed in profondità gli aspetti noti e meno noti, per consentire agli utenti di informazioni territoriali georeferenziate di muoversi senza ambiguità ed incertezza tra coordinate e sistemi di riferimento.

Introduzione

Nel passato l'interesse verso i sistemi di riferimento in cui era inquadrata la cartografia e verso le coordinate presenti sulle carte era limitato agli scienziati ed ai costruttori di carte, mentre l'utente era interessato solo al posizionamento relativo in un ambito locale (...molto locale... :spesso solo l'area contenuta nel singolo elemento cartografico!).

Un classico esempio di questo approccio sono le rappresentazioni policentriche del Catasto italiano e della Carta d'Italia alla scala 1:100.000.

D'altra parte l'attenzione all'utente nel fornire strumenti per una georeferenziazione "assoluta" era praticamente nulla: ne è prova la presenza particolarmente elevata di errori nelle coordinate dei vertici degli elementi cartografici riportate a margine delle carte ed evidentemente poco controllate sia dai compilatori che dagli utenti, così poco da ripetersi fedelmente in varie successive edizioni e ristampe.



La verità è che le coordinate avevano in effetti scarso interesse anche perché scadente era la cultura sulla loro utilità: ancora in piena epoca di cartografia grafica, le coordinate sono solo un mezzo per giungere all'impianto della cartografia, non un'informazione di valore autonomo da sfruttare da parte dell'utilizzatore. Le carte tradizionali sono storicamente state usate da una vasta gamma di utenti, dalle organizzazioni militari ai servizi di polizia, dalla protezione civile agli enti che gestiscono le risorse naturali e artificiali, da chi si occupa di sviluppo e di pianificazione fino ai cacciatori ed ai pescatori, dagli alpinisti agli escursionisti e dalle tante altre categorie di persone che richiedono continuamente accurate informazioni territoriali e geografiche.

Oggi, con l'aumento vertiginoso delle informazioni che vengono raccolte e rese disponibili in svariate forme di banche dati, il ruolo prevedibile dei sistemi di rilevamento, di rappresentazione e dei sistemi informativi geografici, è imponente. Tutti coloro che si occupano di tali sistemi evidenziano sistematicamente la necessità di una base geometrica omogenea, estesa a tutto il territorio nazionale. L'omogeneità richiesta si riferisce ovviamente in primo luogo all'adozione di un unico sistema di coordinate. Un efficace ed esplicito sistema di riferimento è dunque strumento indispensabile per un appropriato e corretto uso delle informazioni territoriali.

Accade oggi che tanti utenti di carte non conoscitori di coordinate diventino utenti di coordinate, non conoscitori dei sistemi di riferimento. D'altra parte i processi di globalizzazione nel trattamento delle informazioni impongono l'adozione di un unico sistema di riferimento e le metodologie di acquisizione delle informazioni di posizione lo consentono.

Con la crescita delle applicazioni riferite ad osservazioni satellitari, il sistema di riferimento globale assume un'importanza sempre maggiore sia nel settore della navigazione terrestre, marittima ed aerea, che nel campo cartografico e geodetico. Soprattutto una sua corretta realizzazione consente di poter mettere in relazione dati riferiti a sistemi di riferimento locali riducendoli tutti ad un sistema comune: sostituendo tanti sistemi di riferimento locali con uno globale è possibile far uso in maniera estremamente semplificata sia di prodotti cartografici che geodetici.

L'avvento della cartografia numerica e del posizionamento satellitare impongono dunque una revisione dei sistemi di riferimento in uso e la loro sostituzione con un unico sistema appropriato, completo e d'immediata utilizzazione anche da parte di chi non abbia approfondite conoscenze geodetiche.

L'Italia è peraltro uno dei paesi più ricchi di sistemi di coordinate. Fattori contingenti hanno sicuramente determinato questo stato di cose, ma anche la mancanza di una visione globale ritenuta a suo tempo non essenziale, o meglio la persistenza utilitaristica di una visione provinciale dei problemi del rilevamento. La mancanza di standard nelle convenzioni può portare ad errori ed equivoci ad alto rischio e la mancanza di omogeneità nei sistemi di riferimento in uso può indurre ad una visione catastrofica della situazione cartografica nazionale, ma la confusione non è una caratteristica solo italiana: le considerazioni delle forze armate USA dopo la guerra del Golfo hanno evidenziato che c'è stata una confusione totale su sistemi di riferimento, ellissoidi e reticolati. La lezione principale è stata che bisogna sapere ciò che si fa e che non si può pretendere che ogni utente sia un geodeta.

Nel Pacifico ciascuna compagnia petrolifera ha propri parametri di trasformazione dal WGS84 al sistema locale, cosicché punti posti al confine delle aree di rispettiva competenza hanno coordinate che differiscono anche di centinaia di metri. Ciò vuol dire che una ditta di rilievi usa uno stesso punto ben materializzato per differenti clienti, ma deve usare per quel punto differenti coordinate per ciascun cliente. Lo stesso accade per i confini di stato su terra; tragica è poi la delimitazione delle acque territoriali e degli spazi aerei.

L'ellissoide di Everest (1830) è un classico esempio da cui scaturisce confusione: definito originariamente in *piedi* da George Everest per i rilievi dell'India, successivamente trasformato in *metri* per mezzo di differenti fattori di conversione e quindi "pseudo-clonato", dà luogo a differenti coordinate per gli stessi punti in sistemi di riferimento che formalmente appaiono gli stessi (stesso ellissoide e stesso orientamento), salvo scoprire, approfondendo l'analisi di documentazione non sempre disponibile, che le dimensioni dell'ellissoide di riferimento, univocamente definite all'origine, sono diverse in funzione di chi ha operato il cambiamento di unità di misura.

Altrettanta confusione è riscontrabile tra i sistemi cartografici.

La potenzialità di un sistema informativo è basata soprattutto sulla possibilità di correlare informazioni di vario tipo secondo logiche flessibili e adattabili alle specifiche esigenze dell'utente. La particolarità dei sistemi informativi geografici consiste nel fatto che le informazioni, oltre ad avere una definizione quantitativa e/o qualitativa intrinseca, sono anche collocate spazialmente, cioè definite con affidabilità nota nella loro posizione spaziale rispetto ad un sistema di riferimento unificato. È allora intuitivo che uno dei più immediati e potenti strumenti di correlazione tra le informazioni è certamente costituito dalle coordinate che a ciascuna informazione vengono assegnate per definirne la posizione e attraverso cui si possono determinare relazioni di vicinanza, influenza, conflitto, appartenenza e così via. Tale potere di correlazione è pienamente sfruttabile se, prima dell'immissione delle informazioni, è stato correttamente definito il sistema di riferimento. Solo a tali condizioni la correlabilità spaziale tra dati qualitativi potrà diventare strumento efficace di ricerca ed interrogazione; e solo a tali condizioni si potrà sfruttare compiutamente l'ingente patrimonio di dati territoriali già acquisito e consegnato dall'opera dei rilevatori agli archivi cartacei (cartografici e alfanumerici).

Infatti, comunque si articoli l'interazione tra utente e sistema informativo, essa non può non partire dalle domande elementari del dove (cioè in corrispondenza di quali coordinate si trovi un elemento informativo presente nel sistema o vada inserita una nuova informazione) e/o del cosa (cioè quali e quanti elementi informativi ricadono totalmente o parzialmente in una data area geografica definita da una sequenza di coordinate).

Il problema base della georeferenziazione è dunque la determinazione di posizione e la valutazione della relativa affidabilità; è l'attività fondamentale del Topografo, propedeutica a tutti gli altri campi di applicazione. Essa può essere considerata un fine per quella figura professionale, di modesto interesse per altri (fino ad alcuni anni or sono). Lo scenario è in rapido e profondo mutamento ...

Risulta dunque necessario esaminare i problemi posti dall'esistenza, storicamente consolidata, di differenti sistemi di riferimento rispetto ai quali sono referenziati i dati territoriali, ma tra i quali è spesso difficile, e talvolta impossibile, istituire delle metodologie di trasformazione generalizzate.

I parametri che descrivono compiutamente il sistema di riferimento e la rappresentazione cartografica adottata dovrebbero essere le informazioni minime di corredo quando lo strumento "coordinate" viene offerto all'utente, sia in forma analogica che digitale. Solo tali parametri consentono di definire univocamente a che cosa le coordinate sono associate nel mondo reale. Purtroppo molte istituzioni e molti istituti in giro per il mondo non sembrano capaci di fornire tali informazioni ai propri utenti o d'impartire questo elementare insegnamento ai propri studenti: forse tentano di trattenere in loro dominio il mistero della conoscenza? No, piuttosto accade, come per le cose più comuni della vita, che mai ci si chieda come esse abbiano avuto origine, chi le abbia fatte e con quali mezzi e di quale travaglio esse siano il frutto; quasi fossero sempre esistite. Sono queste le cose che, per essere le più familiari e indispensabili, e continuamente sottomano, non stimolano in noi la molla della sorpresa a sollecitare la curiosità di sapere. Alcune di queste cose tanto familiari e indispensabili mi pare siano proprio la carta topografica e le coordinate, che ognuno di noi ha da sempre tra le mani; esse risultano per molti come un diritto acquisito e fondamentale del quale non occorre ricercare l'origine, così come mai ci si preoccupa delle cose più evidenti e naturali.

Sistemi di riferimento: definizione, realizzazione e utilizzazione

La definizione e la realizzazione di sistemi di riferimento appropriati per il posizionamento sono da sempre considerati un problema fondamentale della geodesia. Infatti la determinazione di precisione di punti sulla superficie terrestre è uno dei principali obiettivi di questa scienza e "i punti" costituiscono il servizio più tangibile fornito dalla geodesia alla collettività.

Nella storia della scienza la geodesia è una delle discipline più antiche. Essa ha obiettivi sia scientifici che operativi. Uno degli obiettivi scientifici fondamentali è la determinazione delle dimensioni e della forma della Terra, insieme allo studio del campo gravitazionale terrestre e delle relative variazioni temporali.

La geodesia operativa conduce invece le misure e i calcoli necessari per la descrizione geometrica della superficie della Terra.

Il suo scopo principale è dunque la determinazione di coordinate. In tale ambito operativo è bene non dimenticare che esiste un'esigenza di rendimento e quindi di economia; un certo livello necessario di precisione deve essere raggiunto, ma non superato, pena il rischio di compromettere la rapidità d'esecuzione e l'economia di realizzazione. La determinazione delle posizioni è stata tradizionalmente scissa in due componenti: verticale e orizzontale. Ciò ha implicato che nel contesto classico sono definiti due sistemi di riferimento geodetico. In effetti il campo di variabilità della componente verticale è di gran lunga più piccolo rispetto a quello della componente orizzontale: in un modello in scala della Terra, costituito da un globo del diametro di 2 metri (scala 1:6.000.000 circa), l'Everest è alto poco più di 1 mm, appena percepibile al tatto.

La Terra somiglia molto ad una sfera, ma in realtà non lo è: considerarla tale è un'approssimazione che può essere utile in certi casi, ma troppo grossolana per la maggior parte delle applicazioni. La superficie fisica della Terra è invece molto vicina a quella di un ellissoide di rotazione, cioè un ellissoide biassiale, di forma e dimensioni assegnate attraverso due parametri, e di posizione spaziale definita attraverso sei parametri. La superficie ellissoidica è regolare e facilmente trattabile dal punto di vista matematico e proprio per questo è diffusamente usata come superficie di riferimento per le coordinate planimetriche. Invece l'ellissoide è molto meno sfruttabile come superficie di riferimento per le coordinate altimetriche in quanto priva di significato fisico; al suo posto è utilizzato il geoide, definito come superficie equipotenziale nel campo della gravità che meglio approssima il livello medio del mare, anche se non coincidente con esso.

Una superficie di riferimento deve avere due caratteristiche:

- essere matematicamente trattabile;
- essere fisicamente individuabile con facilità.

La seconda caratteristica è facilmente riscontrabile nelle superfici equipotenziali del campo della gravità, almeno per quanto riguarda il loro orientamento locale, essendo in ogni punto ortogonali alla direzione del filo a piombo; il geoide, che è una di queste superfici, non possiede però la prima caratteristica, che invece è propria dell'ellissoide biassiale.

Da ciò è discesa storicamente la dicotomia tra superficie ellissoidica, matematicamente trattabile con facilità, non individuabile fisicamente quindi senza significato fisico, cui

affidare il posizionamento planimetrico, e superficie geoidica, fisicamente riproducibile e fisicamente significativa, ma matematicamente intrattabile in forma chiusa, cui delegare il compito di riferimento fondamentale per le quote. Da questo dualismo di superfici di riferimento è poi discesa la separazione delle coordinate in planimetriche ed altimetriche, la separazione delle misure angolari in azimutali e zenitali, la separazione della rappresentazione cartografica in contenuto planimetrico e contenuto altimetrico. Una carta topografica è in realtà la rappresentazione bidimensionale di due distinte superfici a curvatura totale non nulla: l'ellissoide, su cui si proiettano i punti della superficie fisica oggetto del rilevamento planimetrico, ed il geode, definito in modo discreto attraverso le quote dei punti oggetto del rilevamento altimetrico.

Oggi con le determinazioni satellitari lo scenario è profondamente mutato: la crescente precisione di queste tecniche richiede in primo luogo un equivalente incremento di precisione nei sistemi di riferimento. In secondo luogo in geodesia satellitare i sistemi di coordinate sono per loro natura globali, geocentrici e tridimensionali, poiché il moto dei satelliti fa riferimento al centro di massa della Terra. Le misure terrestri sono invece per loro natura locali e sono normalmente riferite a sistemi locali. Una prima analisi potrebbe indurre ad ipotizzare, proprio alla luce di questi mutamenti, un facile superamento della dicotomia storica tra geode ed ellissoide: purtroppo l'unificazione dei sistemi di riferimento planimetrico ed altimetrico è possibile solo quando non interessi una caratteristica non esplicitamente indicata tra le due condizioni prima esposte (trattabilità matematica ed individuabilità fisica): la significatività fisica. Esistono vasti campi di applicazione in cui tale condizione è verificata ed in tal caso l'ellissoide biassiale geocentrico garantisce (solo esso e solo ora con l'avvento delle metodologie satellitari) facile trattabilità matematica e facile individuabilità fisica, cioè facile ed affidabile riproducibilità, attraverso la diretta e precisa determinazione di coordinate geocentriche (cartesiane o ellissoidiche). Sta in ciò il poderoso salto di qualità nel passaggio agli ellissoidi locali ad un ellissoide geocentrico.

Purtroppo però, nella maggior parte delle applicazioni è necessaria una terza caratteristica, la significatività fisica, che in questo contesto vuol dire la capacità dell'informazione di posizione di denunciare al meglio possibile le differenze di potenziale della gravità.

Questa caratteristica non è posseduta dalle coordinate ellissoidiche o cartesiane fornite dai metodi di posizionamento satellitare, perché i sensori di posizione, cioè i satelliti, peraltro troppo lontani dalla superficie terrestre per risentire delle variazioni del campo della gravità nella misura che a noi interessa, forniscono all'utente finale solo un'informazione geometrica. Ecco dunque che, con diverse motivazioni, resta al momento immutata l'esigenza del geode (cui riferire la posizione altimetrica) e dell'ellissoide (cui riferire quella planimetrica).

La novità, parziale, sta comunque nel fatto che fino a ieri, avendo fissato una coppia di sistemi di riferimento locali capaci di eliminare la deficienza di rango implicita nelle misure di grandezze relative, si passava dalla misura di grandezze geometriche (distanze, angoli, direzioni, dislivelli) al calcolo della posizione relativa rispetto ad un punto di coordinate note in quanto fissate in un sistema di riferimento scelto convenzionalmente in funzione di esigenze locali e quindi variabili nello spazio e nel tempo.

Oggi si ottengono direttamente coordinate rispetto ad un sistema fissato con una definizione pur sempre convenzionale, ma legata alla realtà fisica (origine del sistema coincidente con il centro di massa e asse Z orientato al polo medio), non variabile dall'utente e condivisa internazionalmente.

La posizione geografica di un punto sulla Terra può dunque essere definita come la sua posizione relativa ad una superficie di riferimento utilizzata in sostituzione della reale forma della Terra. Le superfici di riferimento più spesso utilizzate sono la sfera, l'ellissoide biassiale ed il geode (superficie equipotenziale del campo gravitazionale della Terra). Le prime due hanno una definizione puramente geometrica e sono alternative, la terza ha una definizione fisica ed è associata alle altre per la determinazione più utilizzata delle quote.

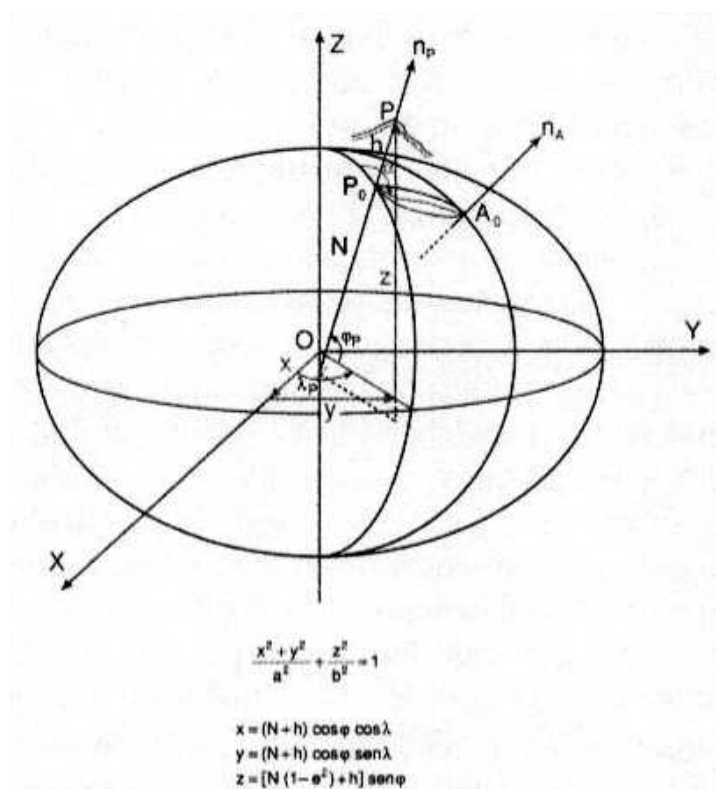
La posizione è solitamente definita per mezzo di una coppia di coordinate curvilinee come la latitudine, la longitudine e l'altezza sopra la superficie di riferimento. In questo senso si parla talvolta di posizionamento a (2 + 1) dimensioni.

È consuetudine corretta e necessaria distinguere tra coordinate sferiche, ellissoidiche e geoidiche, a secondo che siano utilizzate rispettivamente la sfera, l'ellissoide o il geode come superfici di riferimento. Le coordinate ellissoidiche sono anche dette geodetiche, mentre le geoidiche sono le coordinate astronomiche.

In accordo con questa interpretazione il termine "coordinate geografiche" è un termine generale che include i tre tipi menzionati sopra.

Superfici di riferimento

La superficie quadrica sulla quale tutte le curve d'intersezione con i piani sono ellissi è chiamata ellissoide. Dal punto di vista geodetico è consuetudine distinguere tra ellipsoidi rotazionali o biassiali ed ellipsoidi triassiali.



L'ellissoide biassiale (Figura 2) è generato dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo asse minore ed è definito da due parametri, ad esempio dalla lunghezza dell'asse minore e dell'asse maggiore, oppure dall'asse maggiore e da una quantità ausiliaria dipendente dai due semiassi. L'ellissoide triassiale è definito da tre parametri, ad esempio dalla lunghezza dei tre assi mutuamente ortogonali. Il più utilizzato come superficie di riferimento è l'ellissoide di rotazione.

figura 2 – Ellissoide biassiale

La forma del geoide (Figura 3a-b) dipende dalla distribuzione irregolare delle masse all'interno della Terra e non può essere descritta da un'equazione matematica chiusa come l'ellissoide; quindi, in senso convenzionale, essa è considerata una superficie fisica piuttosto che matematica. Le sue proprietà fondamentali, dalle quali dipendono tutte le altre, sono che il potenziale W del campo di forza della gravità è costante su di essa e che la linea di forza, cui è tangente in ogni punto la verticale, è perpendicolare ad essa ovunque.

La tangente alla linea di forza coincide con la direzione della gravità e il geode è una superficie liscia senza lacerazioni o discontinuità.

Punti con la stessa latitudine o longitudine geoidica (astronomica) sono situati rispettivamente sullo stesso parallelo e meridiano geoidico (astronomico).

Queste curve non sono né circonferenze né ellissi, come sulla sfera o sull'ellissoide, ma sono linee non piane né regolari (Figura 3c).

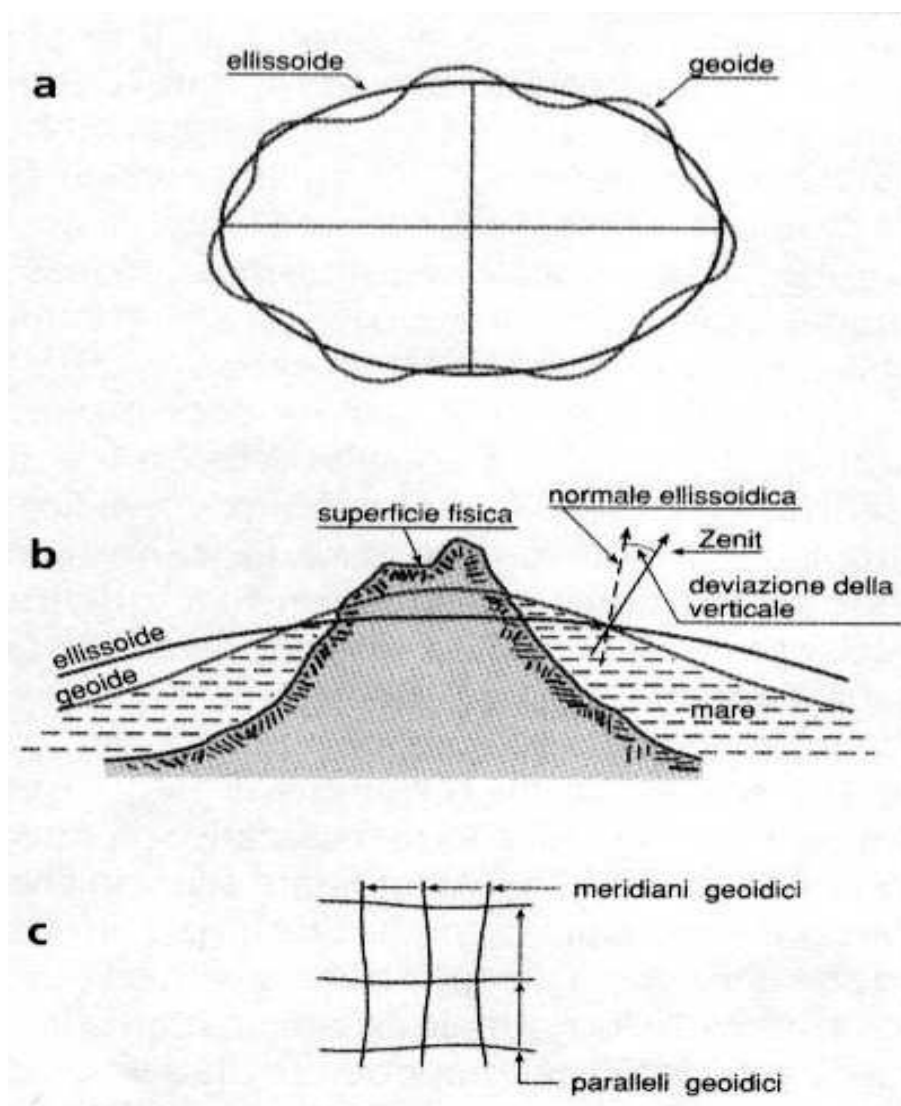


figura 3 – il Geode

Il sistema di riferimento planimetrico

La definizione di superfici di riferimento uniche per tutta la Terra, oggi indispensabile per l'utilizzo delle metodologie satellitari, è stata in passato di scarso interesse e di difficile realizzazione, a causa del carattere essenzialmente locale delle tecniche classiche di rilievo geodetico e topografico. Per questo motivo ci troviamo oggi ad avere nel mondo molti sistemi geodetici locali definiti storicamente con l'intento di ottenere una buona approssimazione unicamente nelle aree di interesse. Considerando, come si è già detto, che il problema della determinazione dei punti è stato tradizionalmente affrontato, dalla geodesia classica, scindendo nettamente la parte altimetrica da quella planimetrica, troviamo normalmente due superfici di riferimento definite in maniera diversa in ogni nazione: un geoide e un ellissoide locali.

Prima dell'avvento dei sistemi di posizionamento satellitare non sarebbe stato possibile realizzare ed utilizzare sistemi geocentrici. I sistemi di coordinate geodetiche locali, con ellipsoidi di riferimento scelti per approssimare la forma della Terra al meglio in una determinata regione (Figura 4), erano e sono ancora utilizzati in molti paesi.

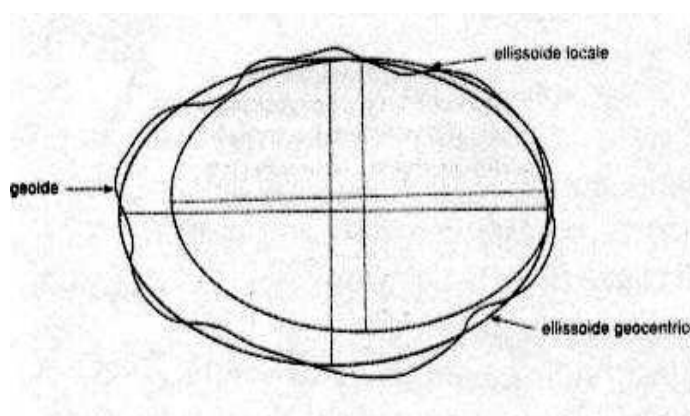


figura 4 – Ellipsoidi di riferimento scelti per approssimare la forma della Terra

Esistono più di 150 di tali sistemi e talvolta le carte hanno più di un reticolato ed ogni reticolato si riferisce ad un differente sistema di riferimento o, come si denominerà nel seguito, ad un differente datum.

Un datum "planimetrico" è il modello matematico della Terra che usiamo per calcolare le coordinate geografiche dei punti. Esso può essere definito rigorosamente come un complesso di prescrizioni ed un complesso di misure tali che le prescrizioni eliminano esattamente le deficienze di rango per la determinazione di tutti i punti legati dalle misure.

In pratica è costituito da un set di otto parametri, due di forma dell'ellissoide e sei di posizione e di orientamento, e da una rete compensata di punti, estesa sull'area d'interesse, che lo materializza.

In uno stesso datum si possono usare molti sistemi di coordinate: le trasformazioni tra questi ultimi sono sempre puramente matematiche e non richiedono l'introduzione di misure. La trasformazione tra due datum può essere invece calcolata solo quando vi siano sufficienti misure che legano punti nei due sistemi. Un ellissoide biassiale di riferimento associato ad un sistema locale costituisce il sistema di riferimento geodetico planimetrico (cioè bidimensionale). Un tale sistema di riferimento non è geocentrico, cioè il centro dell'ellissoide è spostato rispetto al centro di massa della Terra di una quantità dell'ordine delle centinaia di metri. Anche l'asse di simmetria dell'ellissoide è disallineato rispetto all'asse di rotazione terrestre medio, ma gli scostamenti angolari sono comunque molto piccoli, dello stesso ordine di grandezza delle precisioni delle misure angolari più sofisticate.

L'ellissoide locale deve essere posizionato e orientato rispetto alla Terra. Precedentemente all'avvento delle tecniche satellitari, quando non era possibile il posizionamento geocentrico, l'unico modo per posizionare ed orientare i sistemi di riferimento consisteva nel collegamento, al sistema astronomico locale, di un punto scelto allo scopo, normalmente baricentrico rispetto alla zona d'interesse. Il sistema astronomico locale è definito dalla verticale locale e dall'asse di rotazione terrestre. Sei parametri determinanti (i sei gradi di libertà di un corpo rigido nello spazio) devono essere scelti nel punto iniziale (chiamato anche punto di emanazione): latitudine e longitudine ellissoidica, altezza geoidica, due componenti della deviazione della verticale e l'azimut ellissoidico (o geodetico) di una direzione che ha origine in questo punto.

Stabilite preliminarmente, in modo opportuno, forma e dimensioni dell'ellissoide di riferimento da adottarsi, l'idea di base è quella di vincolare le due superfici fondamentali, geoida ed ellissoide.

Scelto il punto di emanazione di quota geoidica nota, si provvede a determinarne latitudine e longitudine astronomica (cioè assolute, da non confondersi con le analoghe ellissoidiche):

senza entrare in dettaglio, questo significa individuare la posizione dello zenit del punto (cioè "dell'orientamento" della verticale geoidica), nel sistema terrestre convenzionale (CTS - Conventional Terrestrial System), di cui si dirà tra breve.

È importante ricordare che, prima dell'avvento della geodesia satellitare, l'astronomia geodetica era l'unico metodo che consentiva di eseguire posizionamenti "assoluti", giacché tutte le possibili misure fra punti sulla Terra realizzano soltanto determinazioni relative.

S'impone quindi che le coordinate ellissoidiche del punto di emanazione coincidano con quelle astronomiche. Questa condizione ha per effetto sia di vincolare un punto prefissato dell'ellissoide ad una direzione nello spazio (il che elimina due "gradi di libertà ") sia di assicurare in quel punto la coincidenza della normale ellissoidica con la verticale geoidica (altri due gradi di libertà fissati dall'annullarsi delle due componenti della deviazione della verticale). Ciò implica il parallelismo dei piani tangenti alle due superfici, individuati dalla normale e dalla verticale.

I due rimanenti "gradi di libertà" dell'ellissoide rispetto al geode (scorrimento lungo la normale-verticale e rotazione intorno ad essa) vengono infine fissati attribuendo al punto di emanazione una quota ellissoidica coincidente con quella geoidica nota (si realizza così la condizione di effettiva tangenza delle due superfici nel punto) e orientando l'asse di rotazione dell'ellissoide nella direzione del Nord astronomico (tale direzione viene in effetti preventivamente determinata insieme alla latitudine e alla longitudine astronomica). Al termine di queste operazioni, si dice che si è orientato l'ellissoide locale di riferimento sul punto di emanazione.

Per definizione, un sistema di coordinate geocentrico è invece un sistema la cui origine coincide con il centro di massa C della Terra e i cui assi sono fissati per convenzione. Il più comune sistema geocentrico usato in geodesia è il Sistema Terrestre Convenzionale (CTS), orientato in modo che l'asse Z sia diretto verso il Polo N medio (più precisamente l'Origine Internazionale Convenzionale - CIO), l'asse X sia complanare con il Meridiano Convenzionale di Greenwich e l'asse Y formi con gli altri due una terna cartesiana destrorsa. Al sistema è associato un ellissoide di dimensioni predefinite. Le posizioni nel sistema CTS sono talvolta date in coordinate cartesiane e talvolta in coordinate ellissoidiche (j, l, h) cioè latitudine, longitudine e quota ellissoidiche.

La quota ellissoidica h , talvolta chiamata quota geodetica, è la distanza di un punto dall'ellissoide di riferimento, misurata lungo la normale all'ellissoide stesso.

Il sistema di riferimento geodetico del 1980 (GRS 80), raccomandato per l'uso in geodesia dall'Associazione Internazionale di Geodesia (IAG) nel 1980, utilizza un ellissoide di riferimento dimensionato per approssimare al meglio la forma attuale della Terra. Esso ha semiasse maggiore di 6.378.137 metri e schiacciamento approssimativamente eguale a $1/298,25$. È attualmente utilizzato, quasi universalmente, nei lavori geodetici.

I sistemi geodetico-cartografici d'interesse nazionale

La situazione dei sistemi di riferimento d'interesse nazionale merita un inquadramento schematico per non perdere di vista i problemi con cui è necessario confrontarsi, ma soprattutto quelli con cui è utile tale confronto. Pur rinunciando ad una dettagliata cronistoria dei vari sistemi di coordinate in uso in Italia, ritengo tuttavia necessario ricordare alcune tappe di quel processo, per certi aspetti perverso e diabolico, ma complessivamente il migliore possibile, dai cui effetti negativi oggi il GPS potrebbe porci al riparo. Un esame critico, non una critica. È utile ricordare che, per utilizzare compiutamente un sistema geodetico-cartografico, è necessario precisare quali siano:

- il sistema geodetico di riferimento (geodetic datum);
- le misure ed i calcoli di compensazione della rete d'inquadramento che lo realizzano,
- la rappresentazione cartografica adottata e le condizioni di applicazione.

Un sistema di riferimento geodetico è realizzato attraverso l'istituzione di una rete compensata di punti che si estende sull'area d'interesse. Come è noto a tutti, i rilevamenti effettuati e che si effettuano nel nostro Paese, hanno una base comune: l'inquadramento geodetico proveniente dai lavori dell'Istituto Geografico Militare.

In Italia la possibilità d'istituire un sistema di riferimento unico fu presa in considerazione, per la prima volta, dopo l'unificazione del Regno, quando l'allora "Ufficio Tecnico del Corpo di Stato Maggiore" ebbe l'incarico del rifacimento totale della triangolazione nazionale tramite l'unificazione delle reti parziali preesistenti; ognuno degli Stati preunitari aveva infatti eseguito lavori geodetici sviluppandoli su propri sistemi di riferimento diversi l'uno

dall'altro. Nei lavori, completati alla fine del secolo scorso per la rete fondamentale, venne adottato l'ellissoide di Bessel con tre orientamenti differenti su tre punti di coordinate astronomiche note: Genova per il Nord, Roma Monte Mario per il centro e Castanea delle Furie per il Sud. L'orientamento venne ottenuto con altrettanti azimut astronomici, mentre il dimensionamento venne dato dalla misura di otto basi.

Per procedere allo sviluppo topografico e cartografico in sistemi cartesiani, vennero adottate le formule di corrispondenza della proiezione policentrica naturale (o di Flamsteed modificata) riferita al centro degli elementi cartografici alla scala 1:100.000; queste coordinate "cartografiche", che si possono definire di transizione, non ebbero alcun seguito, al di là della fase d'impianto, dopo l'utilizzazione ai fini del rilevamento, dapprima grafico (la "puntinatura" delle tavolette) e successivamente aerofotogrammetrico.

Nei cataloghi dei punti trigonometrici di allora sono riportate infatti le sole coordinate geografiche. Ai primi del '900, quando i lavori di campagna, che si erano protratti per quasi mezzo secolo, volgevano al termine, fu affrontato il problema di compensare l'intera rete su un'unica superficie di riferimento.

Il lavoro, impresa memorabile per quei tempi, fu condotto in due fasi distinte: la prima parte si concluse nel 1908 con la stampa del volume "Compensazione della rete geodetica a Nord del parallelo di Roma", la seconda terminò nel 1919 con un'analoga pubblicazione per la zona a Sud del parallelo di Roma. Il dimensionamento della rete, o meglio delle otto sotto reti in cui l'Italia era stata divisa (tre nel settentrione, quattro nel meridione più la Sardegna), avvenne tramite l'introduzione di otto basi misurate (Figura 5). Tali partizioni, rese necessarie dalle limitate potenzialità di calcolo dell'epoca, vanificarono parzialmente gli intenti di unificazione che il progetto si era proposto.

Il calcolo fu eseguito sull'ellissoide di Bessel (definizione 1841), orientato a Genova sul pilastrino dell'Osservatorio dell'Istituto Idrografico della Marina, con azimut su Monte del Telegrafo. Nel contempo il Catasto iniziò i suoi lavori e per quanto riguarda l'inquadramento venne stabilita la derivazione dalle reti di 1°, 2° e 3° ordine I.G.M., mentre per la rappresentazione sul piano venne adottata la proiezione di Cassini Soldner avente caratteristiche di deformazione più idonee alla misura delle aree.

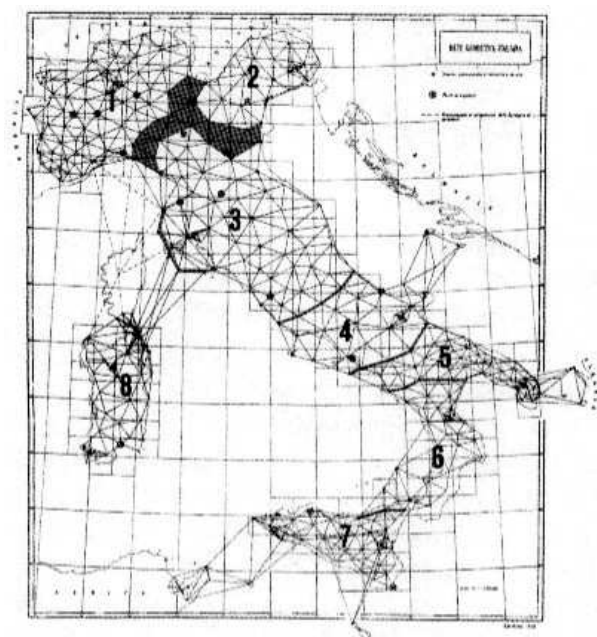


figura 5 – Rete geodetica fondamentale 1908/1919

Definizione	
■	Ellissoide Bessel (1841):
•	$a = 6\,377\,397.155$
•	$f = 1/299.1528128$
■	Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902)
•	$\varphi = 44^{\circ} 25' 08.235''$
•	$\lambda = 0^{\circ}$
•	azimut su Monte del Telegrafo $\alpha = 117^{\circ} 31' 08.91''$

Realizzazione	
Rete fondamentale di primo ordine dimensionata su otto basi	

Rappresentazione cartografica	
Proiezione policentrica naturale (o di Flamsteed modificata) riferita al centro di ciascuno degli elementi cartografici alla scala 1: 100.000	

tabella 1 – Sistema di riferimento italiano ante 1940

La rappresentazione richiede, com'è noto, la scelta di un centro di sviluppo preferibilmente baricentrico rispetto alla zona da rilevare; l'estensione di questa, per evitare deformazioni incompatibili con la scala, venne contenuta in un campo di circa 100 km di raggio. Ma non sempre sono stati adottati sviluppi di questa estensione, quali ad esempio quello che interessa quasi tutta la Toscana (origine Siena), o la Calabria (origine Monte Bruto), ma sviluppi assai limitati, addirittura comprendenti un solo Comune, per cui oltre alla ventina di sistemi estesi, si hanno molte centinaia di piccoli sistemi locali.

Anche per il sistema catastale è opportuno fornire alcune precisazioni, utili ai fini dello studio della trasformazione nel sistema nazionale. In realtà tale sistema, coincidente ufficialmente con quello adottato dall'I.G.M. nella prima compensazione definitiva della propria rete (1908-1919), non è stato utilizzato per l'intero territorio nazionale. I lavori catastali si sono infatti svolti in molti casi prima del completamento dei lavori di triangolazione dell'I.G.M., ed hanno quindi spesso fatto riferimento a sistemi geodetici di definizione precedente (in particolare a definizioni adottate dallo stesso I.G.M. in epoche anteriori al calcolo finale: ellissoide di Bessel orientato a Castanea delle Furie per molte province a sud di Roma, e orientato a Monte Mario per alcune zone dell'Italia centrale) e talvolta provvisoria.

Sempre a causa del "ritardo" delle operazioni I.G.M. rispetto alle esigenze catastali sono stati frequentemente assunti, per i vertici di 1°, 2° e 3° ordine, valori provvisori delle coordinate forniti volta per volta dallo stesso I.G.M., spesso diversi (in certi casi sensibilmente) dai definitivi. La rete catastale non è quindi del tutto congruente con quella nazionale, ovvero angoli e lati della rete non sono esattamente gli stessi, anche prescindendo dal diverso sistema geodetico di riferimento. Molti vertici di 4° ordine I.G.M. fanno parte della rete catastale come vertici di rete, sottorete o dettaglio.

Definizione
■ Ellissoide Bessel (1841): <ul style="list-style-type: none">• $a = 6\,377\,397.155$• $f = 1/299.1528128$
■ Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902) <ul style="list-style-type: none">• $\varphi = 44^{\circ} 25' 08.235''$• $\lambda = 0^{\circ}$• azimut su Monte del Telegrafo $\alpha = 117^{\circ} 31' 08.91''$
Realizzazione
Rete di inquadramento costituita dalla triangolazione dell'I.G.M. (limitatamente ai vertici di 1°, 2° e 3° ordine), raffittita con la triangolazione catastale di rete, sottorete e dettaglio
Rappresentazione cartografica
Cassini-Soldner, con suddivisione del territorio nazionale in zone, riferita ciascuna ad una diversa origine ("centro di sviluppo"), coincidente in molti casi con un vertice I.G.M. L'estensione di ogni sistema è in genere limitata ad un massimo di 70 km dall'origine in direzione Est-Ovest e a 100 km in direzione Nord-Sud. La maggior parte delle province è compresa in sistemi di grande estensione (31 origini); il rimanente territorio è suddiviso in sistemi più piccoli (oltre 800 complessivamente)

tabella 2 – sistema di riferimento catastale

Le relative coordinate derivano però da misure eseguite autonomamente dal Catasto, e sono quindi in genere diverse da quelle calcolate dall' I.G.M.; in certi casi è diversa anche la materializzazione.

Il 30 novembre del 1940, durante la riunione di Torino, la Commissione Geodetica Italiana (C.G.I.), accogliendo le raccomandazioni espresse dall'Associazione Internazionale di Geodesia nel convegno di Madrid del 1924, decise di cambiare sistema di riferimento.

Come ellissoide fu scelto quello di Hayford (detto anche internazionale), ritenuto più vicino alla realtà fisica terrestre, e per l'orientamento fu realizzata un'apposita stazione astronomica sul vertice di 1°ordine di Monte Mario .

Per inquadrare la rete nel nuovo datum non fu effettuata una nuova compensazione, ma semplicemente un "trasporto" dei vertici della rete geodetica fondamentale (1° ordine) i quali mantennero, nel nuovo sistema, tutte le loro inesattezze e disomogeneità. In seguito sono state eseguite, con moderni metodi di calcolo, compensazioni parziali di alcuni blocchi,

ma sempre con dimensionamento e orientamento derivanti dal calcolo 1908-1919 e quindi senza miglioramenti significativi.

Questo sistema, che costituisce ancora oggi il riferimento ufficiale nazionale, è denominato Roma40, con richiamo alla data della determinazione astronomica. Nel dopoguerra venne inoltre adottata, anche su proposta del Prof. Boaga, la rappresentazione conforme di Gauss; e ciò non solo per la cartografia, ma anche, e soprattutto, per lo sviluppo dei calcoli geodetici, che, semplificati, possono essere condotti sul piano conforme, con gli evidenti vantaggi dell'uso della trigonometria piana in luogo di quella sferica.

Il sistema geodetico-cartografico nazionale (Roma40 – Gauss-Boaga) è il sistema in cui sono calcolate le coordinate dei vertici della rete trigonometrica fondamentale italiana, a disposizione dell'utenza nei cataloghi I.G.M. La denominazione corrente di coordinate Gauss-Boaga si riferisce esclusivamente alle coordinate piane (o cartografiche).

Nel sistema nazionale vengono inquadrati i lavori geodetici e topocartografici nazionali e regionali, oltre a numerosi rilievi locali e tecnici. A proposito della rete vanno fatte alcune precisazioni, utili soprattutto ai fini del confronto dei dati I.G.M. con quelli dei sistemi locali catastali: il calcolo del 1908-1919 è stato eseguito nel sistema geodetico di riferimento adottato all'epoca (ellissoide di Bessel orientato a Genova, definizione 1902), e solo nel 1940 è stato adottato l'ellissoide internazionale

Definizione
■ Ellissoide Internazionale (Hayford): <ul style="list-style-type: none">• $a = 6\,378\,388$• $f = 1/297$
■ Orientamento: Roma M. Mario (definizione astronomica 1940) <ul style="list-style-type: none">• $\varphi = 41^{\circ}55'25.51''$• $\lambda = 0^{\circ} (12^{\circ}27'08.400'' \text{ est da Greenwich})$• azimut su Monte Soratte $\alpha = 6^{\circ}35'00.88''$
Realizzazione
Rete di triangolazione fondamentale dell'I.G.M. (calcolo di compensazione del 1908-1919) e reti di raffittimento
Rappresentazione cartografica
Conforme di Gauss; territorio nazionale praticamente compreso in due fusi, denominati rispettivamente Ovest ed Est, di 6° di ampiezza, con meridiani centrali a $-3^{\circ}27'08.400''$ e $2^{\circ}32'51.600''$ di longitudine da M. Mario fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$ falsa origine per le coordinate Est: <ul style="list-style-type: none">• 1500 km (fuso Ovest)• 2520 km (fuso Est)

tabella 3 – Sistema di riferimento Roma40

orientato a Monte Mario, ricalcolando le coordinate di tutti i vertici nel nuovo riferimento; la longitudine è contata dal meridiano di Roma (Monte Mario).

In effetti per "realizzazione del sistema nazionale" va inteso il risultato del trasferimento sull'ellissoide internazionale orientato a Monte Mario (definizione 1940) dei dati ottenuti con le compensazioni definite nel 1908 e nel 1919, calcolate sull'ellissoide di Bessel orientato a Genova.

A seguito delle campagne di triangolazione susseguitesesi nel tempo, numerosi blocchi della rete sono stati rideterminati in base a nuove misure ed a nuovi calcoli di compensazione, modificando le "distorsioni" locali nella rete; le coordinate attualmente in catalogo sono quindi, per effetto di queste "ricompensazioni", diverse quelle del 1940, e a volte è variata anche la materializzazione dei punti.

Anche se il Catasto italiano ha ufficialmente adottato il sistema nazionale "Roma40 – Gauss-Boaga" da vari anni, in pratica solo in alcune zone si è passati effettivamente a tale sistema.

Per una vasta parte del territorio nazionale la cartografia catastale ed i relativi atti di aggiornamento sono ancora riferiti al sistema catastale adottato in sede di formazione della cartografia (dal 1866 in poi), caratterizzato, come si è detto, dall'uso della rappresentazione cartografica "Cassini Soldner" per zone limitate aventi ciascuna una diversa origine.

Lo stesso Prof. Boaga, come Direttore Generale del Catasto, intravide, negli anni '50, la possibilità di realizzare l'unificazione dei sistemi catastali con la trasformazione delle coordinate Cassini-Soldner in coordinate gaussiane. È un'operazione ancora incompiuta. Apparentemente il problema è quanto mai semplice: note le formule di corrispondenza delle due rappresentazioni, nonché le coordinate geografiche del centro di sviluppo, con pochi semplici passaggi attraverso le coordinate geografiche si perviene alla soluzione. Ma la semplicità è solo apparente, sia per la casistica varia che si può incontrare, sia per la necessità generale di trasformare le coordinate geografiche che si ottengono dalle Cassini (relative all'ellissoide di Bessel) in coordinate sull'ellissoide internazionale. Poteva essere un grande progetto degli anni '70, supportato dall'avvento dei calcolatori elettronici, ma non si è fatto nulla di organico e definitivo. La conseguenza più grave di questo mancato impegno è stata la non utilizzabilità, in molti casi, dei trigonometrici catastali nella formazione delle carte tecniche. Sarebbe stato possibile e conveniente ricavare almeno l'inquadramento geometrico della nuova carta dalla mappa del Nuovo Catasto Terreni.

Ma quella possibilità e quella convenienza furono ignorate con conseguente dispendio di fatica e di denaro. Infatti fin dai primi progetti di carta tecnica a grande scala 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 disponibili 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 seconda 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 prima e la seconda Guerra Mondiale dimostrarono l'esigenza militare di un sistema cartografico uniforme e alla fine della seconda 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 Nord-Sud delimitati da assegnati meridiani.

Dopo la fine della seconda 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 lì 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 (Figura 6).



figura 6 – European datum 1950

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.

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 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. Chiunque, 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 deformata, 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 la rappresentazione di Mercatore trasversa 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

Definizione
■ Ellissoide: Internazionale (Hayford) <ul style="list-style-type: none">• $a = 6\,378\,388$• $f = 1/297$• Orientamento: medio europeo 1950 (European datum 1950)• origine delle longitudini Greenwich
Realizzazione
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. (National Imagery Mapping Agency). Le coordinate geografiche sono state ricalcolate in base a questa compensazione e al <i>datum</i> 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
Rappresentazione cartografica
Universale Trasversa di Mercatore (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) fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$ falsa origine per le coordinate Est: 500 km falsa origine per le coordinate Nord: 0 nell'emisfero Nord; 10.000 km nell'emisfero Sud. Nel sistema ED50 M. Mario ha coordinate: <ul style="list-style-type: none">• $\varphi = 41^\circ 55' 31.487''$• $\lambda = 12^\circ 27' 10.93''$

tabella 4 – Sistema di riferimento ED50

cartografico, ma l'edizione civile di quelle carte, così come di quelle a scala maggiore, pubblicate dall'USGS (il 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. Poi nel 1994 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 (il Servizio Forestale statunitense), 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.

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'inquadramento, 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 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 Monte 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 (Figura 7).



figura 7 – Rete geodetica fondamentale nel sistema IGM83

Definizione	
■	Ellissoide: Internazionale (Hayford)
•	$a = 6378388$
•	$f = 1/297$
■	Orientamento: medio italiano su 33 azimut di Laplace
•	origine delle longitudini Roma Monte Mario (definizione astronomica 1940)
•	$\varphi = 41^{\circ}55' 25.51''$
•	$\lambda = 0^{\circ} (12^{\circ} 27' 08.400'' \text{ est da Greenwich})$
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° 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 Monte Mario	
fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$	
falsa origine per le coordinate Est:	
•	6500 km (1° fuso)
•	7500 km (2° fuso)
•	8500 km (3° fuso)

tabella 5 – Sistema di riferimento IGM83

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 in 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 si basavano, 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 limitata com l'Italia, ma 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 delle possibilità e 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, geodetici e gravimetrici 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 poligoni 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 - denominato EC EF, acronimo di Earth-Centered Earth-Fixed - è geocentrico poiché il centro del sistema coincide con il centro di massa della Terra, ed è 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, etc. 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.

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 <ul style="list-style-type: none">• $a = 6\,378\,137$• $f = 1/298.257223563$
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 rappresentazione UTM con inquadramento WGS84 (in analogia all'UTM-ED50), denominato UTM-WGS84 o, più correttamente, UTM-ETRF89

tabella 6 – Sistema di riferimento WGS84

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); è

derivato dal WGS72 al quale sono state apportate varie modifiche, alcune delle quali erano necessarie 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. 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 $C20$ e la velocità angolare della Terra w ; tali parametri coincidono con quelli dell'ellissoide GRS80 ad eccezione del coefficiente zonale di secondo grado che differisce dall'analogo coefficiente $J2$ 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 (Figura 8) è stata raffittita e progressivamente estesa verso Nord e verso Est, includendo oggi gran parte dei paesi dell'ex blocco orientale (ETRF96).

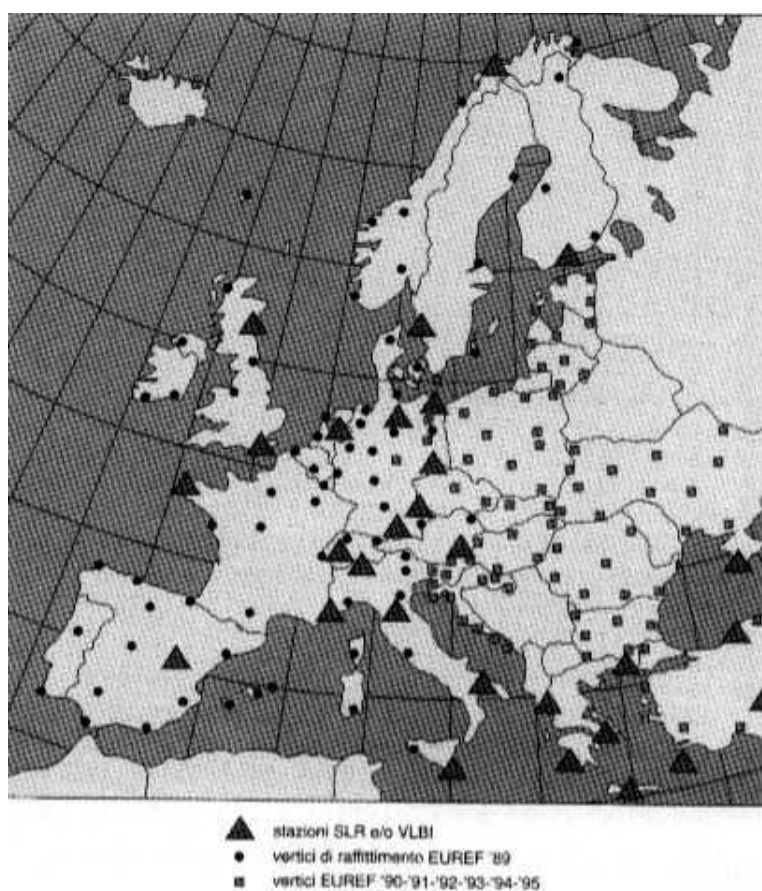


figura 8 – Stazioni GPS nel sistema EUREF

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'ICS (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 ottenuto grazie a tecniche GPS, mentre "730" indica il numero della settimana GPS 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 vogliano raggiungere previsioni 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 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 IGM95 (Figura 9), 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.



figura 9 – la rete IGM95

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. 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 di figura 10 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 11 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.

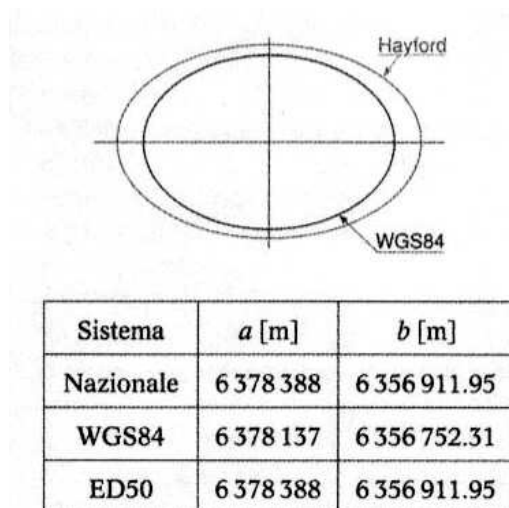


figura 10 – differenze dimensionali tra gli ellissoidi di sistemi di riferimento italiani

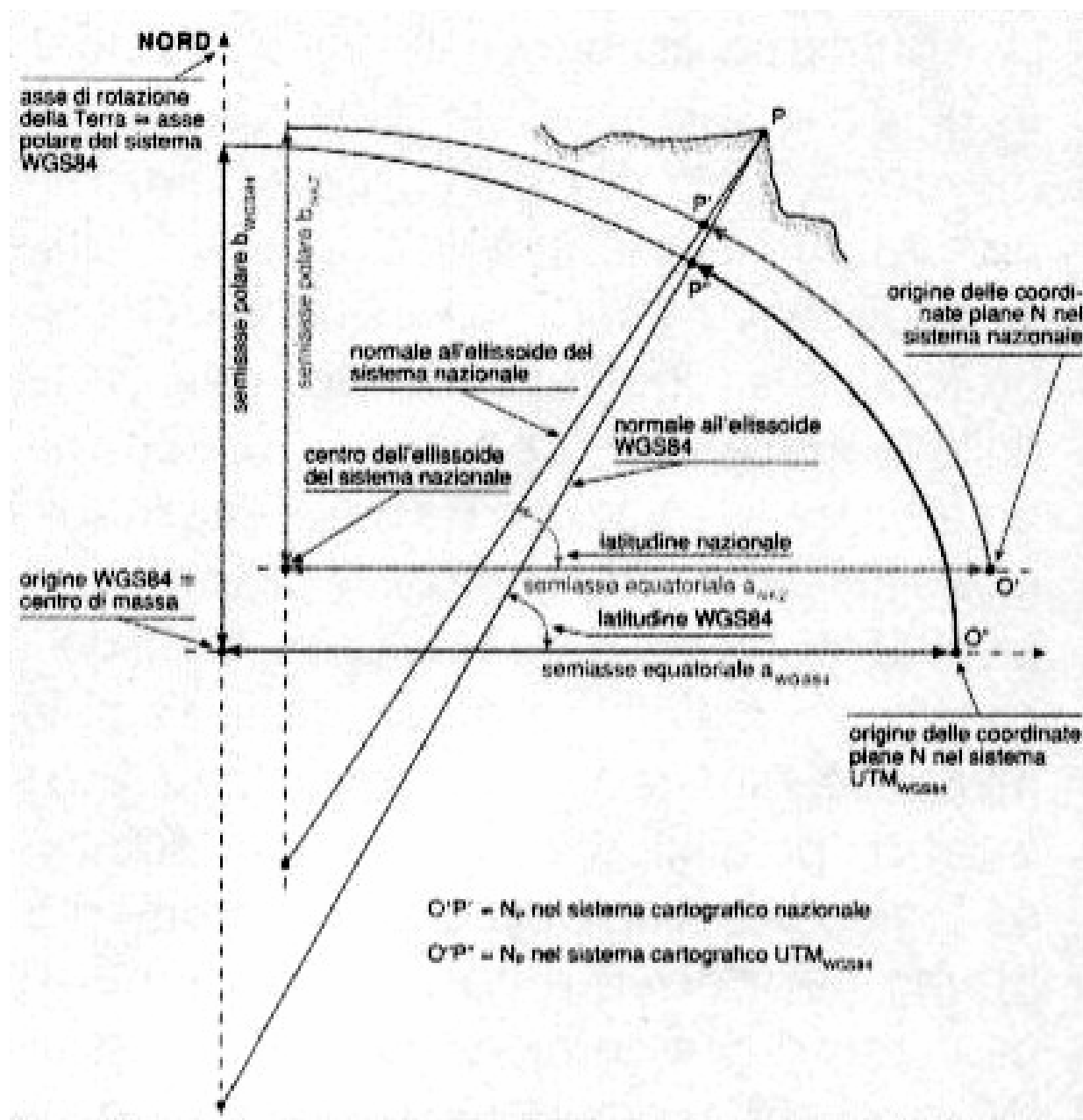


figura 11 – Sezione meridiana sul meridiano centrale del fuso

La sottostante figura 12 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 metri), unitamente alle corrispondenti variazioni di coordinate piane.



Differenze (sistema ED50 - sistema WGS84)

N	042904	102901	149901	156902	249901
$\Delta\varphi$ [°]	3.446	3.643	3.436	3.545	4.018
$\Delta\lambda$ [°]	3.801	3.707	3.275	2.919	2.542
$\Delta\varphi$ [m]	-107	-113	-113	-110	-125
$\Delta\lambda$ [m]	-81	-82	-75	-67	-64
ΔN [m]	198.92	199.74	197.59 192.17*	191.49	192.68
ΔE [m]	80.57	79.77	84.00 89.11*	89.87	87.41

* fuso 33

figura 12

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. 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'utenza l'informazione completa e la formazione necessaria alla comprensione del problema.

Per trasformare le coordinate geografiche e piane da un sistema ad un altro è necessario applicare ad ogni punto delle variazioni DE e DN, Dj e Di che, per le origini 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 ed 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 ± 10 e ± 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). 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 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 le coordinate ellissoidiche j ed l (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 ad una delle due reti 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 parametri;
- 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 stessa. 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 ellissoidi 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, oggi disponibile con il modello ITALGE02000, migliorerà la situazione. Nella maggior parte delle campagne di misura GPS eseguite in Italia, inserendo il rilievo ottenuto nelle reti nazionale e catastale, si ottengono residui planimetrici 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 residui ottenuti localmente vengono ad essere spesso di entità inaccettabile. Inserire un nuovo rilievo geodetico in un altro preesistente presenta consistenti analogie con l'aggiornamento cartografico: è meglio conseguire congruenza ed omogeneità locale che precisione di posizionamento assoluta.

L'uso ormai ampiamente diffuso delle tecniche GPS per la determinazione dei punti necessari al rilievo del territorio, al suo monitoraggio ed all'aggiornamento della documentazione cartografica analogica e numerica, pone come dominante il problema dell'integrazione fra le

misure satellitari e i dati preesistenti, che costituiscono un immenso patrimonio informativo che non può e non deve essere trascurato. In genere però la maggioranza degli utenti è perversamente condizionata dall'idea che la maggior parte dei dati è riferita ad un sistema locale, un'ovvia tautologia per il passato, non ovvia né corretta per il presente ed il futuro che vedono un aumento esponenziale dei dati nel sistema WGS84. Basti pensare al diffondersi di immagini georeferenziate di enorme estensione, dell'ordine dei Tera-bytes. Il problema sembra ancora dibattuto a livello emozionale con un sincero terrore verso l'ignoto e paura di lasciare la strada nota (anche se forse non così approfonditamente come si crede). L'integrazione tra i sistemi di riferimento locali e quello globale ha determinato l'inserimento, tra i principali scopi del progetto IGM95, dell'obiettivo di definire le relazioni tra il sistema geodetico nazionale Roma40 e quello proprio del rilievo GPS, cioè il WGS84, di cui la rete IGM95 è una realizzazione, così come di valutare le relazioni intercorrenti tra i suddetti sistemi geodetici e cartografici e l'UTM-ED50, il quale, pur non possedendo caratteristiche di precisione sufficienti per una corretta conduzione delle operazioni geodetiche e topografiche, ha avuto ed ha tuttora rilevante influenza.

Dopo un'accurata analisi dei dati disponibili ed un approfondito esame comparativo delle differenti strategie operative perseguibili, è stata messa a punto una metodologia che ha portato alla definizione ottimizzata delle relazioni tra la rete classica e quella fondata sulle misure GPS. Il risultato di questa prima fase di lavoro, durato alcuni anni, ha prodotto un set di sette parametri locali per ogni punto della rete IGM95, da applicare alle nuove misure GPS condotte nell'ambito di circa 10-15 km dal vertice utilizzato; considerando la densità media della nuova rete (1 punto ogni 250 km² con interdistanza media di 15-20 km) ciò comporta la totale ed omogenea copertura del territorio nazionale. Nell'ambito di un sistema locale, o di una parte di esso, i sette parametri incogniti, presenti del modello suddetto, possono essere determinati come soluzione di un problema ai minimi quadrati, in cui le quantità osservate sono le coordinate cartesiane di un certo numero di punti (minimo 3) della rete noti sia nel sistema locale che in quello globale.

Tale metodologia ha reso dunque possibile un pieno sfruttamento del GPS per l'integrazione delle nuove informazioni di posizione rispetto a quelle esistenti ed ha aperto definitivamente la strada all'affermazione delle tecniche satellitari non solo presso enti e aziende

di rilievo geotopografico, ma anche a livello di singoli professionisti orientati ad applicazioni tematiche e di dettaglio.

Un ulteriore e probabilmente definitivo passo in avanti è stato di recente compiuto dalla Direzione Geodetica dell'IGM per risolvere l'ambiguità, formale ma pur sempre fastidiosa, derivante dalla differenza dei risultati della trasformazione su punti pressoché equidistanti dai vertici della rete IGM95: applicando i diversi set di parametri associati a quei vertici si ottengono risultati che differiscono di quantità che, seppure non significative dal punto di vista geodetico per quanto detto in precedenza, possono dar luogo a complicazioni formali dal punto di vista numerico. Il problema è stato affrontato "alla radice", partendo dai dati di base (vertici con coordinate note in più sistemi), ottenendo una soluzione soddisfacente con l'uso di una serie di matrici delle differenze (grigliati) fra le coordinate geografiche degli stessi punti fisici, determinate tramite un algoritmo di approssimazione basato sul criterio di minima curvatura.

Tali matrici, calcolate secondo un passo adeguato, consentono di poter estrarre per qualsiasi punto valori univoci con una semplice interpolazione bilineare. I grigliati sono definiti e georeferenziati nel sistema ROMA40 (con le longitudini riferite a Greenwich), in coordinate geografiche espresse in gradi sessadecimali. I punti dei grigliati hanno una interdistanza di 5' in latitudine e 7'30" in longitudine e vengono quindi a costituire una maglia quasi quadrata che, sul territorio nazionale, coincide perfettamente con le tavolette della vecchia cartografia 1:25.000. Per l'utenza esterna, onde consentire il passaggio fra sistemi in sostituzione della attuale procedura con i 7 parametri, alla documentazione relativa a ciascun punto IGM95 sono associati uno o più file contenenti una porzione dei grigliati, necessaria all'esecuzione delle varie trasformazioni tra sistemi, in un intorno di circa 10 km dal punto.

Il sistema di riferimento altimetrico

Il primo elemento necessario per la definizione della quota è la superficie di riferimento. Una volta stabilita questa, è individuata la direzione (ortogonale) lungo cui misurare le quote, mentre dalla realizzazione del sistema di riferimento discende la scala delle misure lungo quella direzione.

In funzione di come si scelgono questi elementi, si possono definire differenti sistemi di quota. Usare un piano come superficie di riferimento è ovviamente insufficiente, salvo che per applicazioni di estensione particolarmente limitata. Scelte migliori, più vicine alla reale forma della Terra, sono la superficie rotazione o una superficie equipotenziale che si adagia approssimativamente su un'idealizzata superficie degli oceani, dando così significato al termine "quota sul livello medio del mare". La prima delle scelte di cui sopra, è usata per definire le quote ellissoidiche; la seconda per le quote ortometriche.

Le due superfici di riferimento sono di natura completamente diversa. La prima risulta da una definizione geometrica e può essere matematicamente descritta in maniera semplice.

Sfortunatamente, poiché una simile superficie non ha un significato fisico, nessuna strumentazione poteva direttamente rilevarla prima dell'avvento del GPS.

Per conservare il significato fisico della quota è necessario definirla rispetto ad una superficie fisicamente significativa: generalmente si considera a tale scopo una superficie equipotenziale che approssima globalmente la superficie media del mare. In prima approssimazione le superfici equipotenziali possono essere rappresentate da superfici teoriche di grandi masse d'acqua. Teoriche in questo caso significa che il movimento delle onde, le correnti oceaniche, le maree e altri fenomeni di cambiamento nel tempo non vengono presi in considerazione. L'importanza pratica di tali superfici è data dal fatto che una superficie di livello è intuitivamente interessante come riferimento per le quote, in quanto essa rappresenta uno stato di equilibrio per i fluidi.

Così, differenze di potenziale, che generano il moto, sono messe in relazione alle differenze di quota. Purtroppo questa definizione implica gravi complicazioni matematiche e per mettere in relazione i sistemi di quota ellissoidico e geoidico occorre determinare la differenza fra le due superfici, cioè l'ondulazione geoidica o separazione geoida-ellissoide (Figura 13).

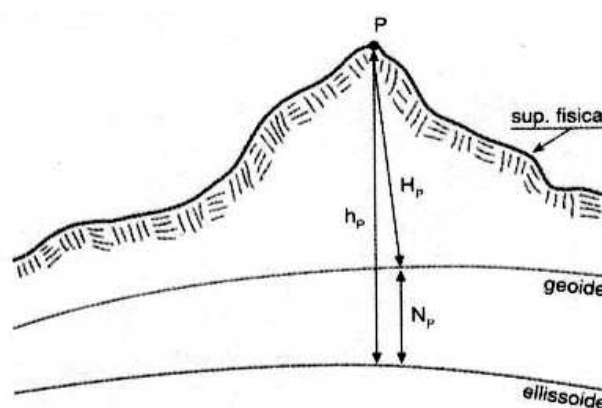


figura 13 – Relazioni di base fra quote ellissoidiche h ed ortometriche H

L'adozione del geoide come superficie di riferimento della Terra è una scelta obbligata; pur nella sua complessità essa offre prestazioni impareggiabili: è già materializzata con buona approssimazione dagli oceani in gran parte del pianeta ed essendo legata alla gravità rappresenta l'unico riferimento che permette di definire un concetto di quota significativo anche dal punto di vista fisico. Il geoide è definito come la superficie equipotenziale del campo di gravità usata come riferimento delle altezze ortometriche, cioè il datum altimetrico.

La figura 13 mostra le relazioni di base fra quote ellissoidiche h ed ortometriche H .

In prima approssimazione, a meno di qualche millimetro: $h_p = H_p + N_p$, h_p è osservabile con il GPS, mentre H è osservabile con livellazioni corrette in funzioni di osservazioni gravimetriche; l'ondulazione geoidica è la quantità che connette i due sistemi di altezze, ed è quindi essenziale quando si vogliono usare insieme diversi tipi di osservazioni.

Questa formula è un'approssimazione, soprattutto perché considera solo la differenza fra le superfici e trascura di tenere conto delle differenze di lunghezza delle normali e delle differenze di scala tra i differenti tipi di osservazioni. Per quote terrestri e per fini operativi, l'errore generato da questa approssimazione può essere sicuramente trascurato.

Per l'altimetria tradizionalmente topografi e cartografi hanno cercato di semplificare il problema della superficie di riferimento usando il livello medio del mare come definizione di quota zero, poiché la superficie del mare è disponibile un po' dovunque. Il l.m.m. è determinato con osservazioni mareografiche su un punto fondamentale per un periodo sufficientemente lungo in modo da depurare gli effetti di marea. La definizione di un geoide locale è un'operazione relativa che, proprio per il modo in cui esso è definito, ha un solo "grado di libertà" nella scelta: si definisce geoide locale, per una certa area d'interesse, quella superficie equipotenziale del campo della gravità passante per un punto prestabilito dell'area stessa (normalmente un punto della linea di costa più vicina, posto all'altezza del livello medio del mare convenzionalmente definito).

È a partire da quel punto, assunto come riferimento fondamentale di quota zero, che si provvede, con i metodi propri della livellazione geometrica, ad attribuire una quota geoidica a ciascuno dei punti (detti capisaldi) delle linee di una rete che si estende su tutto il territorio.

Il sistema di riferimento altimetrico italiano è realizzato dalla rete di livellazione geometrica di alta precisione dell'I.G.M. (Figura 14).



figura 14 – Rete nazionale di livellazione geometrica di alta precisione

Rimane così definito, come conseguenza immediata della procedura di quotazione, anche il geode locale, poiché la rete di capisaldi, altimetricamente determinati rispetto ad esso, contribuisce ad individuarlo, lungo i profili delle sue linee, rispetto alla topografia del terreno. Per l'Italia continentale il punto di quota zero si trova a Genova, ed è stato determinato come media delle osservazioni che un mareografo ha registrato per 10 anni: dal 1937 al 1946 (data convenzionale di riferimento - 1 gennaio 1942). Data l'impossibilità di trasporto della quota, con metodi di alta precisione, lungo tratti di mare, le isole maggiori hanno ciascuna un proprio mareografo di riferimento: rispettivamente Catania e Cagliari. In particolare la quota zero a Catania é frutto della media di un anno di registrazioni effettuate

nel 1965, mentre per Cagliari si fa riferimento ad una serie di osservazioni dal 1 giugno 1955 al 31 agosto 1957 (data convenzionale di riferimento - 1 luglio 1956). Molti altri mareografi operano lungo le coste italiane; i loro dati non costituiscono riferimenti, ma attraverso i collegamenti alla rete di livellazione, potrebbero permettere importanti indagini di carattere geofisico, se esistesse un minimo coordinamento delle attività di rilievo mareografico.

È più corretto allora definire il l.m.m. come la superficie convenzionale di quota zero per una certa area (datum altimetrico locale) e ricordare che esso è solo una buona approssimazione del geoide, che è la vera superficie zero per la misura delle quote.

Ma poiché non possiamo vedere la superficie del geoide, non possiamo direttamente misurare le quote al di sopra e al di sotto di quella superficie; ne possiamo indirettamente determinare la posizione attraverso misure puntuali di gravità ed una loro successiva modellizzazione.

Per scopi pratici accettiamo l'ipotesi che sulla costa geoide e l.m.m. siano essenzialmente coincidenti e comunque, muovendoci verso l'interno, misuriamo dislivelli rispetto alla quota zero sulla costa, che in effetti vuol dire rispetto al l.m.m.

Per tutte le ipotesi che si fanno, per la varietà di strumenti, metodologie e convenzioni che si usano nelle misure altimetriche, non c'è nessuna garanzia che metodi differenti producano risultati direttamente confrontabili; sebbene le carte dicano che le quote sono riferite al l.m.m., differenti sistemi di determinazione altimetrica possono fornire risultati non equivalenti. Insomma il l.m.m. è uno standard solo nominale; sfortunatamente per cartografi e topografi, esso non è una superficie semplice: le anomalie di morfologia e densità della crosta terrestre producono lievi variazioni del campo della gravità, risultanti in variazioni del geoide. Poiché anche la superficie del mare risente del campo di gravità, anche il l.m.m. ha lievi colline e piccole valli, come la terraferma, anche se molto più attenuate.

A seconda di dove ci troviamo il l.m.m. può essere più vicino o più lontano dal centro della Terra rispetto ad un altro punto: le quote non beneficiano di una definizione univoca del livello medio dei mari e tutt'oggi non esiste un sistema di riferimento altimetrico globale che consenta di unificare e legare tra loro le misure compiute in vari sistemi "verticali" (Tabella 7). Ad aumentare incertezze e confusione, la rappresentazione dei fondali marini sulle

carte nautiche non fa riferimento al livello medio del mare, ma al cosiddetto Livello di Riduzione degli Scandagli (LRS): è un'origine convenzionale, scelta in modo che solo raramente l'acqua possa scendere al di sotto di essa. Ogni nazione adotta un criterio per la sua determinazione: in Italia l'Istituto Idrografico della Marina adotta un LRS, per le varie località, in corrispondenza di un livello ottenuto stimando la media delle più basse Basse Maree osservate. In Francia, ad esempio, l'LRS è stabilito ad un livello pari alla più bassa Bassa Marea osservata nella zona cui la carta nautica si riferisce.

Nazione	Dh [cm]
Italia	0
Austria	+6
Rep.Ceca	+49
Finlandia	+54
Francia	+30
Germania	+31
Norvegia	+21
Olanda	+33
Polonia	+49
Portogallo	+45
Spagna	+25
Svezia	+4
Svizzera	+25
Ungheria	+49

tabella 7 – Differenze altimetriche tra alcuni mareografi europei di riferimento e quello italiano

In ogni caso non ci si deve meravigliare se, in navigazione, lo scandaglio rileverà sempre profondità maggiori di quelle riportate sulla carta nautica, assicurando così una condotta delle imbarcazioni in acque sicure, ovvero compatibili alla loro immersione. Anche le oscillazioni del livello marino si contano dall'LRS: e così, per altezza dell'Alta Marea in un dato giorno si intende, se non diversamente specificato, l'altezza dell'acqua misurata da tale origine convenzionale.

L'altezza del livello medio del mare sull'LRS viene indicata, secondo una notazione internazionale, con Z0 ("Zeta Zero"). La conoscenza di questo parametro, il cui valore è riportato nelle informazioni marginali di tutte le carte nautiche, costituisce l'elemento per una prima valutazione quantitativa del fenomeno della marea, essendo in sostanza la differenza tra il livello medio del mare ed il corrispondente livello minimo ivi riscontrabile. Questo aspetto riguardante la cartografia nautica, pressoché sconosciuto ai Geodeti e ai Topografi, è generalmente sottovalutato dai naviganti del "Mare nostrum", dati i piccoli valori di Z0 riscontrabili nel Mar Mediterraneo (ordine di pochi decimetri).

È fondamentale però non dimenticare che sulle coste oceaniche le escursioni del livello medio del mare possono raggiungere qualche metro, con conseguenti valori di Z0 dello stesso ordine.

Riferendosi alle misure GPS per la determinazione della quota è utile infine ricordare che in un generico punto la "quota" determinata direttamente dal GPS è l'altezza del ricevitore rispetto all'ellissoide di riferimento. Come evidenziato nella figura 13, per convertire questo dato (h) nell'altezza ortometrica convenzionale H (sul I.m.m.) occorre sottrarre alla quota ellissoidica l'ondulazione geoidica N rispetto all'ellissoide di riferimento. Una volta note le ondulazioni geoidiche con sufficiente precisione, il problema della trasformazione di quote ellissoidiche in quote ortometriche è essenzialmente risolto. L'approssimazione con cui sono note tali ondulazioni determina in pratica la precisione finale sulle quote geoidiche ottenute.

Un rilievo GPS isolato fornisce le quote ellissoidiche rispetto a un ellissoide "pseudogeocentrico", ovvero traslato di decine o centinaia di metri rispetto a quello geocentrico. Non è quindi corretto applicare a queste quote le ondulazioni geoidiche riferite all'ellissoide geocentrico.

Le ondulazioni geoidiche su scala mondiale, rispetto all'ellissoide WGS84, variano da +75 m a -104 m. Negli Stati Uniti il geoide è sempre al di sotto dell'ellissoide, con variazioni da -5 a -53. In Italia il geoide è sempre sopra l'ellissoide con variazioni da +37 a +54. Il modello di ondulazione geoidica, sviluppato dal Politecnico di Milano, opportunamente rielaborato per adattarlo al sistema locale, fornisce, con un opportuno programma di interpolazione, le ondulazioni geoidiche che competono ai punti rilevati con GPS, con una precisione di 1-2 decimetri. Tradotto più correttamente in p.p.m. della distanza interessata la precisione mediamente conseguibile è migliore di 10 p.p.m. Un uso corretto del modello suddetto, integrato opportunamente, ove necessario, da misure classiche, consentirà al topografo di avvicinarsi molto all'obiettivo di usare quotidianamente il GPS per i propri rilievi tridimensionali, anche se ancora, per le applicazioni di alta precisione, restano insostituibili le tecniche classiche di livellazione; in futuro l'approssimazione dei modelli del geoide verrà migliorata, ma sarà sempre difficile tener conto di tutte le irregolarità locali del campo di gravità, cui invece si adatta sempre puntualmente con elevatissima precisione la livellazione

geometrica che misura dislivelli fra coppie di superfici equipotenziali.

Generazioni di topografi in tutto il mondo hanno contribuito con la livellazione geometrica all'arduo compito di tradurre il concetto di quota in una quantità misurabile. Ciò ha condotto alla creazione di numerosi riferimenti altimetrici, nazionali prima e sovranazionali poi, come la rete europea UELN (Uniteci European Levelling Net), compensata nel 1973 e comprendente i Paesi dell' Europa occidentale, ed il progetto della rete EVS (European Vertical System) che comprenderà anche molti Paesi dell'Europa orientale. Tutto ciò evidenzia chiaramente una tendenza verso il concepimento e la realizzazione, presumibilmente in pochi anni, di un sistema altimetrico continentale.

Conclusioni

Il rilevamento è lo sforzo incessante di misurare il mondo e di modellarlo senza mai arrivare a compimento. Poiché il mondo è costantemente perturbato, le nostre misure devono poterne seguire i movimenti. Nuovi sistemi di riferimento si renderanno necessari da qui a 10-20 anni. Il che ci sposta nel futuro verso sistemi di riferimento dinamici, in cui le coordinate dei punti "fissi" cambiano per i movimenti della crosta, per l'aumento di precisione delle misure, per il miglioramento di riferimento e via dicendo...

Nel campo cartografico o, ancor più in generale, nelle operazioni di georeferenziazione, un cambiamento di sistema di riferimento ha implicazioni pratiche non trascurabili e di difficile soluzione, in quanto cambiare sistema vuol dire variare un'enorme mole di dati esistenti. Nel caso attuale di introduzione del sistema WGS84 e delle sue realizzazioni, la soluzione più semplice, e sicuramente la più economica, consiste nel lasciare tutti i prodotti nel sistema geodetico-cartografico nativo; il computer può all'occorrenza convertire in quel sistema le coordinate fornite dal GPS, purché siano disponibili come lo sono, i relativi parametri di trasformazione. Per rendere poi confrontabili le altezze ellissoidiche osservate con il GPS con le quote ortometriche, la disponibilità attuale di un grigliato affidabile delle ondulazioni geoidiche rispetto all'ellissoide WGS84 risolve anche questo problema. L'aspetto da verificare è se questa sia una soluzione effettivamente soddisfacente, cioè efficace ed efficiente. Non è sicuramente una soluzione efficace per l'uso delle informazioni in tempo

reale di posizione provenienti dal GPS, come nel campo della navigazione terrestre, marittima ed aerea, cioè in un contesto dinamico di georeferenziazione di unità mobili. Negli altri campi di applicazione, a noi più congeniali, è una soluzione accettabile, ma non soddisfacente: infatti costringe l'utente a perdere una delle più importanti qualità del GPS, cioè la sua precisione. Nel passaggio dal sistema di riferimento globale a quello locale svanisce almeno per un ordine di grandezza la precisione intrinseca del posizionamento satellitare. L'alternativa, per un periodo comunque transitorio, è la conversione preventiva di tutti i nostri prodotti in un sistema comune, cioè nel sistema WGS84. Sebbene si sia portati a pensare che tale alternativa rappresenti la migliore soluzione, è utile esaminarne vantaggi e svantaggi. In primo luogo, essendo il WGS84 il più realistico modello disponibile della figura della Terra, la possibilità di un diretto posizionamento delle informazioni tramite GPS rende tutti i prodotti di maggiore valore perché direttamente utilizzabili in tutte le fasi del rilevamento sia statico che dinamico. Una tale impostazione consente la continuità della rappresentazione, negata in presenza di differenti sistemi locali, ad esempio nei lavori aventi carattere sovranazionale; minimizza gli errori dell'utente finale che si trova a lavorare con un unico comune sistema di riferimento e non è costretto a trasformare i suoi dati rilevati nel sistema o nei sistemi locali.

Il maggiore svantaggio è sicuramente il costo della conversione, che sarebbe distribuito tra gli utenti nel primo caso e accentrato presso i produttori nel secondo caso. Il primo non sarebbe certo minore, ma solo meno palese ed oltretutto carico di rischi di disomogeneità e di discontinuità spaziale e temporale.

La conversione dei prodotti esistenti da un sistema ad un altro non è una novità: nel passato sono state applicate da differenti enti due strategie fondamentalmente differenti, concepite ambedue per i prodotti analogici, ma facilmente adattabili ai prodotti digitali. Un metodo, applicato in Italia per introdurre sulla cartografia il sistema ED50, è consistito nel modificare fisicamente il taglio degli elementi cartografici impostandolo su valori interi di coordinate geografiche nel nuovo sistema.

Un secondo metodo consiste nel riassegnare ai vertici degli elementi cartografici i valori che loro competono nel nuovo sistema, accettando valori non interi, ma conservando la porzione di territorio rappresentata in ogni elemento e limitando i cambiamenti ad alcune

informazioni alfanumeriche associate all'elemento cartografico, analogico e digitale.

Una scelta drastica per l'uno e per l'altro metodo risulta difficile per le implicazioni operative, che in ogni caso presentano aspetti negativi. È opportuno adottare il secondo metodo per tutta la cartografia esistente e per gli eventuali aggiornamenti, consentendo così il recupero del patrimonio cartografico disponibile (analogico e digitale) e l'utilizzazione diretta nel sistema globale WGS84. Per quanto riguarda il primo metodo, esso risulta criticabile per l'applicazione che ne è stata fatta in epoca di cartografia analogica, in quanto ha comportato un onerosissimo lavoro di mosaicatura e disegno per il passaggio dalla tradizionale serie 1:25.000, articolata in tavolette (pari a 1/16 dei fogli 1:100.000) alla serie articolata in sezioni (pari a 1/4 dei fogli 1:50.000). Per la cartografia a più grande scala 1:10.000 e 1:5.000, esso ha comportato l'importazione, in serie cartografiche di maggior precisione metrica, di un sistema geodetico di minor precisione (ED 50) rispetto a quello disponibile (Roma40), anche se l'influenza è limitata al taglio degli elementi cartografici. Oggi il problema, nell'ambito della cartografia numerica e alla luce delle caratteristiche delle metodologie satellitari, si pone diversamente: infatti, mentre allora l'adozione di un sistema sovranazionale pagò lo scotto di una sorta di "generalizzazione" e quindi di un degrado della geometria relativa, oggi la globalizzazione del sistema può agire in direzione opposta, grazie al ribaltamento dei rapporti di affidabilità tra sistema locale e sistema globale. Il sistema europeo ED50 era più esteso ma meno preciso dei sistemi nazionali, in quanto derivante da uno sfolgimento delle misure classiche che li realizzavano; il sistema globale WGS84 è più esteso e più preciso dei sistemi nazionali perché derivante da nuove e differenti misure e nuove metodologie di calcolo. Per questo è auspicabile che, in un'ottica strategica che guardi almeno ai prossimi decenni e miri a costruire un prodotto fruibile anche in presenza di future esigenze, si adotti un nuovo sistema geodetico-cartografico: al di là di un breve, limitato periodo transitorio di coesistenza con i vecchi sistemi, esso dovrà sostituirsi totalmente a questi come unico e moderno sistema di riferimento. Ritornando alla cartografia esistente, per rendere possibile e agevole riportare coordinate GPS su di essa, la soluzione risiede in un nuovo reticolato cartografico UTM-WGS84. È dunque necessario, sufficiente ed urgente calcolare le coordinate geografiche e piane dei vertici degli elementi cartografici, rispettivamente nel sistema WGS84 e nella rappresentazione UTM-WGS84,

e riportare sulle carte il reticolato corrispondente.

Senza tale reticolato, le coordinate rilevate da un ricevitore GPS non possono essere direttamente utilizzate. Le coordinate sono in fondo un indirizzo spaziale: senza di esse siamo persi, ma siamo in crisi anche se le abbiamo e non le possiamo direttamente utilizzare. I ricevitori GPS più semplici costano qualche centinaio di migliaia di lire. Per i cacciatori o gli escursionisti, sacchi a pelo di buona qualità, tende e zaini costano ciascuno più dell'accesso al moderno sistema di navigazione satellitare americano da svariati miliardi di dollari o al futuro, più efficiente ed efficace, sistema europeo Galileo! Tuttavia, l'assenza di un sistema standard di coordinate limita notevolmente l'uso delle informazioni di posizione fornite da questi ricevitori. Nel futuro prevedibile, i satelliti forniranno un'accuratezza submetrica entro un limite di costo di poche centinaia di euro. Questa è la precisione di una carta topografica a grande scala. Le unità GPS a basso costo incrementeranno l'uso di informazioni territoriali e ambientali analogiche e digitali, mentre i prodotti direttamente utilizzabili in UTM-WGS84 incrementeranno l'uso del GPS. È quindi importante stimolare i produttori di cartografia ad applicare il reticolato UTM-WGS84 come uno standard o, più modernamente, i produttori di GIS ad adottare definitivamente il sistema WGS84, come sistema realmente tridimensionale. Non tanto tempo fa, un biglietto da visita con un indirizzo Internet era una novità. Oggi è una pratica d'affari consueta. Nell'era dell'informazione le coordinate WGS84 dovrebbero diventare un indirizzo geospaziale comunemente accettato a completamento degli indirizzi convenzionali. Esso arricchisce di un aspetto tridimensionale ciò che era precedentemente un sistema monodimensionale, accelerando il processo di localizzazione. È semplicemente un altro aspetto dell'era dell'informazione.

AUTORE

Prof. Ing. Luciano Surace

Presidente ASITA (www.asita.it)

Professore Ordinario di Geodesia

Istituto Idrografico

Passo Osservatorio 4 - 16134 Genova

Tel. +39 010 2443363

Fax +39 010 2443391

luciano.surace@libero.it

Il presente articolo è tratto dal libro:

AA.VV., *L'evoluzione della Geografia*, MondoGIS Editore, Roma 2004