

9 Proiezioni cartografiche e sistemi di riferimento

Miljenko Lapaine, Croazia e E. Lynn Usery, USA

9.1 Introduzione

Una carta geografica è una proiezione di dati, che generalmente derivano dalla terra reale, dai corpi celesti o da mondi immaginari, su una rappresentazione piana, un foglio di carta o uno schermo digitale, come il monitor di un computer. Generalmente le carte vengono realizzate trasformando i dati del mondo reale prima su una superficie sferica o ellissoidale (la sfera generatrice), poi su un piano. Le caratteristiche di tale sfera generatrice sono che gli angoli, le distanze e le superfici misurate su di essa sono proporzionali a quelle misurate sulla terra.

La trasformazione, da una superficie curva ad un piano, è conosciuta come proiezione cartografica e può avere una varietà di forme, che hanno tutte una distorsione di aree, angoli e/o distanze. Per conservare determinate caratteristiche dell'oggetto rappresentato, i vari tipi di distorsione possono essere controllati, anche se, in tal caso, le proiezioni ne creano altre.

Il problema principale in cartografia è che non è possibile proiettare/trasformare una superficie sferica o ellissoidale su un piano senza distorsioni. Solo un globo a forma di sfera o di ellissoide ritrae le caratteristiche di tutta la terra o di un corpo celeste nella reale prospettiva.

Il procedimento di proiezione si ottiene con tre specifici passaggi:

1. approssimando la dimensione e la forma dell'oggetto (per esempio, la terra), con una figura matematica che può essere una sfera o un ellissoide;

2. riducendo la scala della rappresentazione matematica a una sfera generatrice (un modello ridotto della terra da cui vengono create le proiezioni); la scala principale (o nominale) risulta pari al rapporto fra il raggio della sfera generatrice e il raggio della figura matematica che rappresenta l'oggetto (la terra), ed equivale alla scala sul piano della carta;

3. trasformando la sfera generatrice nella carta utilizzando una proiezione cartografica (Figura 9.1).

Le proiezioni cartografiche dipendono soprattutto dall'acquisizione di parametri specifici dell'oggetto stesso (la terra), come la forma sferica o ellissoidale, il raggio della sfera (o la lunghezza degli semiassi minore e maggiore dell'ellissoide), e un datum specifico, ovvero un punto di partenza per la rappresentazione, con un sistema di coordinate. Questi assunti formano le basi della Geodesia e attualmente vengono ottenuti usando misurazioni satellitari per mezzo del Global Positioning System (GPS), di Glonass, o di Galileo (paragrafo 9.2).

Una volta che tali misurazioni vengono accettate, viene generata una rappresentazione ellissoidale di coordinate, in forma di latitudine e longitudine. Tali coordinate possono poi essere trasformate con delle equazioni di proiezione in un sistema piano cartesiano di coordinate "x" e "y". Le equazioni generali di questa trasformazione devono avere la seguente forma:

$$x = f_1(\phi, \lambda), \quad y = f_2(\phi, \lambda)$$

dove

- x è la coordinata del piano in direzione Est-Ovest
- y è la coordinata del piano in direzione Nord-Sud
- ϕ è la latitudine
- λ è la longitudine

La forma delle funzioni f_1 e f_2 determina l'esatta

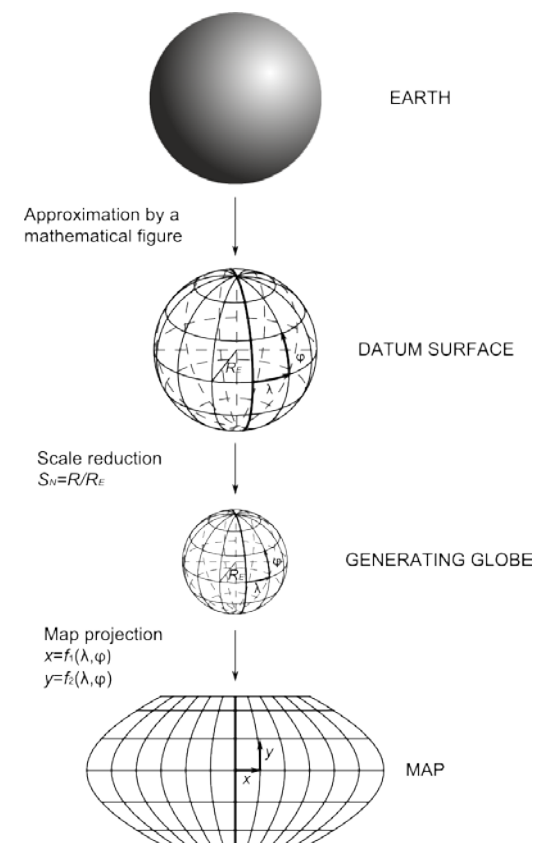


Figura 9.1 - Proiezioni cartografiche della terra, da una sfera generatrice alla carta finale (After Canters, 2002).

trasformazione e le caratteristiche della rappresentazione ellissoidale o sferica che verranno preservate.

Prima di occuparsi dei vari tipi di trasformazioni e delle caratteristiche che vengono conservate, è necessario capire le caratteristiche geodetiche delle coordinate ellissoidali e come queste vengono generate con i moderni sistemi di posizionamento satellitare.

9.2 Geodesia e Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Le proiezioni cartografiche hanno la loro più vasta e più frequente applicazione nella produzione di carte che mostrano una parte più o meno grande della superficie terrestre. Per realizzare la carta di una regione, è necessario fare un rilievo geodetico di quel territorio e poi visualizzarne il risultato. La *geodesia* è una tecnologia e una scienza che si occupa del rilievo e della rappresentazione della superficie della terra, della determinazione della sua forma e delle sue dimensioni e del suo campo gravitazionale. La geodesia può essere divisa in applicata, fisica e satellitare.

La *geodesia applicata* è quella parte della geodesia che comprende il rilevamento terrestre, l'ingegneria geodetica e le informazioni geospaziali. Il rilevamento terrestre è una tecnica che consente di assegnare una posizione relativa agli oggetti che si trovano sulla superficie della terra, quando la curvatura terrestre non viene presa in considerazione. L'ingegneria geodetica è quella parte della geodesia che si occupa del progetto, della misura e della supervisione delle costruzioni e di altri oggetti (per esempio, strade, tunnel e ponti).

La *geodesia fisica* è quella parte della geodesia che si occupa della gravità terrestre e delle sue ripercussioni sulle misurazioni geodetiche. L'obiettivo principale di tale parte della geodesia è la determinazione delle dimensioni del geoide, un modello della superficie della la terra, dove è costante il potenziale del campo gravitazionale. La *geodesia geometrica* si occupa della determinazione della forma della terra, delle dimensioni e della localizzazione precisa delle sue parti, tenendo conto della curvatura terrestre.

La *geodesia satellitare* è la parte della geodesia nella quale vengono utilizzati i satelliti per le misurazioni. In passato, l'esatta posizione di punti isolati sulla terra era determinata

con la geodesia astronomica, ovvero facendo misure basate sulle stelle. Le tecniche di misurazione della geodesia satellitare comportano l'uso geodetico del Global Navigation Satellite Systems (GNSS) come i GPS, Glonass e Galileo.

Un *sistema di navigazione satellitare* è un sistema di satelliti che forniscono un posizionamento geospaziale autonomo, con copertura mondiale. Consente a piccoli ricevitori elettronici di determinare la loro posizione (longitudine, latitudine e altitudine) nel raggio di pochi metri, usando segnali di tempo trasmessi via radio dai satelliti. Un sistema di navigazione satellitare con copertura globale può essere denominato Sistema di Navigazione Satellitare Globale o GNSS. Da aprile del 2013, solo il Sistema Globale di Posizionamento NAVSTAR (GPS) degli Stati Uniti e il russo GLONASS vengono considerati GNSS. La Cina procede nell'espansione del suo sistema regionale di navigazione Beidou ad una dimensione globale entro il 2020. Il sistema di posizionamento Galileo dell'Unione Europea è un GNSS in fase iniziale, per il quale è programmata la piena operatività nel 2020. La Francia, l'India e il Giappone stanno procedendo a sviluppare sistemi regionali di navigazione. Generalmente, la copertura globale per ogni sistema viene ottenuta da una costellazione di 20 - 30 satelliti in orbita terrestre, posizionati su molti piani orbitali. Il sistema attuale è variabile ma usa un'inclinazione orbitale $>50^\circ$ e periodi orbitali di circa dodici ore, ad un'altitudine di quasi 20.000 chilometri.

La *fotogrammetria* è un'importante tecnologia per l'acquisizione di informazioni quantitative affidabili su oggetti fisici e sull'ambiente, usando la registrazione, la misurazione e l'interpretazione di fotografie della radiazione elettromagnetica ottenuti usando sistemi di sensori.

Il *telerilevamento* è un metodo di raccolta e di interpretazione dei dati di oggetti, effettuato da una certa distanza. Questo metodo è caratterizzato dal fatto che lo strumento di misurazione non è in contatto con l'oggetto che deve essere rilevato. Il suo utilizzo più frequente è da piattaforme aeree o spaziali.

Lo studio della trasformazione dal modello della superficie della terra, o sfera generatrice, a una rappresentazione a due dimensioni, richiede l'uso dei seguenti concetti: ellissoide, datum e sistema di coordinate. Di ognuno di questi se ne parlerà di seguito.

L'*ellissoide terrestre* è un qualsiasi ellissoide che approssimi la figura della terra. Generalmente, un ellissoide ha tre differenti assi, ma in geodesia e in cartografia, è più spesso rappresentato come un ellissoide di rotazione con piccoli appiattimenti (figura 9.2).

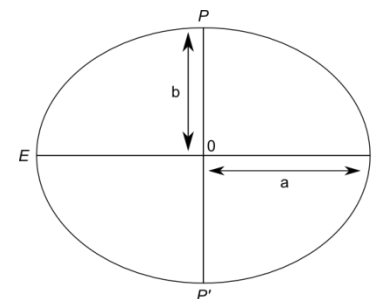


Figura 9.2 - Terminologia per un ellissoide di rotazione: EE' è l'asse maggiore, PP' l'asse minore e di rotazione; "a", è il semiasse maggiore e "b" è il semiasse minore.

L'ellissoide di rotazione è una superficie che risulta dalla rotazione di un'ellisse intorno ad una linea retta che passa attraverso i punti terminali dell'ellisse. Viene usato per modellare la terra. Esempi di famosi ellissoidi della terra sono, per esempio, quelli elaborati da Bessel (1841) e, più recentemente, gli ellissoidi WGS84 e GRS80.

Lo schiacciamento è un parametro usato per determinare la differenza fra l'ellissoide e la sfera. È definito dall'equazione

$$f = \frac{a-b}{a},$$

dove "a" e "b" sono rispettivamente i semiasse maggiore e minore. Il semiasse maggiore "a", è il raggio equatoriale perché l'Equatore è un cerchio. Il semiasse minore "b" non è un raggio, perché qualsiasi sezione piana dell'ellissoide che ha i poli P e P' come punti comuni è un'ellisse e non un cerchio.

A grandi linee, un datum è un insieme di parametri di base che vengono considerati come un riferimento per definire altri parametri. Un datum geodetico descrive la relazione di origine e orientamento degli assi su un sistema di coordinate rispetto alla terra.

Sono necessari almeno otto parametri per definire un datum globale: tre per la determinazione dell'origine, tre per la determinazione del sistema di orientamento delle coordinate e due per la determinazione dell'ellissoide geodetico. Un datum a due dimensioni serve come riferimento per la definizione di coordinate bidimensionali su una superficie. Tale superficie può essere un ellissoide, una sfera o anche un piano se la regione a cui siamo interessati è relativamente piccola. Un datum ad una dimensione o datum verticale è una base per la definizione delle altezze e in generale è in relazione con il livello medio del mare.

Gli ellissoidi WGS84 e GRS80 sono stati determinati con tecniche di posizionamento satellitare. Sono referenziati

rispetto al centro della massa terrestre (sono geocentrici) e forniscono un ragionevole adattamento all'intera terra. Il datum WGS84 fornisce le basi per le coordinate raccolte con il GPS, sebbene i moderni ricevitori siano in grado di trasformare le coordinate quasi in ogni datum di riferimento selezionato dagli utenti.

La necessità di avere modalità di trasformazioni di datum aumenta quando abbiamo dei dati che appartengono a un certo datum e abbiamo bisogno di convertirli in un altro (per esempio, da WGS84 al North American Datum del 1927 e viceversa). Ci sono diversi modi per fare tali trasformazioni e i lettori possono consultare i riferimenti geodetici del caso (si legga il paragrafo sugli approfondimenti) o i manuali dei loro strumenti.

9.3 Sistemi di riferimento di coordinate tridimensionali

Le coordinate geodetiche sono la latitudine e la longitudine geodetiche, con o senza l'altitudine. Si riferiscono anche a coordinate ellissoidali.

La *latitudine geodetica* è un parametro che determina la posizione dei paralleli sull'ellissoide terrestre ed è definita dall'angolo che va dal piano equatoriale alla normale (o linea perpendicolare) all'ellissoide passante in un dato punto. Normalmente, rientra nell'intervallo (-90°, 90°) e viene contrassegnato con la lettera greca ϕ . Un incremento della latitudine geodetica determina la direzione Nord, mentre la sua diminuzione determina la direzione Sud. La *longitudine geodetica* è un parametro che determina la posizione dei meridiani sull'ellissoide terrestre ed è definita dall'angolo che va dal piano del primo meridiano (che è quello dell'osservatorio di Greenwich, vicino Londra) a un dato punto sul piano meridiano. Molto spesso viene espresso nell'intervallo (-180°, 180°) ed è contrassegnato dalla lettera greca λ . Un incremento della longitudine

geodetica definisce la direzione Est, mentre una sua diminuzione indica la direzione Ovest (figura 9.3).

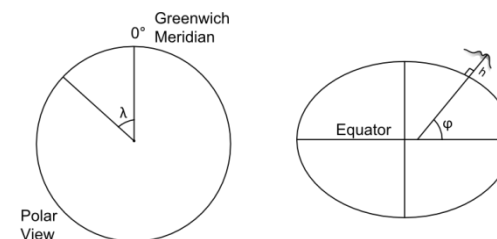


Figura 9.3 - Sistema di coordinate geodetiche o ellissoidali.

Un datum geodetico deve definire le relazioni delle coordinate geodetiche con la terra. Le coordinate geodetiche ϕ , λ e l'altitudine h possono essere trasformate in un sistema cartesiano tridimensionale riferito al centro della terra, usando le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + h) \sin \phi \end{aligned}$$

dove

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}, \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}.$$

Se vogliamo rappresentare una gran parte della terra, un continente o anche l'intero mondo, lo schiacciamento della terra può essere trascurato. In questo caso si parla di sistema di coordinate geografiche invece di sistema di coordinate geodetiche. Le coordinate geografiche sono la latitudine e la longitudine geografica, con o senza l'altitudine. La *latitudine geografica* è un parametro che determina la posizione dei paralleli sulla sfera terrestre ed è definita dall'angolo formato dal piano equatoriale con

la normale sulla sfera passante per un dato punto. Di solito varia nell'intervallo $(-90^\circ, 90^\circ)$ ed è contrassegnata con la lettera greca ϕ . Un suo incremento determina la direzione del Nord, mentre la sua diminuzione determina la direzione Sud. La *longitudine geografica* è un parametro che determina la posizione dei meridiani sulla sfera terrestre ed è definita come l'angolo dal piano del meridiano principale con un dato punto sul piano del meridiano. Varia nell'intervallo compreso fra $(-180^\circ, 180^\circ)$ ed è contrassegnato con la lettera greca λ . Un suo incremento determina la direzione Est, mentre un suo decremento determina la direzione Ovest (figura 9.4).

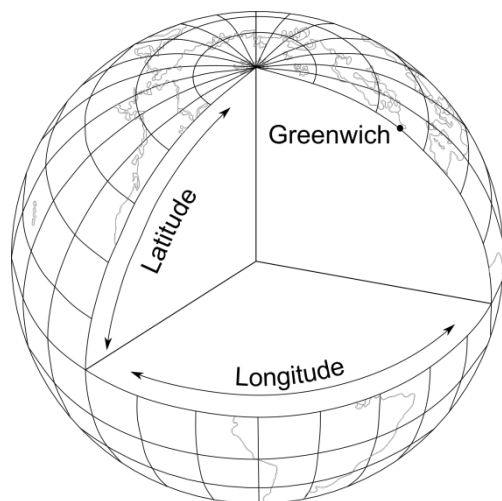


Figura 9.4 - Sistema di coordinate geografiche o sferiche: latitudine geografica ϕ , longitudine geografica λ .

Le coordinate geografiche ϕ , λ e l'altitudine $h=0$ possono essere trasformate in un sistema cartesiano tridimensionale, riferito al centro della terra, usando le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} X &= R \cos \phi \cos \lambda \\ Y &= R \cos \phi \sin \lambda \\ Z &= R \sin \phi \end{aligned}$$

dove R è il raggio della sfera terrestre.

Un sistema di coordinate sferiche può essere ottenuto come caso speciale di un sistema di coordinate ellissoidale, considerando uguale a zero lo schiacciamento, o in maniera equivalente, esprimendo la seconda eccentricità uguale a zero, " e " = 0.

Qualche volta, nella pratica geodetica e cartografica, è necessario trasformare le coordinate tridimensionali cartesiane in coordinate sferiche o ellissoidali. Oltretutto, a volte c'è bisogno di fare una trasformazione da un sistema di coordinate tridimensionale a un altro. Esistono metodi ed equazioni appropriate, ma per saperne di più il lettore dovrà consultare la bibliografia disponibile (si legga il capitolo sugli approfondimenti).

9.4 Sistemi di riferimento di coordinate bidimensionali

Generalmente, per l'uso dei dati geospaziali è richiesto un quadro di riferimento comune, che viene ottenuto, di solito, con un sistema di riferimento piano. Siccome le carte vengono visualizzate in un sistema geometrico piano, le coordinate sferiche o ellissoidali, generate da un sistema di posizionamento satellitare o da qualsiasi altro strumento di rilevamento, devono essere trasformate matematicamente in un sistema geometrico piano. La trasformazione più semplice è quella che assume che la coordinata " x " del piano sia equivalente a ϕ , e la coordinata " y " del piano sia equivalente a λ . Il risultato è conosciuto come proiezione di Plate Carrée.

Sebbene questa trasformazione sia semplice, comporta significative distorsioni nella posizione delle coordinate e poi produce aree, gran parte delle distanze e angoli distorti o deformati nel piano.

Trasformazioni più sofisticate consentono di conservare accuratamente le rappresentazioni di aree, distanze, angoli o di altre caratteristiche, anche se non tutte possono essere conservate contemporaneamente. Infatti, in genere, solo una singola caratteristica può essere mantenuta, per esempio, se è corretta la rappresentazione di un'area, restano le distorsioni per le altre caratteristiche. Pertanto, sono stati sviluppati molti e diversi tipi di proiezioni cartografiche, tali da consentire la conservazione di specifiche caratteristiche, che possono essere richieste da un utente. La sezione seguente fornisce una visione d'insieme e le basi matematiche per le trasformazioni che conservano alcune caratteristiche specifiche della terra, in particolare, le aree, gli angoli e le distanze.

Il sistema di coordinate Universale Trasverso di Mercatore (UTM), si basa sulla proiezione di zone di longitudine ampie sei gradi, ad una latitudine compresa fra 80° S e 84° N. Al meridiano centrale di ogni zona UTM viene attribuito un fattore di scala di 0,9996 che produce un errore massimo di 1 a 2.500. Nell'emisfero settentrionale, la coordinata " X " del meridiano centrale è compensata in maniera da avere un valore pari a 500.000 metri anziché zero e, di solito, viene chiamata "falso Est". Alla coordinata " Y " viene assegnato lo zero all'Equatore. Nell'emisfero meridionale, il falso Est è ancora di 500.000 metri, con uno spostamento dell'Equatore o "falso Nord" pari a 10.000.000 metri. Queste compensazioni fanno sì che tutte le coordinate nel sistema abbiano sempre valori positivi.

Nel reticolo del Sistema Universale Militare (UMGS), le aree polari, a nord di 84° N e a sud di 80° S, vengono proiettate

con il Reticolo Universale Stereografico Polare (UPS), che ha il polo al centro della proiezione e un fattore di scala di 0,9994. Tali aree vengono chiamate "Zona Nord" e "Zona Sud".

Le proiezioni cartografiche dipendono anche dalla forma del paese. Negli Stati Uniti d'America, un Sistema di Coordinate Piane dello Stato viene utilizzato in quegli stati che hanno un lungo asse Est-Ovest (il Tennessee, per esempio, che usa la proiezione Conica Conforme di Lambert), mentre invece, stati con un lungo asse Nord-Sud, come per esempio l'Illinois, usano la proiezione Trasversa di Mercatore. Parti importanti di una carta non sono solo la proiezione e la scala, ma anche la misura delle coordinate. Per essere sicuri della precisione dei dati che possono essere presi da una carta, bisogna leggere attentamente tutte le informazioni scritte lungo il bordo della carta stessa e, se necessario, richiedere ulteriori informazioni all'agenzia nazionale di cartografia.

Un sistema di coordinate piane di grande importanza per la modellazione dei dati geografici e l'analisi, soprattutto per le immagini satellitari e le fotografie, è il sistema di coordinate sulle immagini. Si tratta di un sistema per le immagini digitali, non di un sistema di coordinate cartesiane classico, e ha il punto di origine (0,0) assegnato all'angolo in alto a sinistra dell'immagine. La coordinata "X", spesso definita "campione", aumenta verso destra e la coordinata "Y", chiamata "linea", aumenta verso il basso. Le unità di misura vengono normalmente espresse in elementi base delle immagini o pixel. Questo è un'unità di misura discreta della superficie della terra, generalmente quadrato, con una dimensione definita, spesso espressa in metri.

Spesso, nella pratica cartografica e in geodesia, è necessario trasformare le coordinate di un piano cartesiano bidimensionale in un altro sistema bidimensionale di

coordinate piane. Con il metodo indiretto, prima si trasformano le coordinate piane bidimensionali in coordinate sferiche o ellissoidali per mezzo delle cosiddette equazioni inverse di proiezione; poi si continua con specifiche equazioni di proiezione, che forniscono il risultato nel secondo piano, nell'altro sistema bidimensionale. Il metodo diretto trasforma le coordinate piane da un sistema all'altro, usando la rotazione, la traslazione, la scala o qualunque altra trasformazione bidimensionale. Per ulteriori dettagli, si consultino le fonti.

9.5 Classi di proiezioni cartografiche

Le proiezioni possono essere classificate in base alla geometria, alla forma, a speciali proprietà, ai parametri di proiezione e alla nomenclatura. La classificazione geometrica si basa sul modello del reticolo (paralleli di latitudine e meridiani di longitudine). Secondo tale classificazione, le proiezioni generalmente vengono considerate *cilindriche*, *coniche* e *azimutali* (ma ne esistono anche altre). Una descrizione completa di questi modelli geometrici e dei relativi nomi può essere trovata nelle fonti.

Una proiezione azimutale proietta l'immagine della terra su di un piano. Una carta prodotta con una proiezione cilindrica può essere avvolta in un cilindro mentre una carta realizzata con una proiezione conica può essere avvolta in un cono. Per prima cosa, dobbiamo considerare che, quasi tutte le proiezioni cartografiche in uso, derivano dall'applicazione della matematica, in particolare del calcolo differenziale. Questo procedimento consente di mantenere specifiche caratteristiche e minimizzare la distorsione, tanto nelle relazioni angolari (di forma) quanto nelle aree.

9.5.1 Le proiezioni cilindriche

Le proiezioni cilindriche sono quelle che si presentano con l'aspetto di un rettangolo. Questo può essere visto come una superficie di sviluppo cilindrica che viene arrotolata a

formare un cilindro. Sebbene queste proiezioni siano create matematicamente e non da un cilindro, l'aspetto finale può suggerire una costruzione cilindrica. Questo tipo di proiezione può avere una o due linee senza distorsione di scala. Esempi classici di proiezioni cilindriche sono la conforme di Mercatore e l'equivalente di Lambert (figura 9.5).

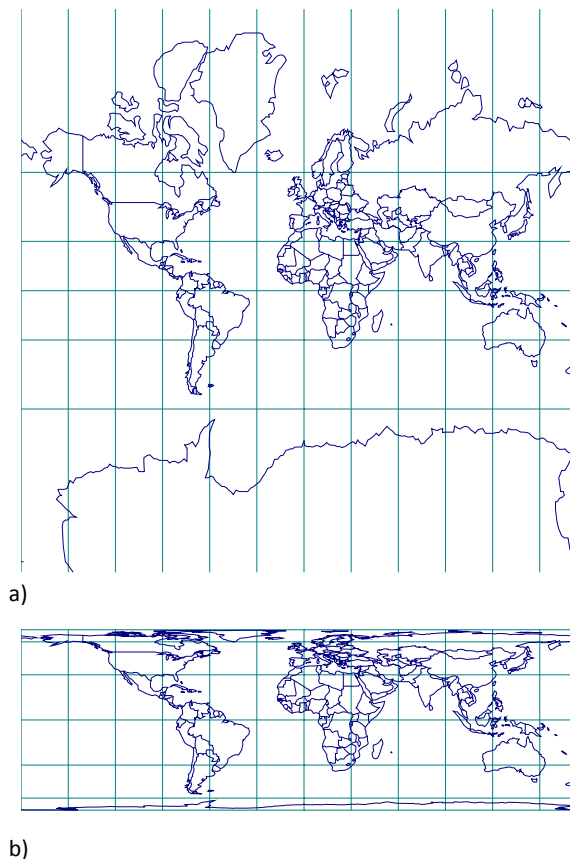


Figura 9.5 - La proiezione conforme di Mercatore (a) e quella cilindrica equivalente di Lambert (b).

Le proiezioni cilindriche vengono usate spesso per i planisferi, con la latitudine limitata a una ragionevole ampiezza, tanto a Nord quanto a Sud, per evitare la grande distorsione delle aree polari che deriva da tale metodo di proiezione. La proiezione normale di Mercatore viene usata per le carte nautiche di tutto il mondo, mentre la sua versione trasversa è regolarmente usata per la cartografia topografica e nel sistema di coordinate UTM descritto in precedenza.

9.5.2 Le proiezioni coniche

Le proiezioni coniche danno l'idea di una superficie conica che può essere arrotolata su un cono. Tali proiezioni generalmente vengono create matematicamente e non per proiezione su di una superficie conica. Possono esistere una o due linee senza alcuna distorsione di scala.

Esempi classici di questo tipo sono la conica conforme di Lambert e la conica equivalente di Albers (figura 9.6). Questo tipo di proiezioni non è appropriato a rappresentare carte dell'intera superficie terrestre e funziona meglio nelle aree con un lungo asse in direzione Est-Ovest. Ciò lo rende molto indicato per la rappresentazione di masse terrestri dell'emisfero settentrionale, come gli Stati Uniti, l'Europa o la Russia.

9.5.3 Le proiezioni azimutali

Le proiezioni azimutali sono quelle che conservano l'azimut (ovvero, la direzione relativa al Nord da un punto di vista normale). Solo un punto o un cerchio possono esistere senza distorsioni di scala. Esempi classici di proiezioni azimutali sono la stereografica e l'equivalente di Lambert (figura 9.7).

9.5.4 Altre classificazioni

Altre classificazioni delle proiezioni cartografiche si basano sull'aspetto (per es., l'aspetto e la posizione del reticolo o se

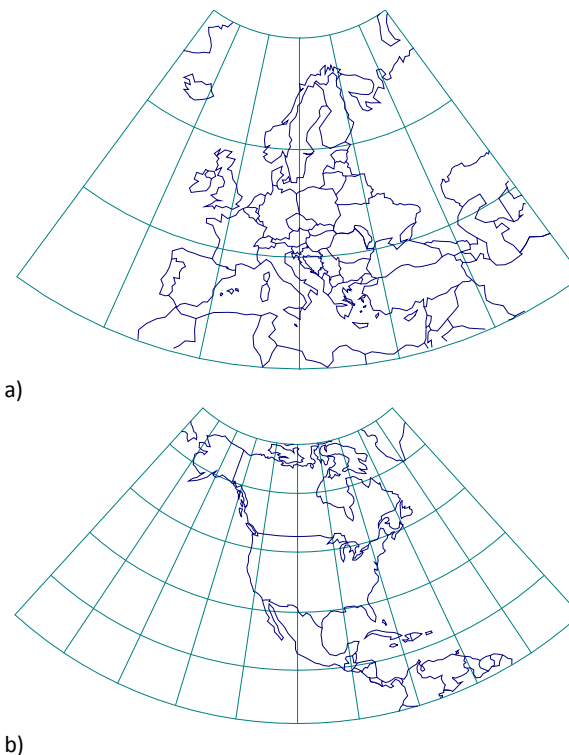


Figura 9.6 - Proiezione conica conforme di Lambert (a) e conica equivalente di Albers (b).

sono visibili i poli o l'equatore), che può essere polare, equatoriale, normale, trasverso o obliquo. Di conseguenza, esistono proiezioni polari, normali, trasverse e oblique. Questi sono solo nomi di gruppi di proiezioni cartografiche e non si riferiscono a una categorizzazione sistematica perché, per esempio, una proiezione può essere polare e normale allo stesso tempo. In teoria, ogni proiezione può avere un qualsiasi aspetto. Comunque, molte proiezioni vengono usate quasi sempre in contesti specifici, in modo che possano emergere alcune caratteristiche particolari.

Per esempio, molti fattori, come la temperatura e la biodiversità, dipendono dal clima e quindi dalla latitudine. Per proiezioni con una distanza costante fra i paralleli, la latitudine, nella vista equatoriale, si può convertire direttamente in una distanza verticale, facilitando la comparazione. Alcune proiezioni che, nella vista normale, hanno reticolati geografici che sembrano semplici curve, sono state originariamente definite per mezzo di costruzioni geometriche.

Siccome la maggior parte delle proiezioni trasverse e oblique hanno reticolati geografici composti da curve complesse, tali proiezioni non sono state analizzate in maniera sistematica prima dell'avvento dei computer. In generale, il calcolo di una proiezione obliqua per un particolare ellissoide è molto complesso e non viene sviluppato per tutte le proiezioni. Nonostante ciò, anche le proiezioni oblique hanno le loro applicazioni.

Una proiezione cartografica si definisce normale, o si presenta con una vista normale, se l'aspetto e la posizione del reticolo geografico, dei poli e dell'equatore sono i più naturali possibili e vengono generalmente determinati dalle condizioni geometriche. Spesso ciò è dovuto a calcoli semplificati o all'aspetto più semplice del reticolo. La vista polare è normale per le proiezioni azimutali, mentre la vista equatoriale è normale per le proiezioni cilindriche. Nelle proiezioni azimutali e in quelle coniche, il reticolo geografico consiste di linee diritte e archi di cerchi; l'aspetto normale delle proiezioni cilindriche consiste solo di linee diritte che formano un reticolo rettangolare.

Una proiezione si dice trasversa, o si presenta con una vista trasversa, se l'aspetto e la posizione del reticolo, dei poli e dell'equatore derivano dall'applicazione di formule usate per la proiezione in aspetto normale, a un globo preventivamente ruotato di 90° intorno al suo centro, così

che i poli si trovino sul piano equatoriale.

Una proiezione si dice polare, o si presenta con una vista polare, se l'immagine di un polo si trova al centro della carta.

Spesso viene usata come sinonimo di normale aspetto di una proiezione azimutale.

Una proiezione si dice equatoriale, o si presenta con una vista equatoriale, se l'immagine dell'Equatore è al centro della carta. L'Equatore è posizionato in direzione di uno degli assi principali della carta, generalmente quello orizzontale. Spesso questa proiezione equivale all'aspetto normale di una proiezione cilindrica.

Una proiezione si dice obliqua, o si presenta con una vista obliqua, se non è né polare né equatoriale e non ha un aspetto normale o trasverso (figura 9.8 alla pagina seguente).

9.6 Conservare particolari proprietà con le proiezioni cartografiche

Le proiezioni cartografiche di solito vengono realizzate per conservare determinate caratteristiche del globo, come le aree, gli angoli, le distanze o particolari proprietà come i cerchi massimi (l'intersezione fra la terra e un piano che passa per il centro della terra), che vengono rappresentati come linee diritte. Come le proiezioni, le carte che conservano le caratteristiche degli angoli vengono chiamate *conformi*, mentre le carte che conservano le dimensioni delle aree vengono definite *equivalenti*.

9.6.1 Conservare gli angoli

Nel 1569, Gerardo Mercatore sviluppò una proiezione cilindrica conforme che prese il suo nome. La realizzò per mostrare le *lossodromiche* o linee di rotta, che sono linee a direzione costante, come le rette, e consentono la navigazione tracciando una linea di rotta sulla carta. La proiezione di Mercatore presenta i meridiani spazati equamente fra loro, mentre i paralleli, che sono perpendicolari ai meridiani, sono spazati diversamente e,

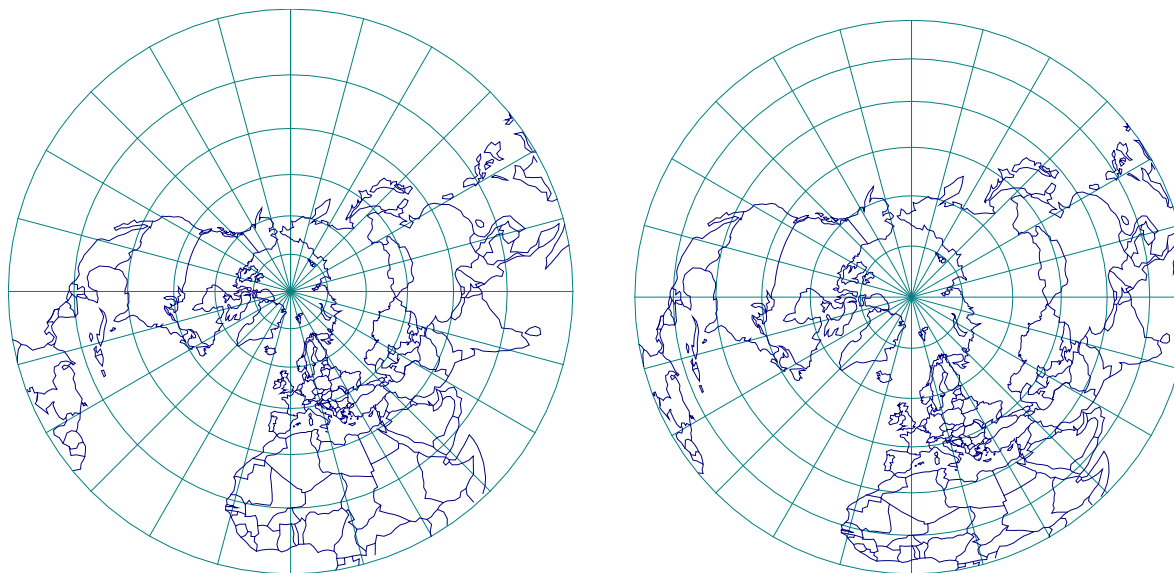


Figura 9.7 – Proiezione stereografica (a) e azimutale equivalente di Lambert (b).

all'Equatore, sono più vicini fra loro. I poli Nord e Sud non possono essere mostrati. La scala è reale lungo l'Equatore o lungo due paralleli equidistanti dall'Equatore. Distorsioni significative di dimensioni si verificano alle latitudini più alte e questo è il motivo per cui la proiezione di Mercatore non viene raccomandata nel caso di carte del globo (figura 9.5a).

Questa proiezione è uno standard della cartografia marina e viene utilizzata per le carte della navigazione che ne costituiscono il suo migliore uso.

a) Proiezione trasversa di Mercatore

La proiezione trasversa di Mercatore, conosciuta anche come proiezione di Gauss-Krüger, è una proiezione nella quale la linea a scala costante è un meridiano anziché l'Equatore. Il meridiano centrale e l'Equatore sono linee diritte. Gli altri meridiani e paralleli sono curve complesse e concave verso il meridiano centrale. La proiezione conserva

una scala reale lungo il meridiano centrale o lungo due linee che sono equidistanti e parallele a tale meridiano. Generalmente viene usata per rappresentazioni a grande scala di piccole aree. A causa della distribuzione delle distorsioni, si usa dividere le regioni da cartografare in zone di tre - sei gradi, limitate da meridiani. Questa proiezione è ampiamente utilizzata per le carte topografiche dalla scala di 1:25.000 a quella di 1:250.000 ed è alla base del sistema di coordinate UTM.

b) Proiezione conica conforme di Lambert

La proiezione conica conforme di Lambert, presentata nel 1772 da Johann Heinrich Lambert, mostra i meridiani come linee equamente distanziate e convergenti verso uno dei poli (figura 9.6a). Sulla proiezione, gli angoli fra i meridiani sono più piccoli dei corrispondenti angoli sul globo.



Figura 9.8 - La proiezione ortografica nel suo aspetto normale (a), trasverso (b) e obliquo (c).

I paralleli sono archi circolari concentrici non equamente distanziati, centrati sul Polo, dal quale la loro distanza aumenta man mano che ci allontana. Il Polo più vicino al parallelo standard è un punto e l'altro Polo non può essere mostrato. La scala è vera lungo il parallelo standard o lungo due paralleli standard ed è costante lungo ogni dato parallelo. Questa proiezione è ampiamente utilizzata per la cartografia a grande scala di regioni alle medie latitudini, con un asse allungato in direzione Est-Ovest. In molti paesi è lo standard per le carte alla scala di 1:500.000 così come per le carte aeronautiche a scala simile.

c) Proiezione stereografica

La proiezione stereografica, sviluppata nel secondo secolo prima di Cristo, è una proiezione azimutale prospettica che conserva gli angoli (è conforme). Questa proiezione è la sola in cui tutti i cerchi del globo vengono rappresentati come

cerchi nel piano della proiezione. Le varie viste, polare, equatoriale e obliqua producono differenti reticolati geografici. La vista polare è ottenuta proiettando da un polo un piano tangente all'altro polo: i meridiani sono linee diritte, distanziate equamente, che si intersecano fra loro al polo con angoli reali. I paralleli sono cerchi, distanziati in maniera non uniforme, centrati sul Polo, rappresentato come un punto. Nella sua vista polare, la proiezione stereografica è usata per produrre carte topografiche delle regioni polari.

La Proiezione Universale Stereografica Polare (UPS) è la proiezione gemella dell'UTM ed è usata per la cartografia militare. Tale proiezione generalmente viene scelta per quelle regioni che hanno una forma grosso modo circolare. È in uso, in forma ellissoidale obliqua, in un certo numero di paesi di tutto il mondo, fra i quali il Canada, la Romania, la Polonia e l'Olanda.

Ogni paese utilizza un differente sviluppo matematico o versione della proiezione stereografica.

9.6.2 Conservare le aree

a) Proiezione cilindrica equivalente di Lambert

La proiezione cilindrica equivalente fu presentata per la prima volta da Johann Heinrich Lambert nel 1772 e divenne la base per molte altre proiezioni equivalenti simili, comprese la proiezione ortografica di Gall, quella di Behrmann e di Trystan-Edwards. La proiezione originale di Lambert usa una sola linea a scala costante lungo l'Equatore (Figura 9.5b). Proiezioni equivalenti simili vengono realizzate usando due paralleli come linee a scala costante.

Sulla proiezione di Lambert, i meridiani sono linee diritte, equamente distanziate, e la lunghezza dell'Equatore è π

volte i meridiani. Le linee di latitudine sono parallele, perpendicolari ai meridiani, non distanziate equamente, e tanto più lontane fra loro quanto più sono vicine all'Equatore. Il metodo che permette di conservare le aree consiste nel cambiare la distanza fra i paralleli. Tuttavia, distorsioni significative nelle distanze e negli angoli si verificano alle alte latitudini e vicino ai poli.

Questa proiezione non è usata tanto spesso per realizzare carte geografiche ma, nei testi, è uno standard utile a descrivere i principi delle proiezioni cartografiche e serve come prototipo per altre proiezioni.

b) Proiezione di Mollweide

Nel 1805, Carl Brandan Mollweide sviluppò una proiezione pseudocilindrica equivalente, che forma un'area ellittica di proiezione per l'intero globo, nella quale il meridiano centrale è una linea lunga metà dell'Equatore. Su questa proiezione, i meridiani 90° Est e Ovest formano un cerchio perfetto. Gli altri meridiani sono delle semiellissi, equamente distanziate, che intersecano i poli e sono concave verso il meridiano centrale. I paralleli sono linee diritte, non equamente distanziate, e sono perpendicolari al meridiano centrale. Vicino all'Equatore, i meridiani sono più lontani fra loro e la distanza cambia gradualmente.

I poli Nord e Sud vengono visualizzati come punti. La scala è vera solo lungo la latitudine 40°44' Nord e Sud e resta costante lungo qualsiasi data latitudine. L'intero globo, proiettato e centrato sul meridiano di Greenwich, è mostrato nella figura 9.9.

La proiezione di Mollweide è stata usata occasionalmente per i planisferi, soprattutto per le carte tematiche, nelle quali è importante conservare le aree. Diversi aspetti di questa proiezione sono stati usati a fini didattici ed è stata scelta anche per il logo dell'ICA/ACI (figura 9.9).



Figura 9.9 - Logo dell'ICA/ACI, con la proiezione di Mollweide.

9.6.3 Proiezioni di compromesso

Le proiezioni cartografiche che non sono né conformi né equivalenti vengono definite di compromesso. Ne esiste un numero quasi illimitato in varietà e fra esse ci sono proiezioni molto utili e importanti.

a) Ortografica

La proiezione ortografica, sviluppata a partire dal secondo secolo prima di Cristo, è una proiezione azimutale prospettica che non è conforme né equivalente. Viene utilizzata con vista polare, equatoriale e obliqua, e mostra la rappresentazione di un intero emisfero. La vista polare della proiezione ha meridiani che sono linee diritte e intersecano il polo centrale con angoli reali fra tali meridiani. Il polo è un punto e i paralleli sono cerchi, centrati sul polo, e non distanziati equamente. La distanza fra i paralleli decresce ma mano che si allontanano dal polo. La scala è vera al centro e lungo la circonferenza di ogni cerchio, con il suo centro nel centro di proiezione.

L'aspetto della proiezione è a forma di globo (figura 9.8) ed è essenzialmente una proiezione prospettica del mondo su un piano, da una distanza infinita (ortogonale). Viene utilizzata, comunemente, per viste della terra da una prospettiva spaziale.

b) Gnomonica

La proiezione gnomonica non è né conforme né equivalente. È una proiezione azimutale prospettica, con il punto di proiezione al centro della terra, da cui il nome (ovvero, il centro della terra, dove vivono i mitici gnomi). Fu sviluppata dal greco Talete, probabilmente intorno al 580 a.C. Tutti i grandi cerchi sulla proiezione, compresi tutti i meridiani e l'Equatore, vengono riprodotti come linee rette, una proprietà unica di questa proiezione (figura 9.10).

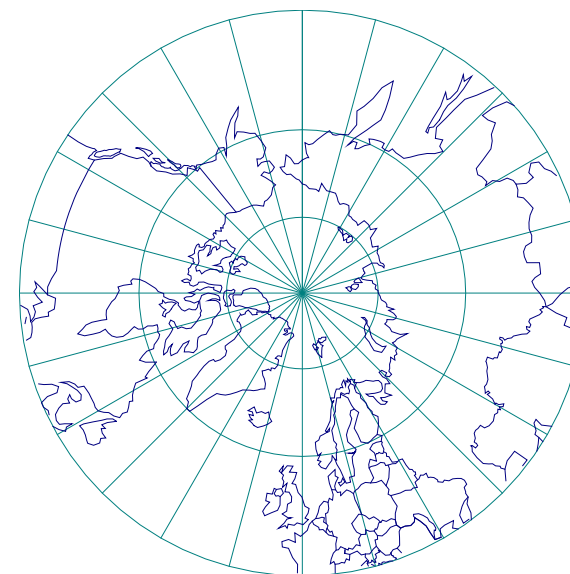


Figura 9.10 - La proiezione gnomonica rappresenta grandi cerchi come linee rette.

La visualizzazione del reticolato geografico cambia con la vista, così come per le altre proiezioni azimutali. I meridiani sono linee diritte equamente spaziate che, con la vista polare, si intersecano fra loro, al polo, con angoli veri.

I paralleli sono cerchi non equamente spazati, centrati sul polo, la cui distanza aumenta a partire dal polo stesso. La proiezione può visualizzare meno di un emisfero e la scala aumenta rapidamente con la distanza dal centro. L'uso è legato alla sua particolare caratteristica di rappresentare grandi cerchi come linee rette e, inoltre, di assistere naviganti e piloti aerei nel determinare le rotte più corte.

c) Azimutale equidistante

In tale proiezione con vista polare, i meridiani sono linee rette equamente spaziate che si intersecano al centro del polo. Gli angoli tra loro sono angoli veri. I paralleli sono cerchi equamente spazati, centrati rispetto al polo, che è un punto. Può essere mostrata l'intera terra, ma il polo opposto è un cerchio che ha un raggio doppio rispetto a quello dell'Equatore.

Nella sua vista equatoriale, i meridiani sono curve complesse che si intersecano ad ogni polo, spaziate equamente lungo l'Equatore. I paralleli sono curve concave verso il polo più vicino e sono equamente spazati lungo il meridiano centrale e il meridiano che si trova a 90° da questo. La scala è vera lungo qualsiasi linea che si irradia dal centro della proiezione e, all'aumentare della distanza dal centro, aumenta in direzione perpendicolare al raggio. La distorsione è moderata per un emisfero ma diventa estrema per una carta dell'intera terra. La distanza fra due punti qualunque, su una linea retta che passa per il centro della proiezione, è mostrata alla vera scala; questa caratteristica è particolarmente utile se uno dei punti è il centro.

Questa proiezione è comunemente utilizzata per le viste polari delle regioni polari, negli emisferi settentrionale e meridionale.

La vista obliqua è usata frequentemente per carte centrate su città importanti e, occasionalmente, per carte dei continenti.



Figura 9.11 - La proiezione azimutale equidistante nella bandiera dell'ONU.

La proiezione azimutale equidistante è stata riconosciuta dalle Nazioni Unite e viene usata sulla bandiera dell'Organizzazione (figura 9.11).

d) Winkel Tripel

La proiezione di Winkel Tripel non è conforme e neanche equivalente. Fu presentata nel 1921 dal tedesco Oswald Winkel. La proiezione venne ottenuta con la media delle coordinate della proiezione cilindrica equidistante di Aitoff. Winkel applicò il nome "Tripel", che significa triplo, perché la proiezione di Aitoff è una vista equatoriale di un emisfero di una proiezione azimutale equidistante, le cui coordinate orizzontali sono state raddoppiate e i meridiani sono stati triplicati rispetto alla longitudine originale.

Il meridiano centrale è dritto. Gli altri meridiani sono curvi, spazati equamente lungo l'Equatore e concavi verso il meridiano centrale. L'Equatore e i poli sono dritti. Gli altri paralleli sono curvi, spazati equamente lungo il meridiano centrale e concavi verso il polo più vicino. I poli sono rette lunghe circa 0,4 volte la lunghezza dell'Equatore, a seconda della latitudine dei paralleli standard. La scala è vera lungo il meridiano centrale e costante lungo l'Equatore. La distorsione è moderata, tranne che vicino ai meridiani



Figura 9.12 - La proiezione di Winkel Tripel.

esterni delle regioni polari.

La Winkel Tripel viene usata per carte dell'intero pianeta (figura 9.12).

9.7 Approcci moderni alle proiezioni cartografiche

9.7.1 La "Web Mercator"

La maggior parte dei servizi cartografici stradali online (Bing Maps, OpenStreetMap, Google Maps, MapQuest, Yahoo Maps, e altri), usano, per le immagini delle loro carte, una variante (per il web) della proiezione di Mercatore.

Nonostante le sue ovvie variazioni a piccola scala, la proiezione ben si adatta a una carta interattiva della terra, alla quale si può applicare uno zoom senza soluzione di continuità fino a grande scala (locale), dove si rileva una distorsione relativamente piccola dovuta alla quasi conformità di questa variante.

Il fattore di scala in un punto di una carta con proiezione conforme (come la Mercatore sferica o la Mercatore ellissoidale) è uniforme in tutte le direzioni. Ciò non è vero per la "Web Mercator".

Definiamo con "m" il fattore di scala nella direzione del meridiano N/S e con "n" il fattore di scala lungo la direzione del parallelo E/O.

Siccome il fattore di scala in un punto è lo stesso in tutte le direzioni sulla proiezione sferica di Mercatore, allora " $m = n$ ". In altre parole, la proiezione sferica di Mercatore è conforme. Le equazioni per la proiezione ellissoidale di Mercatore sono un po' più complicate, specialmente per la coordinata Nord. Siano noti i parametri " a " (il semiasse maggiore) ed " e " (l'eccentricità) dell'ellissoide selezionato. Avremo ancora " $m = n$ " perché, anche in questo caso, il fattore di scala in un punto è lo stesso in tutte le direzioni della proiezione; in altre parole, è conforme.

La "Web Mercator" è una cartografia con datum WGS84 (quindi, ellissoidale), coordinate latitudine/longitudine in direzione Est/Nord, che usa le equazioni sferiche di Mercatore (dove $R = a$). Questa proiezione è diventata popolare grazie a Google, con Google Maps (non Google Earth). L'ellissoide di riferimento è sempre il WGS84, e il raggio della sfera " R " è uguale al semiasse maggiore " a " dell'ellissoide WGS84. Questa è la "Web Mercator".

Il fattore di scala in un punto è diverso per ogni direzione ed è funzione dei raggi di curvatura nel meridiano, la verticale principale e la direzione alfa. Nella "Web Mercator", " m " e " n " non sono uguali. Pertanto, non è una proiezione conforme.

Se qualcuno usa la "Web Mercator" per stampare una mappa con la via di un nuovo ristorante in città o per visualizzarla sul monitor del proprio computer, allora non ci sono problemi. Ma la "Web Mercator" è una proiezione che ha fatto un salto da un settore, il web, a un altro, il GIS, che è un altro mondo. Prova ne sono i codici EPSG, Esri e FME per la "Web Mercator". I topografi e i professionisti del GIS devono sapere che questa proiezione non è conforme. Se i calcoli delle distanze con la "Web Mercator" vengono fatti con la semplicità di quelli di una proiezione conforme, saranno sbagliati. Se fatti correttamente, allora saranno laboriosi.

Per un'area della dimensione del Nordamerica, le differenze appaiono lievi. Le misurazioni verso Est si presentano uguali. Le differenze emergono nelle misurazioni verso Nord: non vicino all'Equatore, ma a 70° Nord, la differenza è di 40 km. Questo allungamento in direzione Nord-Sud nella "Web Mercator" è la ragione della sua non-conformità.

Le proiezioni di Mercatore sono utili nella navigazione perché le lossodromiche sono diritte. Queste sono linee di direzione vera costante, che i naviganti usavano per navigare prima dei GPS. Dobbiamo tener presente che le rette su una "Web Mercator" non sono lossodromiche.

Per riepilogare, a proposito della "Web Mercator":

- la "Web Mercator" è cilindrica;
- i suoi meridiani sono rette equamente spaziate;
- i suoi paralleli sono rette non equamente spaziate, ma in modo diverso rispetto alla proiezione conforme di Mercatore;
- le sue lossodromiche (linee di rotta) non sono rette;
- non è prospettica; i suoi poli sono all'infinito;
- non fu creata da Mercatore nel 1569, ma da Google più recentemente;
- non è conforme.

9.7.2 Map Projection Transitions

Map Projection Transitions è un esempio di applicazioni offerte da Jason Davies. La pagina web (<http://www.jasondavies.com/maps/transition>) presenta un planisfero, con reticolato e confini nazionali, nella proiezione obliqua di Aitoff con il Polo Sud. La carta non è statica ma animata: il Polo Sud si muove verso il basso e la terra ruota attorno ai poli. L'animazione dura cinque secondi, dopodiché la proiezione cambia e il movimento si ripete per altri cinque secondi, dopo i quali la proiezione cambia ancora. I nomi delle proiezioni compaiono in una finestra a parte. Sono disponibili un totale di 56 proiezioni. Il Polo Sud può essere reso invisibile e quindi, in alto, compare il Polo Nord. Le varie parti della terra appaiono al centro della carta mentre ruotano attorno ai poli (figura 9.13).

Clickando su "Pausa", l'animazione si ferma ed è possibile selezionare un'altra proiezione. Con un clic del tasto sinistro è possibile ruotare la figura e selezionare un tipo di proiezione - normale, trasversa o una delle numerose oblique.

Le differenze fra due proiezioni possono essere viste chiaramente in questo modo: con il mouse si seleziona, per esempio, la proiezione Ginzburg VI nel suo aspetto normale;

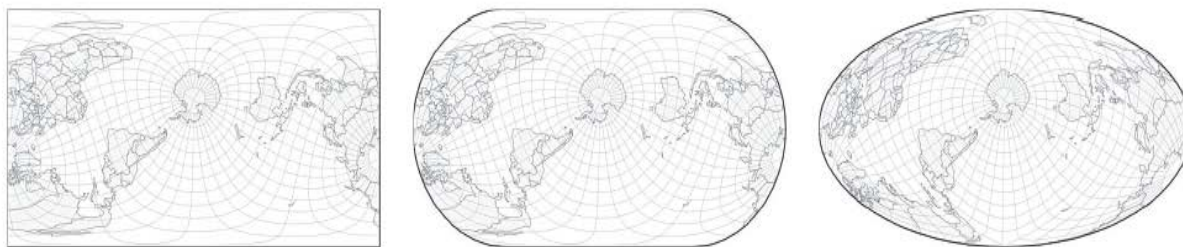


Figura 9.13 - Dall'applicazione *Map Projection Transitions* (<http://www.jasondavies.com/maps/transition>).

volendo vedere come il reticolato geografico di quella proiezione differisce da quella simile di Winkel Tripel, si può fare un clic sulla proiezione "*Winkel Tripel*" nel menu a tendina. La figura sullo schermo cambierà nella proiezione di Winkel e le differenze verranno evidenziate.

Cliccando su "*Maps*", c'è una serie di nuove interessanti applicazioni sulle carte interrotte, a forma di farfalla, proiezioni retro-azimutali e altre proiezioni. In molte di tali applicazioni è possibile usare il mouse per spostare le immagini. Per esempio, selezionando la proiezione sinusoidale interrotta, apparirà una carta formata da tre parti. Il mouse può essere usato per spostare parti della terra da un segmento all'altro e il cursore in fondo allo schermo può essere usato per cambiare il numero di tali segmenti, passando da un planisfero ininterrotto a una rappresentazione composta da 24 segmenti.

Un'opzione simile è disponibile per la proiezione di Berghaus (Snyder and Voxland, 1989). L'applicazione "*Azimuth and Distance from London*" consente di ottenere, usando il mouse, le distanze e l'azimut di qualsiasi punto sulla terra da Londra, su carte realizzate con proiezioni cilindriche oblique equidistanti e azimutali oblique equidistanti. Se un testo dell'applicazione cita una proiezione, c'è un link verso Wikipedia dove si possono leggere informazioni più dettagliate a tale proposito.

9.7.3 Ricerca di nuove proiezioni cartografiche

Nel 2007, ispirati dal metodo di Robinson, B. Jenny, T. Patterson and L. Hurni hanno realizzato il programma interattivo Flex Projector, che consente di creare con facilità nuove proiezioni cartografiche. È un programma compatibile con la vista normale delle proiezioni cilindriche, è gratuito, *open source* e lavora con Linux, Mac OS X e Windows.

Lanciando il programma, come prima cosa appare un planisfero in proiezione Robinson (figura 9.14). Sul lato destro dello schermo sono presenti alcuni cursori per cambiare la lunghezza dei paralleli; cliccando il pulsante "*Distance*", appaiono i controlli per cambiare le distanze dei paralleli dall'Equatore. Le curvature dei paralleli ("*Flessioni*") e le distanze fra i meridiani ("*Meridiani*") possono essere modificate. L'opzione "*Linked sliders*", consente agli utenti di muovere un cursore alla volta o più di uno insieme. L'opzione seguente, "*Move*", viene utilizzata per scegliere la forma della curva lungo la quale si muovono i controlli. Il rapporto tra il meridiano centrale e l'Equatore può essere modificato con il cursore "*Proportions*" (Altezza/Larghezza). Invece di modificare la proiezione di Robinson, si può partire da una delle altre proiezioni a disposizione. Se il risultato non è soddisfacente è possibile tornare alla proiezione iniziale con l'opzione "*Reset Projection*" che si trova nell'angolo in alto a destra.

Con un clic su "*Display*" si aprono opzioni aggiuntive che consentono di modificare la lunghezza del meridiano centrale e la densità del reticolato, di disegnare le ellissi di distorsione nei nodi del reticolo, l'area e gli istogrammi del massimo angolo di distorsione. Lo sfondo appena creato può includere il reticolato geografico e i contorni dei paesi in ogni proiezione attiva (*Show Second Projection*). Nell'angolo in basso a sinistra sono presenti indicatori numerici che riassumono la lunghezza, l'area e l'angolo di distorsione per tutte le proiezioni attive, compresa quella appena creata (figura 9.14).

Flex Projector può importare ed esportare dati sia in forma vettoriale che raster. Il programma è raccomandato a chiunque voglia creare una nuova proiezione cartografica e può essere utilizzato anche per l'insegnamento delle proiezioni.

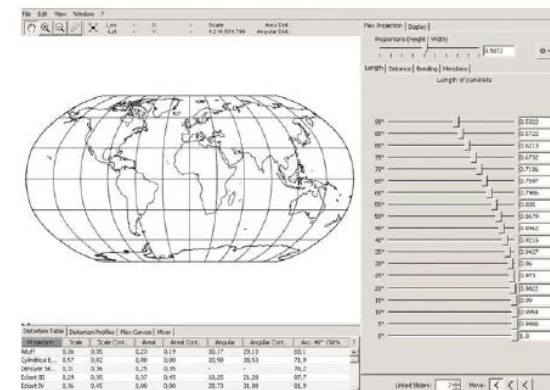


Figura 9.14 - Interfaccia del programma Flex Projector.

Le tecniche per combinare due proiezioni per crearne una nuova consentono la realizzazione di una grande varietà di proiezioni. Geocart, un programma di Mapmathematics può fondere i parametri di due proiezioni (ma anche più) di partenza, come la latitudine o i paralleli standard. Il caso estremo può prevedere un numero infinito di proiezioni con parametri differenti, che è il concetto che sta alla base delle proiezioni policoniche e policilindriche.

Esistono metodi alternativi per creare una nuova proiezione a partire da zero, ovvero ricavandola da una già esistente o modificando i parametri per realizzarne una nuova. Alcune di tali tecniche vengono usate per le proiezioni composite adattabili al web, un nuovo campo di ricerca delle proiezioni cartografiche. L'obiettivo di tale campo di ricerca è quello di sviluppare un'alternativa alla proiezione "Web Mercator" per la cartografia a piccola scala sul web, dove le carte utilizzano in automatico una proiezione ottimale che dipende dalla scala, dal rapporto altezza-larghezza e dalla latitudine centrale dell'area mostrata.

9.8 Proiezioni suggerite

La ragione per cui abbiamo così tante proiezioni è che nessuna serve per ogni necessità. La scelta di una proiezione cartografica appropriata per una certa applicazione dipende da vari fattori, come l'obiettivo della carta, i tipi di dati, la regione della terra che deve essere proiettata e la scala finale della carta.

Consigli sulla scelta si possono ottenere da una varietà di fonti, sia sulla carta stampata che su internet (si guardi il capitolo sugli approfondimenti).

Nei sistemi GIS, gruppi di dati a grande scala (aree di piccola estensione) vengono comunemente proiettati con una proiezione conforme, al fine di conservare gli angoli. Per tali applicazioni, l'area di distorsione è così piccola rispetto all'estensione geografica considerata, che è trascurabile; quindi, una proiezione che conservi l'area, non è necessaria. Di solito, questi gruppi di dati a grande scala fanno riferimento a estensioni geografiche limitate (per esempio, lo spartiacque di una provincia o di una nazione). In questo caso, le due proiezioni più comunemente utilizzate sono la trasversa di Mercatore e la conica conforme di Lambert, che sono, rispettivamente, le basi dell'UTM e della maggior parte dei sistemi di coordinate piane utilizzate negli Stati Uniti.

Per planisferi ad uso generale, la nostra raccomandazione è di non usare nessuna proiezione cilindrica ma scegliere fra le pseudocilindriche (per esempio, la Robinson o una proiezione di compromesso come la Winkel Tripel).

9.9 Conclusioni

Le proiezioni cartografiche e le trasformazioni di coordinate sono le basi per ottenere una struttura di riferimento per l'informazione geografica. Un ellissoide comune, il datum, una proiezione cartografica e un sistema di coordinate piane, rendono possibile l'utilizzo della geometria piana per

tutti i tipi di sovrapposizioni e analisi spaziali.

La proiezione di dati geografici dalla terra ellissoidale a un sistema di coordinate piane porta sempre una distorsione di area, della forma, della distanza e di altre proprietà. Con la scelta di un'opportuna proiezione, gli utenti possono conservare le caratteristiche desiderate a spese di altre.

In questo capitolo abbiamo affrontato brevemente i concetti di base dei sistemi di coordinate e delle proiezioni cartografiche. Per una trattazione approfondita, il lettore può far riferimento ai testi e alle fonti proposti nel paragrafo seguente.

9.10 Approfondimenti

Ulteriori riferimenti ed esercizi con domande e risposte si possono trovare nel capitolo 18.

e-Books di Google sulle proiezioni cartografiche

Bureau of Navigation (1869): *Projection Tables for the Use of the United States Navy Comprising A New Table of Meridional Parts for the Mercator Projection*, Government Printing Office, Washington.

De Morgan, A. (1836): *An Explanation of the Gnomonic Projection of Sphere*, Baldwin and Cradock, London.

Department of the Army (1967): *Grids and Grid References*. United States Headquarters, Department of Army.

Snyder, J. P. (1987): *Map Projections Working Manual*. US Geological Survey, Professional paper 1395, Washington.

Snyder, J. P. and H. Steward (1988): *Bibliography of map projections*, US Geological Survey Bulletin 1856.

Spilhaus, A. (1991): *Atlas of the World Geophysical Boundaries—Ocean, Continents and Tectonic Plates Their Entirety*. American Philosophical Society, Philadelphia.

Libri sulle proiezioni cartografiche disponibili su internet

Anoni, A., C. Luzet, E. Gubler, and J. Ihde (Eds.) (2003): *Map projections for Europe*. Institute for Environment and Sustainability, European Communities.

<http://www.ec-gis.org/sdi/publist/pdfs/annoni-et-al2003eur.pdf>

Frankich, K. (1982): *Optimization of geographic map projections for Canadian territory*. Simon Fraser University, Vancouver. <http://summit.sfu.ca/item/4135>

Hager, J. W., J. F. Behensky, and B.W. Drew (1989): *The universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS)*. Tech. Rep. TM 8358.2, Defense Mapping Agency.

http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.2/TM8358_2.pdf

Krüger, J. H. L. (1912): *Konforme Abbildung des Erdellipsoids in der Ebene*. New Series 52. Royal Prussian Geodetic Institute, Potsdam.

<http://bib.gfz-potsdam.de/pub/digi/krueger2.pdf>

Snyder, J. P. and M. P. Voxland (1989): *Album of Map Projection*, US Geological Survey, Professional Paper 1453. <http://pubs.usgs.gov/pp/1453/report.pdf>

Thomas, P. D. (1952): *Conformal projections in geodesy and cartography*. Special Publication 251. US Coast and Geodetic Survey.

http://docs.lib.noaa.gov/rescue/cgs_specpubs/QB275U35no2511952.pdf

Tobler, W. R. (1961): *Map transformation of geographic space*. University of Washington, Seattle.

http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf_docs/cartography/projections/cartograms/Transformations.pdf