

## 9 Proyecciones cartográficas y sistemas de referencia

Miljenko Lapaine, Croacia  
y E. Lynn Usery, Estados Unidos

### 9.1 Introducción

Un mapa es una proyección de datos, por lo general tomados de la Tierra, de un cuerpo celeste, o de un mundo imaginario, en una representación sobre un plano; esta representación puede ser en formato papel o en formato digital, como en un ordenador. Por lo general, los mapas se crean mediante la transformación de datos del mundo real a una superficie esférica o elipsoidal, y finalmente a un plano. Una característica fundamental de esa superficie esférica o elipsoidal es que los ángulos, las distancias o las superficies medidas en ella son proporcionales a las medidas en la Tierra real. La transformación de una superficie curva a un plano se conoce como proyección cartográfica y puede asumir gran variedad de formas; todas ellas implican de una manera u otra distorsión de áreas, ángulos, y/o distancias. Los tipos de distorsión pueden controlarse con el fin de preservar determinadas características específicas pero, con ello, las proyecciones de mapas distorsionarán otras características de los objetos representados. El principal problema en la cartografía es que no es posible proyectar/transformar, sin distorsiones, una superficie esférica o elipsoidal sobre un plano. Solo un globo esférico o con forma elipsoidal puede representar las características de la Tierra redonda o de un cuerpo celeste tal y como son.

El proceso de proyección se realiza en tres pasos específicos:

1. Asimilación del tamaño y la forma del objeto (por ejemplo, la Tierra) a una forma matemática, como puede ser una esfera o un elipsoide.

2. Reducción de la escala de la representación matemática a un esferoide o elipsoide (un modelo reducido de la Tierra desde el que se realizan proyecciones de mapas) con la escala principal o nominal, que es la relación entre el radio del esferoide o elipsoide y el radio de la figura matemática que representa a la Tierra, equivalente a la escala del mapa plano.
3. Transferencia del esferoide o elipsoide al plano con ayuda de una proyección cartográfica (véase la figura 9.1).

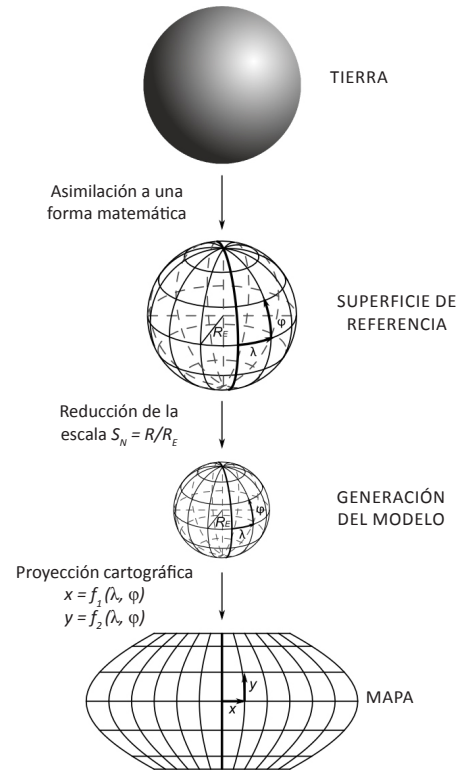


Figura 9.1. Proyección cartográfica de la Tierra mediante un esferoide para generar el mapa final (Canter, 2002).

Las proyecciones cartográficas dependen, en primer lugar, de la asunción de los parámetros específicos del propio objeto (de la Tierra), como puede ser la forma esférica o elipsoidal, el radio de la esfera (o longitudes de los semiejes mayor y menor del elipsoide) y un datum específico o punto de partida, para la representación de un sistema de coordenadas. Estos supuestos son la base de la ciencia de la Geodesia, y en la actualidad esas mediciones se llevan a cabo utilizando satélites, que utilizan por lo general un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), el GLONASS o el Galileo (véase la sección 9.2). Una vez que se aceptan esas medidas, se genera una representación elipsoidal de coordenadas, con coordenadas latitud y longitud. Esas coordenadas pueden transferirse, a través de las ecuaciones de una proyección cartográfica, a un sistema cartesiano plano, de coordenadas X e Y. Las ecuaciones de esas transformaciones tienen la siguiente forma:

$$X = f_1(\phi, \lambda), Y = f_2(\phi, \lambda)$$

donde

X es el plano de coordenadas en la dirección Este-Oeste  
Y es el plano de coordenadas en la dirección Norte-Sur  
 $\phi$  es la coordenada latitud  
 $\lambda$  es la coordenada longitud

La forma de las funciones  $f_1$  y  $f_2$  determina la transformación exacta y las características de la representación esférica o elipsoidal que van a ser conservadas.

Antes de abordar los diferentes tipos específicos de transformaciones y las características a conservar, es necesario entender las características geodésicas de las coordenadas elipsoidales y cómo éstas se generan con los actuales sistemas de posicionamiento por satélite.

## 9.2 Geodesia y sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)

Las proyecciones cartográficas tienen sus mayores y más frecuentes aplicaciones en la producción de mapas, que muestran partes más pequeñas o más grandes de la superficie de la Tierra. Con el fin de elaborar el mapa de una región, es necesario hacer un estudio geodésico de esa región y luego visualizar los resultados de tal estudio. La Geodesia es una ciencia y tecnología que trata del estudio y representación de la superficie terrestre, la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, y su campo de gravedad. La Geodesia puede dividirse en aplicada, física y geodesia por satélite.

La Geodesia aplicada es una parte de la Geodesia que abarca la Topografía, la Ingeniería geodésica y la gestión de la información geoespacial. La Topografía del terreno es una técnica para evaluar la posición relativa de los objetos en la superficie de la Tierra, sin tener en cuenta su curvatura. La Ingeniería geodésica es una parte de la Geodesia empleada en el diseño, medición y supervisión de construcciones y otros objetos (por ejemplo, carreteras, túneles y puentes).

La Geodesia física es una parte de la Geodesia que se ocupa del campo gravitatorio de la Tierra y su implicación en las mediciones geodésicas. El principal reto de la Geodesia física es la determinación de las dimensiones del geoide, un modelo a nivel de la superficie de la Tierra, donde el potencial del campo de la gravedad es constante. La Geodesia geométrica tiene que ver con la determinación de la forma, el tamaño y la ubicación exacta de las partes de la Tierra, teniendo en cuenta su curvatura.

La Geodesia por satélite es la parte de la Geodesia en la que se utilizan satélites para las mediciones. En el pasado, las posiciones exactas de puntos aislados en la Tierra se determinaban a través de la Geodesia astronómica, es decir, realizando mediciones a partir

de las estrellas. Algunas de las técnicas de medición en la Geodesia por satélite incluyen el uso geodésico de Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS), como el GPS, el Glonass y el Galileo.

Un sistema de navegación por satélite es un sistema de satélites que proporciona un posicionamiento geoespacial autónomo con cobertura global. Permite a pequeños receptores electrónicos determinar su localización (longitud, latitud y altitud) utilizando señales temporales de radio transmitidas a través de los satélites. Los receptores calculan el instante de tiempo preciso, así como la posición. Un sistema de navegación por satélite con cobertura global puede ser denominado sistema de navegación global por satélite o GNSS. Desde abril de 2013, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) NAVSTAR de los Estados Unidos y el GLONASS ruso, son los únicos GNSS operativos a nivel global. China está en el proceso de expansión de su sistema regional de navegación Beidou, que se convertirá en un GNSS para el año 2020. El sistema de posicionamiento Galileo de la Unión Europea es un GNSS en fase inicial; se espera que esté en pleno funcionamiento, como muy pronto, hacia 2020. Francia, India y Japón están también desarrollando sistemas de navegación regionales. La cobertura mundial de cada sistema se consigue generalmente mediante una constelación de 20 a 30 satélites en órbita terrestre media, posicionados a lo largo de varios planos orbitales. Los sistemas actuales varían entre sí pero, no obstante, utilizan inclinaciones orbitales de más de 50° y períodos orbitales de aproximadamente doce horas, a una altitud de unos 20.000 kilómetros.

La Fotogrametría es una tecnología importante para la obtención de información cuantitativa fiable sobre objetos físicos y el entorno mediante el uso de grabación, mediciones y fotointerpretación de fotografías y escenas de radiación electromagnética que utilizan sistemas de sensores. La Teledetección es

un método de recopilación e interpretación de datos de objetos a distancia. El método se caracteriza por el hecho de que el dispositivo de medición no está en contacto con el objeto de estudio. Se aplica con más frecuencia desde plataformas aéreas o espaciales.

El estudio de la transformación del modelo de la superficie de la Tierra a una representación bidimensional requiere el uso de los siguientes conceptos: elipsoide, datum y sistema de coordenadas. Cada uno de ellos se describe a continuación.

La *elipsoide de la Tierra* es cualquier elipsoide que se pueda aproximar a su forma. En general, un elipsoide cuenta con tres ejes diferentes, pero en geodesia y cartografía, lo más frecuente es utilizar un elipsoide de rotación un poco achatado (véase la figura 9.2).

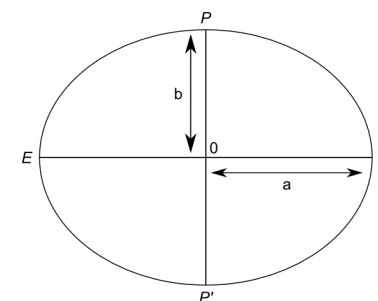


Figura 9.2. Terminología para el elipsoide de rotación:  $EE'$  es el eje mayor,  $PP'$  es el eje menor y el eje de rotación, donde  $a$ , es el semieje mayor y  $b$  es el semieje menor.

El elipsoide de rotación es la superficie resultante de la rotación de una elipse alrededor de una línea recta que pasa por los puntos extremos de dicha elipse. Se utiliza para modelar la Tierra. Algunos elipsoides terrestres famosos son los elaborados por Bessel (1841) y, más recientemente, los elipsoides WGS84 y GRS80. El achatamiento es un parámetro utilizado para determinar la diferencia entre el elipsoide y la esfera. Se define

por la ecuación  $f = \frac{a-b}{a}$ , donde  $a$  y  $b$  son el semieje mayor y el semieje menor, respectivamente. El semieje mayor  $a$ , es el radio ecuatorial porque el ecuador es un círculo. El semieje menor  $b$  no es un radio, porque cualquier sección plana del elipsoide que tiene polos  $P$  y  $P'$  como puntos comunes es una elipse y no un círculo.

En términos generales, un datum es un conjunto de parámetros básicos que sirven de referencia para definir otros parámetros. Un datum geodésico describe la relación del origen y orientación de los ejes en un sistema de coordenadas con la Tierra. Se necesitan al menos ocho parámetros para definir un datum mundial: tres para la determinación del origen, tres para la determinación de la orientación del sistema de coordenadas y dos para la determinación del elipsoide geodésico. Un datum de dos dimensiones es una referencia para la definición de coordenadas bidimensionales sobre una superficie. La superficie puede ser un elipsoide, una esfera o incluso un plano cuando la región de interés es relativamente pequeña. Un datum unidimensional, o datum vertical, es una base para la definición de las alturas y por lo general posee alguna relación con el nivel medio del mar.

Los elipsoides WGS84 y GRS80 se han establecido mediante técnicas de posicionamiento por satélite. Están referidos al centro de masas de la Tierra (es decir, son geocéntricos) y proporcionan un ajuste razonable en toda la Tierra. El datum WGS84 proporciona la base de coordenadas recogidas de los GPS, aunque los receptores modernos transforman las coordenadas en casi cualquier datum seleccionado por el usuario.

La necesidad de transformación de datum surge cuando los datos pertenecen a un datum determinado y hace falta referirlos a otro (por ejemplo, de WGS84 al North American Datum de 1927, o viceversa). Hay varias maneras diferentes de transformar un datum, y los lectores pueden consultar las referencias geodésicas

apropiadas (véase la sección «Lecturas adicionales») o el manual de sus respectivos dispositivos.

### 9.3 Sistemas de referencia de coordenadas tridimensionales

Las coordenadas geodésicas son la latitud y la longitud geodésicas, con o sin altitud. También se denominan coordenadas elipsoidales.

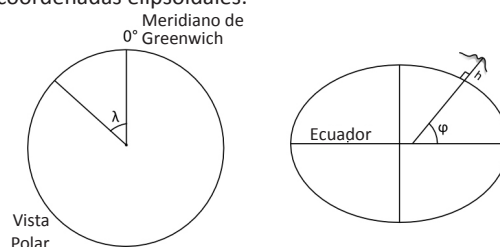


Figura 9.3. Sistema geodésico o elipsoidal de coordenadas.

La latitud geodésica es un parámetro que determina la posición de los paralelos sobre el elipsoide de la Tierra y se define mediante el ángulo desde el plano ecuatorial a la normal (o línea perpendicular) al elipsoide en un punto dado. Normalmente abarca el intervalo  $[-90^\circ, 90^\circ]$  y se representa con la letra griega  $\phi$ . Un aumento de la latitud geodésica marca la dirección Norte, mientras que su descenso marca la dirección Sur. La longitud geodésica es un parámetro que determina la posición de los meridianos del elipsoide de la Tierra y se define mediante el ángulo desde el plano del meridiano de Greenwich (que es el meridiano del Observatorio de Greenwich, cerca de Londres) hasta el punto dado en el plano meridiano. Generalmente abarca el intervalo  $[-180^\circ, 180^\circ]$  y se representa con la letra griega  $\lambda$ . Un aumento en las longitudes geodésicas determina la dirección Este, mientras que una disminución determina la dirección Oeste (véase la figura 9.3).

Un datum geodésico debe definir la relación de las coordenadas geodésicas con la Tierra. Las coordenadas geodésicas  $\phi$ ,  $\lambda$  y la altura  $h$  se pueden transformar a un sistema tridimensional cartesiano centrado en la Tierra, utilizando las siguientes ecuaciones:

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

donde

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

Si queremos representar una gran parte de la Tierra, un continente o incluso el mundo entero, el achatamiento de la Tierra puede despreciarse. En ese caso, hablamos de un sistema de coordenadas geográficas, en lugar de un sistema de coordenadas geodésicas. Las coordenadas geográficas son la latitud y la longitud geográficas, con o sin altitud. También se denominan coordenadas esféricas. La latitud geográfica es un parámetro que determina la posición de los paralelos sobre la esfera terrestre, se define por el ángulo desde el plano ecuatorial a la normal al esferoide en un punto dado. Normalmente abarca el intervalo  $[-90^\circ, 90^\circ]$  y se representa con la letra griega  $\phi$ . Un aumento de la latitud geográfica marca la dirección Norte, mientras que su descenso marca la dirección Sur. La longitud geográfica es un parámetro que determina la posición de los meridianos de la esfera terrestre, se define por el ángulo desde el plano del meridiano principal hasta el punto dado en el plano meridiano. Generalmente abarca el intervalo  $[-180^\circ, 180^\circ]$  y se representa con la letra griega  $\lambda$ . Un aumento en las longitudes geográficas determina la dirección Este, mientras que una disminución determina la dirección Oeste (véase la figura 9.4).

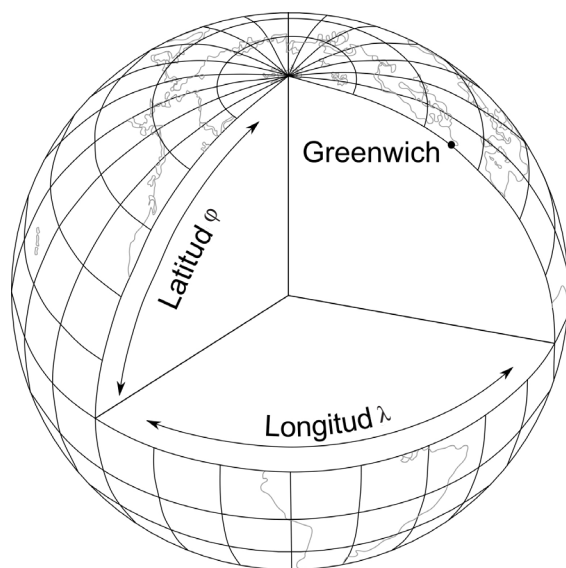


Figura 9.4. Sistema de coordenadas geográficas o esféricas:  $\varphi$  es la latitud geográfica y  $\lambda$  es la longitud geográfica.

Las coordenadas geográficas  $\varphi$ ,  $\lambda$  y la altura  $h = 0$  se pueden transformar a un sistema tridimensional cartesiano centrado en la Tierra utilizando las siguientes ecuaciones:

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

donde  $R$  es el radio de la Tierra esférica.

Un sistema de coordenadas esféricas se puede obtener como un caso especial de un sistema de coordenadas elipsoidales, teniendo en cuenta que el achatamiento es igual a cero,  $f = 0$ , o de manera equivalente, indicando que la segunda excentricidad es igual a cero,  $e = 0$ .

A veces, en la práctica geodésica y cartográfica, es necesario transformar las coordenadas tridimensionales cartesianas en coordenadas esféricas o incluso elipsoidales. Además, a veces hay necesidad de hacer una transformación de un sistema tridimensional de coordenadas a otro. Existen métodos y ecuaciones apropiadas, el lector puede consultar la información disponible (véase el capítulo 18).

#### 9.4 Sistemas de referencia de coordenadas bidimensionales

En general, para el uso de los datos geoespaciales se necesita un marco de referencia común y eso se suele resolver con un sistema de referencia plano. Debido a que los mapas se presentan en un sistema de geometría plana, las coordenadas esféricas o elipsoidales, generadas a partir de los sistemas de posicionamiento por satélite o de cualquier otro dispositivo de reconocimiento, deben ser transformadas matemáticamente al sistema de geometría plana. La transformación más simple es asumir que la coordenada plana  $X$  es equivalente a la  $\varphi$  y la coordenada plana  $Y$  es equivalente a la  $\lambda$ . El resultado se conoce como proyección *Plate Carrée* y, aunque es simple, conlleva una distorsión significativa de las posiciones de las coordenadas y por lo tanto presenta las áreas, la mayoría de las distancias y los ángulos distorsionados o deformados en el plano.

Transformaciones más sofisticadas permiten la preservación de representaciones precisas de áreas, de distancias, de ángulos o de otras características, pero no todas ellas pueden conservarse en la misma transformación. De hecho, por lo general solo se puede mantener una sola característica, por ejemplo la preservación de la representación exacta de las áreas, lo que da como resultado una distorsión de las otras características. Por lo tanto, se han desarrollado muchos tipos diferentes de proyecciones cartográficas

para permitir la preservación de las características específicas que un usuario pueda requerir de un mapa. Los siguientes apartados que vamos a presentar proporcionan la discusión y la base matemática para las transformaciones que preservan características específicas de la superficie de la Tierra, en concreto las áreas, los ángulos y las distancias.

El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) se basa en las proyecciones de husos de  $6^\circ$  de longitud, entre los paralelos de latitud  $80^\circ\text{S}$  a  $84^\circ\text{N}$ , cuyo factor escala es de 0,99946 para el meridiano central de cada zona UTM y produce un error máximo de 1 parte en 2.500. En el hemisferio Norte, la coordenada  $X$  del meridiano central se compensa dándole un valor de 500.000 metros en lugar de cero y normalmente se denomina como «Falso Este». La coordenada  $Y$  tiene valor 0 en el ecuador. En el hemisferio Sur, el Falso Este también es de 500.000 metros con un desplazamiento de la coordenada  $Y$  respecto del ecuador o Falso Norte, igual a 10.000.000 metros. Estos desplazamientos hacen que todas las coordenadas en el sistema tengan valor positivo.

En el Sistema de la Cuadrícula Militar Universal (MGRS), las zonas polares, al Norte de  $84^\circ\text{N}$  y al Sur de  $80^\circ\text{S}$ , se proyectan sobre la cuadrícula de la Proyección Universal Estereográfica Polar (UPS), con el Polo como el centro de proyección y un factor de escala 0,9994. Se denominan «Zona Norte» y «Zona Sur».

La proyección cartográfica también depende de la forma del país. En los Estados Unidos de América, el Sistema de Coordenadas Estatal se estableció de tal forma que, los estados con un mayor eje de Este a Oeste, como por ejemplo Tennessee, usan la proyección cónica conforme de Lambert, mientras que los estados con un mayor eje de Norte a Sur, como Illinois, utilizan la proyección transversal de Mercator. No solo hay que definir la proyección y la escala del mapa, sino también las unidades de medida de las coordenadas, que constituyen una parte importante de cualquier mapa. Con el fin de

estar seguro de la exactitud de los datos extraídos de un mapa, hay que leer cuidadosamente toda la información escrita en él y, si es necesario, solicitar información adicional a la Agencia Cartográfica Nacional.

Un sistema de coordenadas planas de relevancia final para el modelado y análisis de datos geográficos, en particular para las imágenes de satélite y las fotografías, es un sistema de coordenadas sobre la imagen. Es un sistema de imagen digital, no un sistema de coordenadas como los habituales, ya que normalmente el punto inicial (0, 0) se asigna a la esquina superior izquierda de la imagen. La coordenada X, a menudo llamada de muestra, aumenta hacia la derecha, pero la coordenada Y, llamada de línea, aumenta hacia abajo. Las unidades generalmente se expresan en elementos de imagen o píxeles. Un píxel es una unidad discreta de la superficie de la Tierra, por lo general un cuadrado con un tamaño definido, a menudo expresado en metros.

Con frecuencia, en la práctica geodésica y cartográfica, es necesario transformar las coordenadas de un plano cartesiano de dos dimensiones a otro sistema bidimensional de coordenadas planas. El método indirecto transforma las coordenadas planas de dos dimensiones en coordenadas esféricas o elipsoidales mediante el uso de las denominadas ecuaciones inversas de proyección de mapas. Luego, el método se continúa con las ecuaciones de proyección de mapas apropiadas que dan el resultado en el segundo plano, en el otro sistema de dos dimensiones. El método directo transforma coordenadas planas de un sistema a otro mediante rotación, traslación, escalado o cualquier otra transformación bidimensional. Para más detalles, el lector debe consultar las referencias que se citan.

## 9.5 Clases de proyecciones cartográficas

Las proyecciones se pueden clasificar en función de la geometría, forma, propiedades especiales, parámetros

de proyección y nomenclatura. La clasificación geométrica se basa en los patrones de la cuadrícula (la red de paralelos de latitud y meridianos de longitud). De acuerdo con esa clasificación, las proyecciones cartográficas a las que generalmente se hace referencia son las cilíndricas, las cónicas y las azimutales, pero también hay otras. En las referencias se puede encontrar una descripción completa de esos patrones geométricos y los nombres asociados.

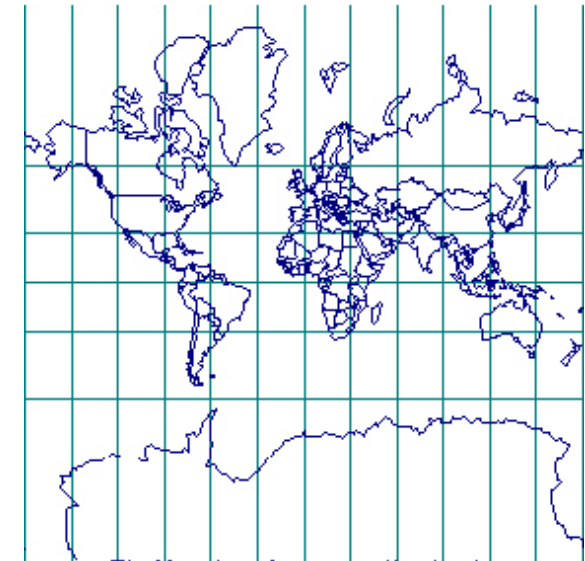
Una proyección azimutal también proyecta la imagen de la Tierra sobre un plano. Un mapa producido en proyección cilíndrica se puede disponer en un cilindro, mientras que un mapa producido en proyección cónica se puede proyectar en un cono. En primer lugar, aceptemos que casi todas las proyecciones de mapas en uso derivan de la aplicación de las matemáticas, especialmente del cálculo diferencial. Ese proceso permite la preservación de las características específicas y la minimización de la distorsión, tanto en las relaciones angulares (de forma) como en las áreas.

### 9.5.1 Proyecciones cilíndricas

Las proyecciones cilíndricas son aquellas que proporcionan la apariencia de un rectángulo. El rectángulo puede ser visto como una superficie cilíndrica desenrollada, que puede volverse a enrollar en un cilindro. Aunque esas proyecciones realmente se crean matemáticamente y no desde un cilindro, el punto de vista final puede sugerir una construcción cilíndrica. Una proyección cilíndrica puede tener una o dos líneas sin distorsión de escala. Ejemplos clásicos de proyecciones cilíndricas incluyen la proyección conforme de Mercator y la proyección equivalente de Lambert (véase la figura 9.5).

Las proyecciones cilíndricas se utilizan a menudo para mapamundis con la latitud limitada a un rango razonable de grados al Sur y al Norte, para evitar la gran distorsión

de las zonas polares por ese método de proyección. La proyección normal de Mercator se utiliza para las cartas náuticas de todo el mundo, mientras que su punto de vista transversal se utiliza normalmente para mapas topográficos y es la proyección utilizada para el sistema de coordenadas UTM descrito anteriormente.



(a)



(b)

Figura 9.5. La proyección cilíndrica conforme de Mercator (a) y la proyección cilíndrica equivalente de Lambert (b).



### 9.5.2 Proyecciones cónicas

Las proyecciones cónicas tienen el punto de vista de una superficie desenrollada de un cono, que puede ser enrollada a su vez en un cono. Estas proyecciones se crean generalmente de forma matemática y no por proyección sobre una superficie cónica. Puede haber una sola línea o dos líneas como líneas sin ninguna distorsión de escala.



(a)



(b)

Figura 9.6. Proyecciones cónica conforme de Lambert (a) y cónica equivalente de Albers (b).

Ejemplos clásicos de proyecciones cónicas son la proyección cónica conforme de Lambert y la equivalente de Albers (véase la figura 9.6). Las proyecciones cónicas resultan inapropiadas para los mapas que abarcan toda la Tierra y dan mejor resultado en zonas con un mayor eje longitudinal en la dirección Este-Oeste. Eso las hace ideales para las representaciones de las masas de tierra en el hemisferio Norte, como los Estados Unidos de América, Europa o Rusia.

### 9.5.3 Proyecciones azimutales

Las proyecciones azimutales son aquellas que preservan los azimutes (es decir, las direcciones relativas al Norte en su punto de vista normal). Un solo punto o un círculo pueden existir sin distorsión de escala. Ejemplos clásicos de proyecciones azimutales incluyen la estereográfica y la azimutal equivalente de Lambert (véase la figura 9.7).

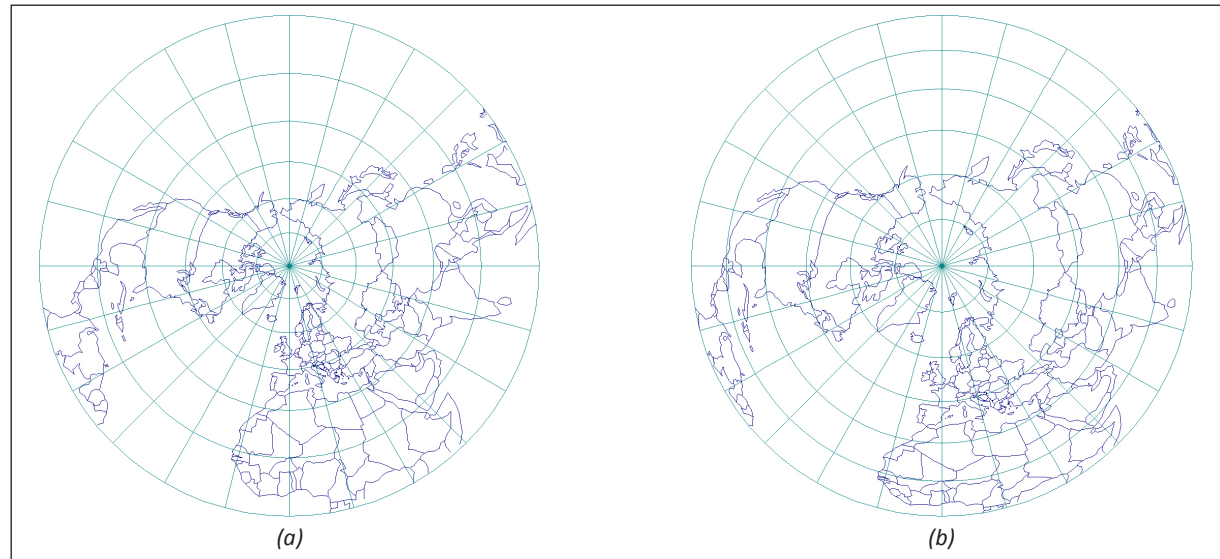


Figura 9.7. Proyecciones estereográfica (a) y azimutal equivalente de Lambert (b).

### 9.5.4 Otras clasificaciones

Otras clasificaciones de las proyecciones cartográficas se basan en su aspecto (es decir, el punto de vista y la posición de la retícula, los polos o el ecuador en la proyección). El punto de vista puede ser polar, ecuatorial, normal, transversal u oblicuo. En consecuencia, hay proyecciones cartográficas polares, normales, ecuatoriales, transversales y oblicuas. Esos son los nombres de los conjuntos individuales de proyecciones cartográficas y no una categorización sistemática porque, por ejemplo, una proyección puede ser polar y normal al mismo tiempo. En teoría, cada proyección puede incluir cualquiera de esos puntos de vista. Sin embargo, muchas proyecciones se utilizan casi siempre para aprovechar algunos de esos puntos de vista con el fin de mostrar algunas de sus características de la mejor manera posible.

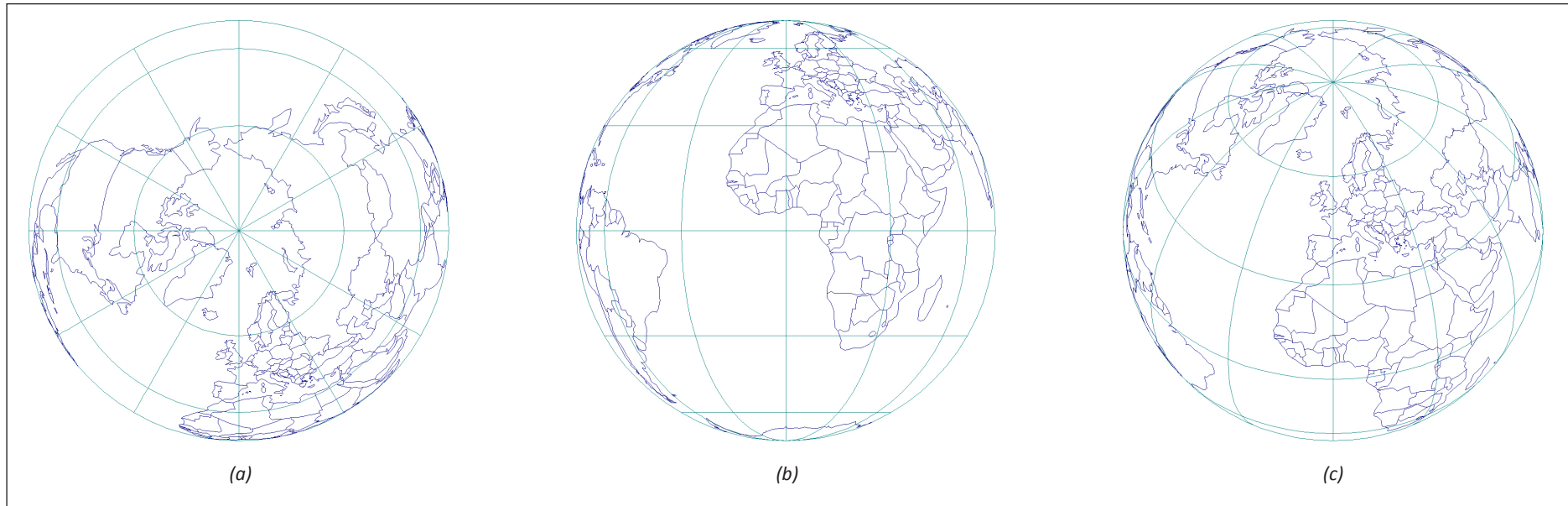


Figura 9.8. Proyección ortográfica en sus aspectos: normal (a), transversal (b) y oblicuo (c).

Por ejemplo, muchos factores tales como la temperatura, la contaminación y la biodiversidad dependen del clima (es decir, de la latitud). Para las proyecciones con una distancia constante entre los paralelos, la latitud en el punto de vista ecuatorial se puede convertir directamente en distancia vertical, lo que facilita la comparación. Algunas proyecciones con cuadrículas de punto de vista normal y con apariencia de simples curvas, fueron originalmente definidas mediante construcciones geométricas.

Teniendo en cuenta que la mayoría de proyecciones transversales y oblicuas tienen retículas que consisten en curvas complejas, tales proyecciones no fueron analizadas de forma sistemática antes de la era de la informática. En general, el cálculo de proyecciones oblicuas para un elipsoide en particular es muy complejo y no se ha desarrollado para todas las proyecciones.

Sin embargo, las proyecciones oblicuas tienen muchas aplicaciones.

Una proyección cartográfica es una proyección normal o presenta un punto de vista normal, si el punto de vista y la posición de la cuadrícula, los polos y el ecuador en la proyección son los más naturales y generalmente están determinados por las condiciones geométricas. Está a menudo determinada por los cálculos más simples o la apariencia más simple de la cuadrícula. El punto de vista polar es normal para proyecciones azimutales, mientras que el punto de vista ecuatorial es normal para las proyecciones cilíndricas. En proyecciones cónicas y azimutales, la retícula se compone de líneas rectas y arcos de círculo; las proyecciones cilíndricas de punto de vista normal tienen retículas que consisten solo en líneas rectas y forman una cuadrícula rectangular.

Una proyección cartográfica es una proyección transversal o presenta un punto de vista transversal, si el aspecto y la posición de la retícula, los polos o el ecuador en la proyección se han obtenido mediante la aplicación de fórmulas para la proyección desde un punto de vista normal a un globo que ha sido rotado previamente  $90^\circ$  en torno a su centro, de modo que los polos se sitúan en el plano ecuatorial.

Una proyección cartográfica es una proyección polar o tiene un punto de vista polar si la imagen de un polo está en el centro del mapa.

A menudo se utiliza como sinónimo de proyección azimutal con un punto de vista normal.

Una proyección cartográfica es ecuatorial o presenta un punto de vista ecuatorial si la imagen del ecuador está

en el centro del mapa. La imagen de la línea ecuatorial se coloca en la dirección de uno de los ejes principales del mapa, la mayoría de las veces, horizontalmente. La proyección ecuatorial a menudo significa una proyección cilíndrica desde un punto de vista normal.

Una proyección cartográfica es una proyección oblicua o presenta un punto de vista oblicuo, si no es ni polar ni ecuatorial, ni de punto de vista transversal ni normal (véase la figura 9.8).

## 9.6 Preservar propiedades específicas en las proyecciones cartográficas

Las proyecciones cartográficas están diseñadas generalmente para preservar algunas características específicas del mundo, tales como áreas, ángulos, distancias o propiedades específicas tales como que los grandes círculos (intersecciones de la Tierra y un plano que pasa por el centro de la Tierra) se transformen en líneas rectas. Los mapas que conservan los ángulos se denominan proyecciones *conformes*.

Los mapas que conservan las áreas se denominan *áreas equivalentes* o proyecciones *equivalentes*.

### 9.6.1 Preservación de ángulos

Gerardus Mercator desarrolló en 1569 una proyección cilíndrica conforme que lleva su nombre. La desarrolló para mostrar loxodrómicas o líneas de rumbo, que son líneas de rumbo constante, líneas rectas, que hacen posible navegar a un rumbo constante, a partir del trazado de una línea de rumbo en la carta de navegación. La proyección Mercator representa los meridianos como líneas paralelas entre sí uniformemente espaciadas (equidistantes), pero tiene paralelos desigualmente espaciados, que están más juntos cuanto más cerca están del ecuador y son perpendiculares a los meridianos.

Los polos Norte y Sur no se pueden mostrar. La escala es verdadera a lo largo del ecuador o a lo largo de dos paralelos equidistantes del ecuador. Se produce una distorsión significativa del tamaño en las latitudes más altas, y por eso no se recomienda la proyección Mercator para mapamundis (véase la figura 9.5a). La proyección Mercator, un estándar para cartas marinas, se definió para las cartas de navegación y es en la navegación donde más y mejor se utiliza.

### *Transversa de Mercator*

La proyección transversa de Mercator, también conocida como proyección de Gauss-Krüger, es una proyección donde la línea donde la escala es constante es un meridiano en lugar de la línea ecuatorial. El meridiano central y el ecuador son líneas rectas. Otros meridianos y paralelos son curvas complejas y son cóncavas hacia el meridiano central. La proyección tiene escala verdadera a lo largo del meridiano central o a lo largo de dos líneas equidistantes y paralelas a él. Generalmente se utiliza para presentaciones de pequeñas áreas a gran escala. Debido a la distribución de la distorsión, se utiliza generalmente dividiendo la región a cartografiar en zonas de tres o de seis grados, limitadas por meridianos. Esta proyección se utiliza frecuentemente para mapas topográficos a escalas 1:25.000 a 1:250.000, y es la base del sistema de coordenadas UTM.

### *Cónica conforme de Lambert*

La proyección cónica conforme de Lambert (CCL), presentada por Johann Heinrich Lambert en 1772, muestra los meridianos como líneas rectas equidistantes que convergen en uno de los polos (véase la figura 9.6a). Los ángulos entre los meridianos en la proyección son más pequeños que los ángulos correspondientes en el globo. Los paralelos son arcos circulares concéntricos desigualmente espaciados y centrados en el Polo, de tal

forma que el espaciamiento entre los paralelos aumenta según se alejan del polo. El polo más cercano al paralelo estándar es un punto y el otro polo no se puede mostrar. La escala es verdadera a lo largo del paralelo estándar o a lo largo de dos paralelos estándar, y es constante a lo largo de cualquier paralelo determinado. La proyección cónica conforme de Lambert se utiliza ampliamente para la cartografía a gran escala de las regiones con un eje Este-Oeste pronunciado y en regiones de latitud media. Es habitual en muchos países para mapas a escala 1:500.000, así como para las cartas aeronáuticas a una escala similar.

### *Estereográfica*

La proyección estereográfica, desarrollada en el siglo segundo antes de Cristo, es una proyección en perspectiva azimutal que conserva los ángulos (es decir, que es conforme). Esta proyección es la única proyección en la que todos los círculos del globo se representan como círculos en el plano de proyección. Los puntos de vista polares, ecuatoriales y oblicuos ocasionan diferentes puntos de vistas de la retícula. El polar se logra mediante la proyección de un polo a un plano tangente en el otro polo. En este punto de vista, los meridianos son líneas rectas equidistantes que se cortan en el polo con ángulos verdaderos entre ellos. Los paralelos son círculos desigualmente espaciados y centrados en el polo, representado como un punto. El espaciamiento de los paralelos aumenta conforme se alejan del polo. La proyección estereográfica se utiliza con punto de vista polar para los mapas topográficos de las regiones polares. La proyección Estereográfica Universal Polar (PEP) es la proyección hermana de la UTM para la cartografía militar. Esta proyección se elige generalmente para las regiones que tienen forma aproximadamente circular. Se usa en forma elipsoidal oblicua en un número de países de todo el mundo, incluyendo Canadá, Rumania, Polonia y los Países Bajos. Diferentes países tienen diferentes desarrollos matemáticos o versiones de la proyección estereográfica.



## 9.6.2 Preservación de áreas

### **Proyección cilíndrica equivalente de Lambert**

La proyección cilíndrica equivalente (de áreas equivalentes) fue presentada por primera vez por Johann Heinrich Lambert en 1772 y se convirtió en la base para muchas otras proyecciones equivalentes similares, incluyendo la Gall, la Behrmann, y las proyecciones Trystan-Edwards. La proyección original de Lambert utiliza una sola línea de escala constante a lo largo de la línea del ecuador (véase la figura 9.5b). Se elaboran proyecciones equivalentes similares utilizando dos paralelos como las líneas de escala constante. En la proyección cilíndrica equivalente de Lambert, los meridianos son líneas rectas paralelas y equidistantes, y el ecuador es  $\pi$  veces más largo que los meridianos. Las líneas de latitud son líneas paralelas desigualmente espaciadas, más alejadas cuanto más cerca del ecuador, y perpendiculares a los meridianos. Cambiar el espaciamiento de los paralelos es el método utilizado para preservar áreas iguales. No obstante, las importantes distorsiones de distancias y ángulos dan lugar a una distorsión mayor en latitudes altas cerca de los polos. Esta proyección no se utiliza a menudo directamente para la elaboración de mapas, pero supone un estándar para describir los principios de las proyecciones cartográficas en libros de texto, y también ha servido como prototipo para otras proyecciones.

### **Mollweide**

En 1805, Carl Brandan Mollweide desarrolló una proyección equivalente pseudocilíndrica en la que el meridiano central es una línea recta una vez y media más larga que el ecuador, y se forma un área elíptica de la proyección para el mundo entero. Los meridianos  $90^\circ$  Este y Oeste del meridiano central, forman un círculo en la proyección de Mollweide. Otros meridianos

son semielipses equidistantes que se cortan en los polos y son cóncavas hacia el meridiano central. Los paralelos son líneas rectas desigualmente espaciadas y perpendiculares al meridiano central. Los paralelos son más distantes cerca del ecuador con un espaciamiento que cambia gradualmente.



Figura 9.9. Logo de la ICA (ACI) en la proyección Mollweide.

Los polos Norte y Sur se muestran como puntos y la escala es solo correcta a lo largo de las latitudes  $40^\circ 44'$  Norte y Sur, y constante a lo largo de cualquier latitud dada. Se muestra todo el mundo proyectado y centrado sobre el meridiano de Greenwich en la figura 9.9. En ocasiones, se ha utilizado la proyección de Mollweide para mapamundis, especialmente para mapas temáticos en los que es importante la preservación del área. Se han utilizado diferentes punto de vista de la proyección Mollweide con fines educativos, y ha sido elegida para el logotipo de la ACI (véase la figura 9.9).

### **9.6.3 Proyecciones de compromiso**

Las proyecciones cartográficas que no son ni conformes ni equivalentes, se llaman proyecciones de compromiso. Son casi ilimitadas en su variedad. Entre ellas se encuentran muchas proyecciones importantes y útiles.

### **Ortográfica**

La proyección ortográfica, desarrollada en el siglo segundo antes de Cristo, es una proyección azimutal

perspectiva que no es ni conforme ni equivalente. Se utiliza con puntos de vistas polares, ecuatoriales y oblicuos y da como resultado una vista de un hemisferio entero. El punto de vista polar de la proyección presenta a los meridianos como líneas rectas que cruzan el polo central con los verdaderos ángulos entre dichos meridianos. El polo es un punto y los paralelos son círculos desigualmente espaciados y centrados en el polo. El espaciamiento de los paralelos disminuye conforme se alejan del polo. La escala es verdadera en el centro y a lo largo de la circunferencia de cualquier círculo con su centro en el centro de proyección. Es esencialmente una proyección en perspectiva del mundo sobre un plano a una distancia infinita (ortogonal) (véase la figura 9.8). Se usa comúnmente para vistas pictóricas de la Tierra como si fuera observada desde el espacio.

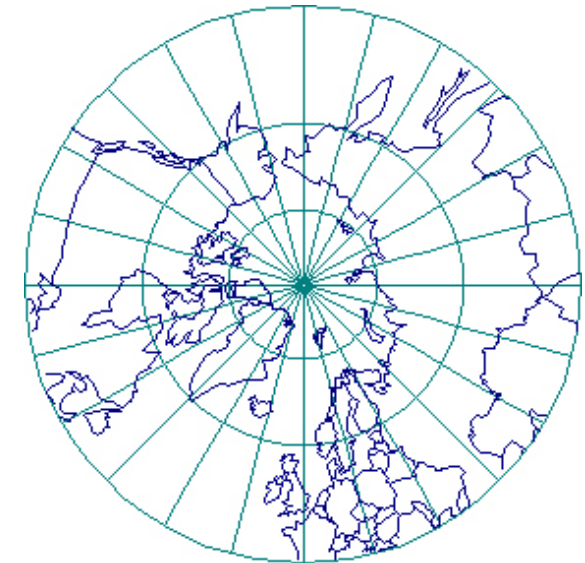


Figura 9.10. La proyección gnomónica, que representa los grandes círculos como líneas rectas.

### **Gnomónica**

La proyección gnomónica no es ni conforme ni equivalente. Es una proyección de perspectiva azimutal con el punto de proyección en el centro de la Tierra, de ahí el nombre de esta proyección (es decir, el centro de la tierra donde viven los míticos gnomos). Fue desarrollada por el griego Thales, posiblemente alrededor del año 580 AC. Todos los grandes círculos en la proyección, incluyendo todos los meridianos y el ecuador, se muestran como líneas rectas, una propiedad única de esta proyección (véase la figura 9.10).

La apariencia de la retícula cambia con el punto de vista, como sucede con otras proyecciones azimutales. Los meridianos son líneas rectas equidistantes que se cortan en el Polo con ángulos verdaderos entre ellos en el punto de vista polar. Los paralelos son círculos desigualmente espaciados centrados en el Polo como un punto, y el espaciamiento de los paralelos aumenta conforme se alejan de los polos. La proyección solo puede mostrar menos de un hemisferio. La escala aumenta rápidamente con la distancia, desde el centro. Se emplea principalmente por la característica especial de representar grandes círculos como líneas rectas, lo que por lo tanto ayuda a los navegantes y aviadores en la determinación de las trayectorias más cortas.

### **Azimutal equidistante**

En esta proyección con el punto de vista polar, los meridianos son líneas rectas equidistantes que se cruzan en el polo central. Los ángulos entre ellos son los ángulos verdaderos. Los paralelos son círculos equidistantes, centrados en el polo, que es un punto. Puede representar a toda la Tierra, pero el polo opuesto es un círculo de delimitación que tiene un radio dos veces mayor que el de la línea del ecuador. Con punto de vista ecuatorial, los meridianos son curvas complejas, igualmente espaciadas a lo largo del ecuador, y que se cortan en cada polo. Los

paralelos son curvas cóncavas complejas hacia el polo más cercano, e igualmente espaciadas a lo largo del meridiano central y el meridiano 90° desde el meridiano central. La escala es verdadera a lo largo de cualquier línea recta que irradie desde el centro de proyección. Aumenta en una dirección perpendicular al radio conforme aumenta la distancia desde el centro. La distorsión es moderada para un hemisferio, pero se convierte en extrema para un mapa de toda la Tierra. La distancia entre dos puntos en cualquier línea recta que pase a través del centro de la proyección se presenta a escala real; esta característica es especialmente útil si un punto es el centro.



*Figura 9.11. La proyección azimutal equidistante para conservar las distancias, en la bandera de la ONU.*

Esta proyección se utiliza generalmente con el punto de vista polar para los mapas de las regiones polares, el Hemisferio Norte y Sur, y para la «Tierra de la Edad de la Aviación». El punto de vista oblicuo se utiliza con frecuencia para mapas del mundo centrados en ciudades importantes y en ocasiones para los mapas de los continentes. La proyección azimutal equidistante ha sido reconocida por la ONU y se utiliza en su bandera (véase la figura 9.11).

### **Winkel Tripel**

La proyección de Winkel Tripel no es ni conforme ni equivalente. Fue presentada por Oswald Winkel en Alemania en 1921.

La proyección se obtiene promediando las coordenadas de las proyecciones Equidistante Cilíndrica y Aitoff. Winkel añade el nombre «Tripel», que normalmente significa triple, porque la proyección Aitoff posee un punto de vista ecuatorial de un hemisferio de la proyección Equidistante Azimutal, en la que las coordenadas horizontales se han duplicado y a los meridianos se les han dado dos veces sus longitudes originales.

El meridiano central es recto. Los otros meridianos son curvos, igualmente espaciados a lo largo del ecuador y cóncavos hacia el meridiano central.

El ecuador y los polos son rectos. Los otros paralelos son curvos, igualmente espaciados a lo largo del meridiano central y cóncavos hacia el Polo más cercano. Los polos son líneas rectas alrededor de 0,4 veces el ecuador, en función de la latitud de los paralelos estándar. La escala es verdadera a lo largo del meridiano central y constante a lo largo del ecuador. La distorsión es moderada, excepto cerca de los meridianos exteriores de las regiones polares. El Winkel Tripel se utiliza para los mapas que incluyan a todo el Mundo (véase la figura 9.12).



*Figura 9.12. La proyección de Winkel Tripel.*

## 9.7 Enfoques modernos para las proyecciones cartográficas

### 9.7.1 Web Mercator

Muchos de los principales servicios de mapas de calles en la web (Bing Maps, OpenStreetMap, Google Maps, MapQuest, Yahoo Maps y otros) utilizan una variante de la proyección de Mercator para las imágenes de sus mapas. A pesar de su obvia variación de escala a escalas pequeñas, la proyección es muy adecuada para un mapa interactivo del mundo en el que se puede hacer zoom a la perfección a grandes escalas (locales), donde hay relativamente poca distorsión, debido a la «quasi» conformidad de esta variante de proyección.

El factor escala en un punto de un mapa con una proyección conforme (tal como la esférica Mercator o la elipsoidal Mercator) es uniforme en todas las direcciones. No ocurre así en la Web Mercator. Si denominamos con la letra  $m$  al factor escala en la dirección meridiana N/S y con la letra  $n$  al factor escala en la dirección paralela O/E. Entonces  $m = n$  porque el factor de escala en un punto es la misma en todas las direcciones en la proyección esférica de Mercator. En otras palabras, la esférica Mercator es conforme.

Las ecuaciones para la elipsoidal Mercator son un poco más complejas, sobre todo en la coordenada Norte. Se dan los parámetros  $a$  (semieje mayor) y  $e$  (excentricidad) para el elipsoide seleccionado. Una vez más  $m = n$  porque el factor de escala en un punto es el mismo en todas las direcciones en la proyección elipsoidal de Mercator. En otras palabras, la elipsoidal Mercator es conforme.

La Web Mercator es una cartografía con datum WGS84 (es decir, elipsoidal), coordenadas latitud/longitud Este/Norte que usa las ecuaciones esféricas de Mercator (donde  $R = a$ ). Esta proyección ha sido popularizada por

Google a través de Google Maps (no Google Earth). El elipsoide de referencia es siempre el WGS84 y el radio esférico  $R$  es igual al semieje mayor  $a$  del elipsoide de WGS84. Ésta es la «Web Mercator».

El factor de escala en un punto es ahora diferente para cada dirección. Es una función de los radios de curvatura en el meridiano y la vertical principal y la dirección «alfa». Para la Web Mercator,  $m$  y  $n$  no son iguales. Por lo tanto, la Web Mercator no es una proyección conforme.

Si alguien utiliza la Web Mercator para conocer las posibles rutas para ir a un nuevo restaurante en la ciudad, o bien para la visualización en la pantalla de su ordenador o para otros fines en internet, no habrá ningún problema. Pero la Web Mercator es una proyección que ha saltado de un dominio de uso (internet) a otro dominio de uso (SIG). Prueba de ello son los códigos EPSG, Esri y FME para la Web Mercator. Los topógrafos y los profesionales de SIG tienen que saber que la Web Mercator no es conforme. Si los cálculos de distancia en la Web Mercator se hacen simplemente (como se pueden hacer en una proyección conforme), estarán equivocados. Para hacerlos correctamente, el proceso es laborioso.

Para un área del tamaño de Norteamérica, aparecen ya ligeras diferencias. Resulta que las medidas en dirección Este sí son idénticas. Las diferencias están en las coordenadas Norte. No hay diferencias cerca del ecuador, pero a 70 grados Norte, la diferencia es ya de 40 km. Este estiramiento Norte Sur en la Web Mercator es la razón de su no conformidad.

Las proyecciones Mercator son útiles para la navegación debido a que las líneas de rumbo son rectas. Estas son las líneas de rumbo verdadero constante que los navegantes utilizaban para navegar antes de la existencia de los GPS. Por lo tanto, tenemos que tener en cuenta que las líneas rectas en la Web Mercator no son las líneas de rumbo.

Resumiendo la Web Mercator:

- La Web Mercator es cilíndrica.
- Sus meridianos son líneas rectas equidistantes.
- Sus paralelos son líneas rectas desigualmente espaciadas, pero de manera diferente que en la Mercator conforme.
- Sus loxodrómicas (líneas de rumbo) no son líneas rectas.
- No es perspectiva.
- Sus polos están en el infinito.
- No la creó Mercator en 1569, sino Google recientemente.
- No es conforme.

### 9.7.2 Proyecciones cartográficas con transición de imágenes

*Map Projection Transitions* es un ejemplo de las múltiples aplicaciones ofrecidas por Jason Davies. La página web (<http://www.jasondavies.com/maps/transition>) presenta un mapamundi con la retícula y las fronteras de los países en la proyección oblicua Aitoff con el Polo Sur. El mapa no es estático; cuenta con animación. El Polo Sur se mueve hacia la parte inferior y la Tierra gira alrededor de sus polos. La animación dura cinco segundos y después, la proyección cambia y el movimiento continúa durante otros cinco segundos, después de lo cual la proyección cambia de nuevo otra vez. Los nombres de las proyecciones aparecen en una ventana aparte. Hay un total de 56 proyecciones. El Polo Sur con el tiempo se vuelve invisible y entonces aparece el Polo Norte en la parte superior. Varias partes de la Tierra aparecen en el centro del mapa girando alrededor de los polos (véase la figura 9.13).

Al hacer clic en «Pause», la animación se detiene y es posible seleccionar otra proyección. Haciendo clic con el botón izquierdo, es posible mover la imagen alrededor y seleccionar el punto de vista de la proyección —normal,

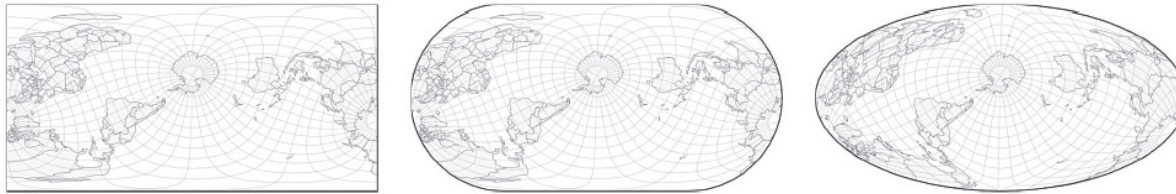


Figura 9.13. De la aplicación Map Projection Transitions (<http://www.jasondavies.com/maps/transition>).

transversal o cualquiera de las numerosas proyecciones oblicuas-. Las diferencias entre las dos proyecciones se pueden observar así claramente. Por ejemplo, uno es capaz de seleccionar la proyección Ginzburg VI y su punto de vista normal, moviendo el ratón. Si uno quiere ver cómo la retícula de esa proyección es diferente de la proyección parecida de Winkel Tripel, se puede hacer haciendo clic en la proyección de Winkel Tripel en el menú desplegable. La imagen en la pantalla va a cambiar a la proyección de Winkel y se van a ver claramente las diferencias.

Si se hace clic en «Maps», hay una serie de nuevas aplicaciones muy interesantes sobre mapas interrumpidos, mapas en forma de mariposa, proyecciones retroazimutales y otras proyecciones. Es posible utilizar el ratón para mover las imágenes en muchas de esas aplicaciones. Por ejemplo, al seleccionar la proyección sinusoidal interrumpida, va a aparecer un mapa del mundo en tres segmentos. El ratón se puede utilizar para mover partes de la Tierra de un segmento a otro y el control deslizante en la parte inferior de la pantalla se puede utilizar para cambiar el número de segmentos de un mapamundi ininterrumpido a una representación en 24 segmentos.

Una opción similar está disponible para la proyección Berghaus (Snyder y Voxland, 1989). La aplicación *Azimuth and Distance from London* (Azimut y distancia desde Londres) permite utilizar el ratón para obtener distancias y azimutes desde Londres a cualquier punto de la Tierra,

en mapamundis con proyecciones oblicua cilíndrica equidistante y oblicua equidistante azimutal. Si el texto que acompaña la solicitud menciona una proyección, hay un enlace a Wikipedia donde hay información detallada sobre la proyección.

### 9.7.3 Investigación sobre nuevas proyecciones de mapas

En 2007, inspirados por el método de Robinson, B. Jenny, T. Patterson y L. Hurni produjeron el programa interactivo Flex Projector, que permite al usuario crear nuevas proyecciones de mapa del mundo con facilidad. Es compatible con el punto de vista normal de las proyecciones cilíndricas. El programa es gratuito, de fuentes abiertas, y funciona en Linux, Mac OS X y Windows. Al ejecutar el programa, aparece en la pantalla un mapamundi en la proyección de Robinson (véase la figura 9.14). El lado derecho de la pantalla incluye controles para cambiar las longitudes de los paralelos. Al hacer clic en el botón «Distance», aparecen los controles para cambiar las distancias de los paralelos de la línea del ecuador. Las curvaturas de los paralelos (Flexión) y las distancias entre los meridianos (Meridianos) también se pueden cambiar. La opción «Linked Sliders» permite al usuario mover cada deslizador por separado o varios a la vez. La siguiente opción «Move» se utiliza para elegir la forma de la curva a lo largo de la cual se mueven los controles. La relación entre el meridiano central y el ecuador se puede cambiar con el control «Proportions» (altura/anchura). En lugar de modificar la proyección de

Robinson, se puede comenzar a partir de cualquiera de una serie de proyecciones previstas de los tres grupos mencionados. Si el resultado es insatisfactorio, se puede utilizar la opción «Reset Projection» (Restablecer proyección) que vuelve a la proyección inicial. Esa opción se puede encontrar en la esquina superior derecha de la pantalla.

Al hacer clic en «Display» se abren opciones adicionales. Se puede cambiar la longitud del meridiano central, se puede elegir la densidad de la retícula, se pueden extraer elipses de distorsión en nodos de la retícula, y se pueden extraer isogramas de zona y de máxima distorsión de ángulos. El fondo de la proyección de nueva creación puede incluir la cuadrícula y esquemas de los continentes en cualquier proyección activada (*Show Second Projection*). La esquina inferior izquierda de la pantalla incluye indicadores numéricos que resumen las distorsiones de longitudes, áreas y ángulos, para todas las proyecciones activadas y para la proyección recién creada (véase la figura 9.14).

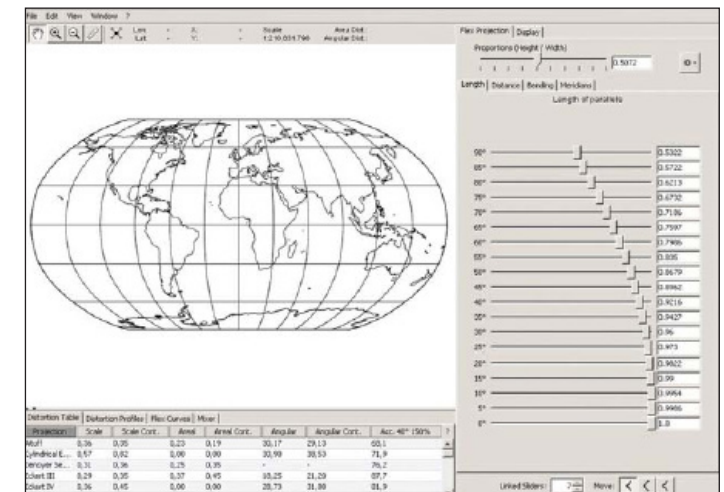


Figura 9.14. Interfaz del programa Flex Projector.

Flex Proyector puede importar y exportar datos vectoriales y ráster en varios formatos. El programa está recomendado para todos los que quieran probar a crear una nueva proyección de mapamundi, también se puede aplicar en el estudio y enseñanza de proyecciones cartográficas.

Las técnicas para la combinación de dos proyecciones diferentes para crear una nueva proyección permiten la creación de una gran variedad de proyecciones. Las técnicas mencionadas también se pueden expandir. Por ejemplo, el *software* Geocart de Mapthematics puede mezclar diversos parámetros de proyección, como la latitud de los paralelos estándar, entre dos proyecciones diferentes. Alternativamente, se pueden combinar más de dos proyecciones para formar una nueva. El caso extremo sería un número infinito de proyecciones diferentemente parametrizadas, que es el concepto que hay detrás de las proyecciones policónicas y policilíndricas. Existen métodos alternativos para la creación de una nueva proyección a partir de cero, a partir de las existentes, o ajustando parámetros de proyección para crear una nueva. Algunas de estas técnicas se utilizan en las proyecciones adaptativas compuestas para mapas en la web, lo que supone un nuevo campo de investigación en las proyecciones cartográficas. El objetivo de esta investigación es desarrollar una alternativa a la proyección Web Mercator para los mapas en la web a pequeña escala, donde los mapas emplean automáticamente una proyección óptima en función de la escala del mapa, su relación altura-anchura y la latitud central del área mostrada.

### 9.8 Proyecciones sugeridas

La razón por la que tenemos tantas proyecciones cartográficas es porque ninguna vale para todo. La selección de una proyección cartográfica apropiada para una determinada aplicación depende de varios

factores, incluyendo el propósito del mapa, el tipo de datos que se proyecta representar, la región del mundo donde se proyecta emplear y la escala final del mapa. Hay asesoramiento disponible para dicha selección en una variedad de fuentes impresas y en la web (véase la sección de «Lecturas adicionales»). En los SIG, las bases de datos a gran escala (para áreas pequeñas) se proyectan generalmente según una proyección conforme para preservar los ángulos. Para tales aplicaciones, la distorsión de áreas es tan pequeña sobre la extensión geográfica, que es insignificante y no es necesario el uso de una proyección que conserve áreas. Comúnmente, los archivos de datos a gran escala se utilizan en aplicaciones SIG de extensión geográfica limitada (por ejemplo, una cuenca, un condado o un estado). Las dos proyecciones más comúnmente usadas para esas escalas, son la cónica conforme de Lambert y la transversal de Mercator, que son la base de la UTM y de la mayor parte del sistema de coordenadas del «USA State Plane». Para mapamundis de consulta general, nuestra recomendación es no usar cualquier proyección cilíndrica, sino una pseudocilíndrica (por ejemplo, la de Robinson o una proyección de compromiso como la de Winkel Tripel).

### 9.9 Conclusiones

Las proyecciones cartográficas y las transformaciones de coordenadas son la base de la consecución de un marco común de referencia para la información geográfica. El requisito de tener un elipsoide, datum, proyección cartográfica y finalmente de un sistema de coordenadas planas, todos ellos comunes, hacen posible el uso de la geometría plana para todo tipo de superposiciones y análisis espaciales. La proyección de los datos geográficos de la Tierra elipsoidal sobre un sistema de coordenadas planas, siempre se traduce en una distorsión de las superficies, formas, distancias y otras propiedades. Con la selección apropiada de una proyección, el usuario puede conservar las características deseadas a expensas de otras. En este capítulo hemos

examinado brevemente los conceptos básicos de base, los fundamentos de los sistemas de coordenadas y las proyecciones cartográficas. Para un tratamiento más en profundidad, se remite al lector a los textos y las fuentes de referencia que figuran en la siguiente sección de «Lecturas adicionales».

### 9.10 Lecturas adicionales

Se ofrecen otras referencias y un ejercicio de preguntas y respuestas en el capítulo 18.

#### Libros electrónicos de Google sobre proyecciones cartográficas

- 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, Londres.
- 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. y 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.

#### Libros sobre proyecciones cartográficas disponibles en Internet

- Anoni, A., C. Luzet, E. Gubler, y J. Ihde (Eds.) (2003): *Las proyecciones cartográficas para Europa*. Instituto



de Medio Ambiente y Sostenibilidad, Comunidades Europeas.

<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, y 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](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, Postdam.

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

Snyder, J. P. y 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*. Publicación Especial 251. EE.UU. US Coast and Geodetic Survey. [http://docs.lib.noaa.gov/rescue/cgs\\_specpubs/QB275U35no2511952.pdf](http://docs.lib.noaa.gov/rescue/cgs_specpubs/QB275U35no2511952.pdf)

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

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.202.3530&rep=rep1&type=pdf>