

# INEGI

## CARTOGRAFÍA BÁSICA

Francisco Hansen A.  
Dirección General de Geografía

## índice

CONCEPTOS BÁSICOS.....	2
MAPAS .....	3
<b>CLASIFICACIÓN DE MAPAS .....</b>	<b>6</b>
CLASIFICACIÓN POR LA ESCALA .....	6
CLASIFICACIÓN POR NIVEL DE INFORMACIÓN .....	7
CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN .....	7
CLASIFICACIÓN POR EL PROPÓSITO DEL MAPA .....	9
CLASIFICACIÓN CONFORME A LA PRECISIÓN .....	9
CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON EL ORIGEN .....	10
CLASIFICACIÓN POR LA FORMA DE PRESENTACIÓN .....	10
CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE INFORMACIÓN .....	12
ESCALA.....	15
SISTEMA DE COORDENADAS.....	18
Sistemas de Referencia Geográfica .....	42
Proyecciones Cartográficas.....	50



---

## **OBJETIVO**

**LOS PARTICIPANTES CONOCERÁN LOS CONCEPTOS BÁSICOS E IDENTIFICARÁN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MAPAS PARA LA COMPRENSIÓN DE ACTIVIDADES RELACIONADAS CON LA CARTOGRAFÍA.**

## **PERFIL DEL PARTICIPANTE**

**CONOCIMIENTOS ELEMENTALES DE GEOGRAFÍA.**

## 1. CONCEPTOS BÁSICOS

### CARTOGRAFÍA

Se considera a la Cartografía como el *arte, ciencia y técnica de hacer mapas y el estudio de éstos como documentos científicos y obras de arte*. Esta es la definición clásica adoptada durante mucho tiempo, dada originalmente por la Asociación Cartográfica Internacional (ICA). Durante la 17ava. Asamblea General de esta Asociación, celebrada en Barcelona, España en septiembre de 1995, se adoptó una nueva definición, que se expresa en los siguientes términos: *Cartografía es la disciplina que trata sobre la concepción, producción, difusión y estudio de los mapas*. En relación con la primera de estas definiciones, el diagrama de la figura 1 establece la relación funcional de los tres aspectos considerados en la definición.

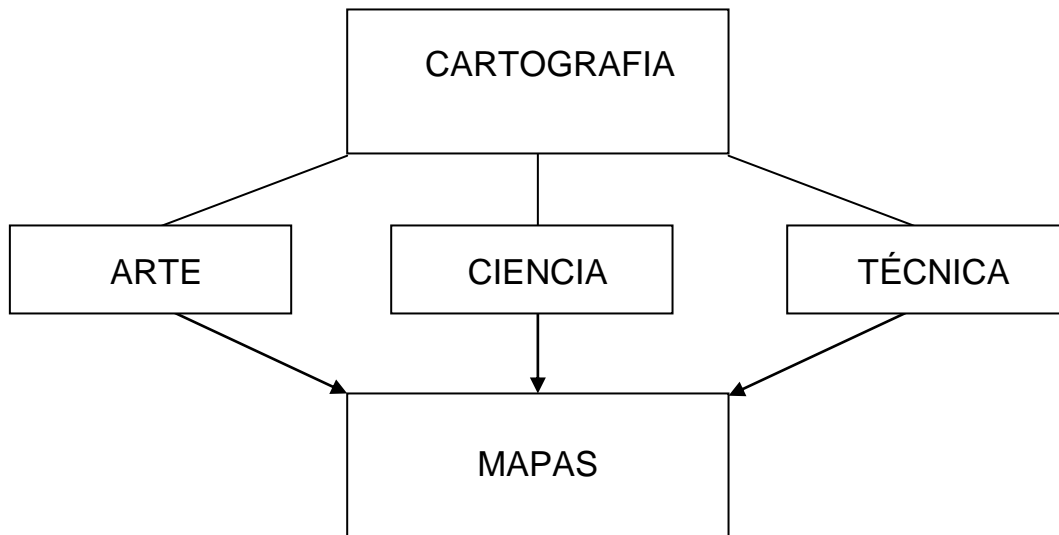


Figura 1

El hecho de incluir los tres aspectos, arte, ciencia y técnica, representa una solución de compromiso en la definición, ya que dentro del mundo cartográfico hay quienes favorecen y defienden una determinada corriente de pensamiento en el sentido de que la cartografía es fundamentalmente un arte. Para otros, en la cartografía todo es científico y muy poco hay de artístico, y para un tercer grupo, es más que todo una técnica, considerada ésta como el conjunto de procedimientos asociados a un arte o ciencia. Los defensores del primer concepto aducen que con el fin de crear un mapa es necesario poseer un cierto sentido artístico para balancear la información representada, situar adecuadamente los rótulos, utilizar los colores, dibujar las líneas. Para el cartógrafo-artista la presentación del mapa es lo esencial y la información en sí es secundaria; sus productos tienen un carácter pictórico fundamental. En el polo opuesto, los cartógrafos-científicos defienden con celo la idea de que es necesaria una base científica para la creación de un mapa: matemáticas, geodesia, física, electrónica, etc.; sus productos son muy precisos, a veces en extremo y en ocasiones difíciles de interpretar en términos de la información contenida. En el caso de los cartógrafos puramente técnicos, para producir un mapa, basta con seguir una tecnología establecida, sin que sea necesario conocer su fundamento.



Un poco de reflexión puede conducir a la conclusión de que favorecer una sola corriente de pensamiento constituye una idea equivocada, ya que en la realidad y como se tendrá oportunidad de reconocerlo más adelante, los tres aspectos concurren en la producción de mapas: la ciencia en lo que respecta a los sistemas de producción, para la determinación de relaciones espaciales y para la definición de parámetros en la información, el arte como elemento esencial para efectos de presentación, y la técnica que viene en apoyo de las otras dos.

Por lo tanto, la definición de cartografía inicialmente expresada, es una definición racional perfectamente aceptable, en la que los aspectos científicos, artísticos y tecnológicos son concurrentes y no deben ser perdidos de vista.

Por otra parte, se ha considerado conveniente incluir en la definición el estudio de los mapas como documentos científicos y obras de arte. Desde el punto de vista del interés general puede ser más importante el aspecto científico traducido en consideraciones sobre la producción y evaluación de la información contenida, su uso y aprovechamiento racional.

La segunda de las definiciones merece cierto comentario: en primer lugar, hace de la cartografía una disciplina, entendida ésta como una rama del conocimiento que desemboca en un conjunto de reglas y métodos aplicables a una determinada actividad. En segundo término, la definición tiene una orientación hacia los procesos involucrados en la actividad cartográfica, desde la concepción, hasta el empleo de los mapas. Esta nueva definición procura ser suficientemente comprensiva y trata de evitar la aparente confrontación entre los aspectos científicos, artísticos y técnicos.

## MAPAS

Documentos de información gráfica relativa a toda o una parte de una superficie real o ideal, que contiene información seleccionada, generalizada y simbolizada, sobre una cierta distribución espacial de un área grande; usualmente, la superficie terrestre. La información es de carácter general y se presenta en escalas relativamente reducidas con referencia a un sistema de coordenadas universal.

MAPAS	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contienen información general</li> <li>- Son de escalas relativamente chicas</li> <li>- Están en un sistema universal de coordenadas</li> <li>- Cubren áreas grandes</li> <li>- Consideran la curvatura terrestre</li> <li>- Procesos múltiples y bastante complicados</li> <li>- Requiere de un sistema complejo de administración</li> </ul>



## **MAPAS**

### **NATURALEZA**

Los mapas son los productos cartográficos por excelencia. Volvamos por un momento a la definición expresada en párrafos anteriores, la cual requiere de cierta discusión con el objeto de captar a cabalidad la naturaleza de los mapas.

- En primer lugar, los mapas son descripciones, o documentos de información gráfica, lo que los distingue de cualquier otro tipo de descripción, escrita, verbal o de otra naturaleza.

- La información representada se refiere a toda o a una porción de una superficie física, real o ideal. Esto indica que los mapas no están limitados a la representación de la superficie terrestre, que en este caso es una superficie física real, sino que su acción se extiende a la representación de superficies ideales. Las cartas socioeconómicas por ejemplo, aún cuando están sobre una base cartográfica de referencia, representan información intangible, fenómenos sociales y económicos que por sí mismos no tienen forma o color, pero que en la carta lo adquieren. Otro ejemplo puede ser el de las canas geomagnéticas en las que se representan uno o varios parámetros del magnetismo terrestre; intensidad del campo, declinación e inclinación magnéticas. Todo-s ellos son parte de un fenómeno que no se ve o se siente directamente, pero que son susceptibles de medida, análisis y representación gráfica. Así, los mapas de isogonas (mapas de declinación magnética), conforman una superficie ideal representativa del fenómeno de interés.

En términos generales, puede decirse que cualquier elemento o conjunto de elementos de información que sean susceptibles de ser representados gráficamente, pueden dar origen a un mapa. Siendo tan extensa la diversidad de fenómenos, la variedad de mapas es prácticamente inagotable y está limitada solamente por la imaginación.

- Los mapas contienen información selectiva, generalizada y simbolizada. A reserva de discutir estos aspectos con mayor extensión, baste decir por ahora que en lo que respecta a selección, la información por mostrar es discriminada con el objeto de que en el mapa aparezca solamente aquella que es necesaria e importante para los propósitos del mismo. En relación con la generalización, la información se presenta conforme a las limitaciones impuestas por la escala, lo que quiere decir que las formas reales de los detalles son imposibles de reproducir con toda fidelidad, por lo que se hace necesario generalizadas. Finalmente, el uso de símbolos es característico de los mapas, debido a que para efectos de presentación, interpretabilidad y uniformidad, todos aquellos detalles que tienen características comunes, aunque posean diferencias individuales menores en cuanto a forma y dimensiones, son englobados en una forma única e ideal de representación, constituida por un símbolo.

- La información representada corresponde en los mapas a una distribución espacial de los detalles (en dos o tres dimensiones), sobre un área relativamente extensa. Esta área es muy frecuentemente la superficie terrestre, aunque ya hay mapas de la superficie lunar y de algunos planetas. Esta superficie es la base sobre la cual se ubican en posición los diferentes detalles de información.

- Cuando se dice que la información es de carácter general, significa que corresponde a un cierto nivel de detalle concordante con la escala y con los criterios definidos en el diseño. Esto quiere decir que los mapas tienen limitaciones en cuanto al volumen de información representada, la que en toda instancia es aquella que según el diseño constituye lo fundamental e importante para los



---

propósitos del mapa.

- La presentación de los mapas se hace en escalas relativamente reducidas, lo que representa una necesidad obvia. La reducción en escala permite la observación inmediata de grandes extensiones sin mayor esfuerzo, y facilita -el uso y manejo de la información.

- Los mapas están usualmente referidos a un sistema universal de coordenadas, lo que se hace para efectos de ubicación y darles características métricas a los mismos.



### 3. CLASIFICACIÓN DE MAPAS

Los mapas pueden ser clasificados con muy diversos criterios, de acuerdo con el interés particular que se tenga sobre ellos. En este apartado se incluyen ocho tipos de clasificación, en función de:

- La escala,
- El nivel de información,
- El sistema de producción,
- El propósito del mapa,
- La precisión del mapa,
- El origen del mapa,
- La forma de presentación,
- El tipo de información

#### CLASIFICACIÓN POR LA ESCALA

De acuerdo con la escala, los mapas se clasifican en mapas de escala grande, mediana y chica (algunos autores agregan las escalas superchicas). Esto depende del valor del denominador de la escala en la fracción representativa. Más adelante se verá esto con detalle. En términos generales y para efectos de esta discusión, la escala es la relación que existe entre las distancias obtenidas en el mapa con respecto a las correspondientes distancias en el terreno. Una escala es grande cuando el denominador de la fracción que representa esta relación es pequeño y viceversa. En cuanto a valores numéricos que definan los límites en la clasificación, no parece haber un acuerdo universal. Un esquema de los más usuales es el siguiente:

Mapas de escala grande	Escalas hasta 1 :50,000
Mapas de escala mediana	Escalas entre 1 :50,000 y 1 :250,000
Mapas de escala chica	Escalas de 1 :250,000 y menores

Conforme a lo anterior, el grupo de cartas del INEGI en las escalas de 1:50,000 y 1:250,000, se ubica dentro del grupo de escalas medias, los fotomapas en la escala de 1:20,000 son de escala grande y el mapa de la República Mexicana en la escala de 1:1,000,000 es un mapa de escala chica.

Otro rango de niveles es el siguiente:

Escalas grandes	Denominadores menores que 250,000
Escalas medianas	Denominadores entre 250,000 y 1,000,000
Escalas chicas	Denominadores mayores que 1,000,000

Lo anterior es indicativo de la falta de acuerdo universal y hace que cualquier clasificación conforme a este parámetro caiga en el terreno de lo subjetivo. Para efectos prácticos, se pueden adoptar los rangos inicialmente expresados. Se reitera el hecho de que el calificativo de la escala es inverso al valor del denominador en la fracción representativa, o lo que es lo mismo, directo con el valor numérico de dicha fracción. Así, por ejemplo, entre las escalas de 1:10,000 y 1:50,000, la más grande es la primera; esto es:





Escala grande	1:10,000 (o lo que es lo mismo, 1/10,000)
Escala menos grande	1:50,000 (o lo que es lo mismo, 1/50,000)

Ya que  $1/10,000 = 0.0001$  es mayor que  $1/50,000 = 0.00002$

## **CLASIFICACIÓN POR NIVEL DE INFORMACIÓN**

De acuerdo con este criterio, los mapas se clasifican conforme a la densidad de información contenida, en la forma siguiente:

- Esquemas básicos de campo,
- Mapas de reconocimiento general,
- Mapas semidetallados,
- Mapas de detallados,
- Mapas de gran detalle

Los esquemas básicos de campo son documentos rápidamente preparados, en extensiones hasta donde alcanza la vista, sin mayor precisión, muy generalizados y sin más detalle que el estrictamente necesario, con el propósito de dar distancias y direcciones aproximadas, así como la ubicación relativa de detalles de interés.

Los mapas de reconocimiento general son un poco más formales y en un nivel superior al puramente esquemático; contienen información que muestra el carácter regional a gran visión en escalas relativamente pequeñas, sin mayor precisión. Por ejemplo, un mapa calcado de un mosaico fotográfico no rectificado, que contiene los detalles de información más relevantes, es de este tipo. Su objetivo es el de proporcionar información de primera mano de un área grande, con propósitos de reconocimiento, de ubicación general, para estudios muy preliminares y planeación a grandes rasgos.

En cuanto al resto, la densidad que aparezca en cada caso depende de las necesidades previstas en el diseño. Lo mismo que en el caso de clasificación por escala, no existen límites numéricos precisos que permitan separar por ejemplo el nivel de detalle del de semidetalle; el criterio es más bien subjetivo y dado por la experiencia. En términos generales, hay una relación con la escala y los mapas más detallados corresponden a las mayores escalas y viceversa. Para un mismo formato y escala, el mapa más detallado es el que contiene mayor densidad de información. Cabe señalar que existe un límite práctico dado por la experiencia para el gran detalle, con el propósito de no incurrir en congestión de la información, ya que el detalle en exceso es nocivo para el mejor uso del mapa.

## **CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN**

De acuerdo con el sistema empleado para producir los mapas, estos pueden ser:

- Mapas preparados a base de esquemas de campo,
- Mapas preparados con base en levantamientos de campo,



- Mapas fotográficos,
- Mapas fotogramétricos,
- Mapas automatizados, con base en sistemas digitales

Los primeros no son objeto de mayor discusión; son hechos sobre la base de esquemas y descripciones elaboradas en el campo, normalmente a mano alzada.

Los mapas elaborados con base en levantamientos de campo fueron los tradicionales antes del advenimiento de la fotogrametría. En su producción intervienen levantamientos masivos de campo, básicamente triangulaciones y poligonales, nivelaciones de detalle, levantamientos con plancheta y mucho uso de los principios de intersección y resección para la ubicación de detalles. Las operaciones incluyen el levantamiento de información toponímica y de clasificación de la información, así como la edición por técnicas de dibujo a mano.

Los mapas fotográficos se apoyan en la fotografía aérea, sin mucho tratamiento numérico. Dentro de las posibles variedades se cuentan:

- Mosaicos fotográficos simplemente ensamblados, sin control, y mapas calcados sobre la base de este mosaico.
- Mosaicos fotográficos semirectificados, en los que se han reducido algunas de las distorsiones propias de las fotografías, y mapas calcados sobre tal base.
- Mosaicos fotográficos rectificadas, en lo que se ha logrado un máximo de eliminación de distorsiones fotográficas, y mapas elaborados sobre esta base.
- Fotomapas elaborados sobre la base de mosaicos rectificadas, con información toponímica y referencia a un sistema de coordenadas.
- Pictomapas, que son foto mapas en los que se ha incluido un proceso de artes gráficas para mejoramiento de imágenes fotográficas y separación de colores en tonos continuos.

Los mapas fotogramétricos tienen también una base fotográfica, pero requieren de un proceso mucho más elaborado, con mucho apoyo numérico y el empleo de técnicas especiales. En su producción intervienen levantamientos de campo, pero éstos son los mínimos y necesarios para apoyar los procesos fotogramétricos. Normalmente y debido a la alta precisión relativa de estos procesos, las operaciones de producción asociadas (edición y reproducción), tienen que ajustarse a dicha precisión. Dentro de sus variedades están incluidos:

- Mapas elaborados a base de técnicas de triangulación radial.
- Mapas restituidos, con sistemas de ajuste gráfico.
- Mapas restituidos, con sistemas de ajuste numérico.
- Mapas de alta rectificación u ortofotomapas. Estos pueden caer dentro de la clasificación de fotográficos, pero dominan en ellos las técnicas fotogramétricas complicadas y de muy alta precisión, con el empleo de aparatos sumamente sofisticados.



Cabe mencionar que con el avance tecnológico de la época los sistemas fotogramétricos han experimentado un alto desarrollo que en la actualidad se traduce en el empleo de sistemas de base digital que han hecho caer en obsolescencia los tipos de mapas y procesos señalados inicialmente en la relación de las líneas anteriores.

Los mapas automatizados resultan del empleo de nuevas técnicas en las que intervienen la digitalización de la información, su almacenamiento en bases de datos, el manejo en computadoras de alta capacidad y la utilización de graficadores automáticos de alta resolución, todo dentro del entorno de la cartografía automatizada o cartografía asistida por computadora.

## **CLASIFICACIÓN POR EL PROPÓSITO DEL MAPA**

De acuerdo con su propósito, los mapas pueden ser muy variados, pero en términos generales se podría mencionar la siguiente clasificación:

- Mapas murales, pictóricos o decorativos,
- Mapas de ubicación e información general,
- Mapas para planeación,
- Mapas de estudios o proyectos específicos

Los mapas murales sirven más que todo para decorar paredes, oficinas o escritorios; su presentación y colores son atractivos y normalmente son mapamundi s, mapas de todo un continente, un país, o de una cierta unidad administrativa.

Los mapas de ubicación e información general son ya documentos de consulta y trabajo; no son muy detallados y normalmente están en escalas chicas de presentación. Por ejemplo, la carta Turística y de Transporte de la Secretaria de Desarrollo Social (antes SEDUE y SAHOP) a la escala de 1:3,500,000, es de este tipo.

Los mapas para planeación son documentos de trabajo, contienen información cuidadosamente elegida para el propósito y para satisfacer las necesidades de los planificadores, la que es susceptible de cuantificación y análisis para la elaboración de anteproyectos; usualmente se presentan en escalas medias con un nivel de información que va del semidetalle al detalle. La serie cartográfica del INEGI a la escala de 1:50,000 es de este tipo.

Los mapas de estudios o para proyectos específicos son resultantes en lo general del trabajo de planeación ejecutado con los anteriores, cuando existen. Presentan resultados y conclusiones de los estudios, junto con las propuestas específicas de planeación y sus alternativas, a escalas grandes y a nivel de detalle.

## **CLASIFICACIÓN CONFORME A LA PRECISIÓN**

De acuerdo con su precisión, los mapas se clasifican en términos del grado de conformidad que tengan con respecto a las especificaciones adoptadas en el diseño. Por ejemplo, para mapas de planeación, se pueden establecer las siguientes especificaciones:

Para planimetría (detalles en el plano), en un sistema de evaluación o de control de calidad, no más del 10% de los puntos probados que no estén desplazados por



simbolización u otras necesidades, podrán tener errores en posición mayores que 0.3 mm a la escala de publicación.

Para altimetría (alturas), no más del 10% de los puntos probados podrán tener errores en elevación superiores a media equidistancia básica (la equidistancia es la separación vertical uniforme entre curvas de nivel vecinas).

Para la información complementaria (toponimia y clasificación de detalles), no más del 10% de los detalles de información pueden estar en error.

Conforme a las especificaciones adoptadas, los mapas se pueden clasificar, de acuerdo con su precisión en la forma siguiente:

Tipo A	Adecuados	Los que cumplen cabalmente con las normas
Tipo B	Utilizables	Los que las cumplen parcialmente
Tipo C	Inadecuados	Los que apenas cumplen con las especificaciones

Los mapas que no cumplan del todo con las normas son inútiles, de muy baja calidad, deben ser retirados de la circulación y hechos de nuevo.

Al lado de cada clasificación A, B o C se pueden dar niveles, por ejemplo, de 1 a 4, relacionados con la especificación complementaria, definiéndose con las calidades de excelente, buena, regular y mala.

### **CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON EL ORIGEN**

En relación con el origen, los mapas son dos tipos:

- a) Mapas básicos; mapas nuevos cuyas fuentes de información son primarias y como su nombre lo indica, sirven como base sobre la cual se puede agregar o sobreponer la información para otros mapas. Son mapas originales en el sentido de que se elaboran normalmente donde antes no había cartografía, comúnmente se les considera como la cartografía fundamental de un país y en relación con otra cartografía, constituyen las llamadas bases cartográficas.
- b) Mapas derivados. Son los que emplean fuentes de información secundaria para su elaboración.

### **CLASIFICACIÓN POR LA FORMA DE PRESENTACIÓN**

En este contexto, se puede hacer una clasificación en dos grandes grupos:

- Mapas analógicos, que son los normalmente conocidos, impresos en papel o representados en cualquier medio físico: En la jerga moderna se les llama productos de copia dura (hardcopy).
- Mapas digitales, que son los que existen en los archivos de bases de datos en forma de un conjunto de puntos, líneas y áreas, los que se presentan en las pantallas de computadoras y de los que se dice que tienen vida efímera, y los contenidos en medios

tales como cintas magnéticas y discos ópticos. A los mapas que se despliegan como imágenes electrónicas se les da en llamar productos de copia suave (softcopy).

En relación con los mapas analógicos, se puede hacer una subclasificación conforme al esquema que se indica en la figura 12.



Figura 12. Clasificación por forma de presentación  
(Para mapas analógicos)

Los mapas planos, como su nombre lo indica se presentan sobre una superficie plana que normalmente es una hoja de papel y comprenden los denominados mapas a línea y mapas de tonos continuos.

En el caso de mapas a línea, los detalles se presentan con formas geométricas definidas y precisas; puntos, líneas y áreas; hay contraste marcado entre los colores, los mapas son dibujados o se emplean técnicas de grabado y separación de colores. En el entorno moderno a esto se le dice que está en formato vectorial.

Los mapas de tonos continuos contienen información a línea sobre una base fotográfica, que es esencialmente de tonos continuos, en una escala de grises como en los fotomapas, o de colores como pueden ser los pictomapas. La continuidad tonal está asociada a lo que se denomina el formato ráster.

En todos los casos de mapas planos, la presentación puede ser en blanco y negro o bien a color; asimismo, la vista puede ser vertical (la más usual), en perspectiva (poco frecuente) o de vista horizontal (muy rara).

Los mapas volumétricos, constituidos por maquetas, modelos tridimensionales y globos son poco usuales, requieren de técnicas especiales para su elaboración y no se discutirán aquí.

## CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE INFORMACIÓN

De acuerdo con el tipo de información presentada, los mapas se pueden clasificar como se indica en el siguiente cuadro (figura 13):

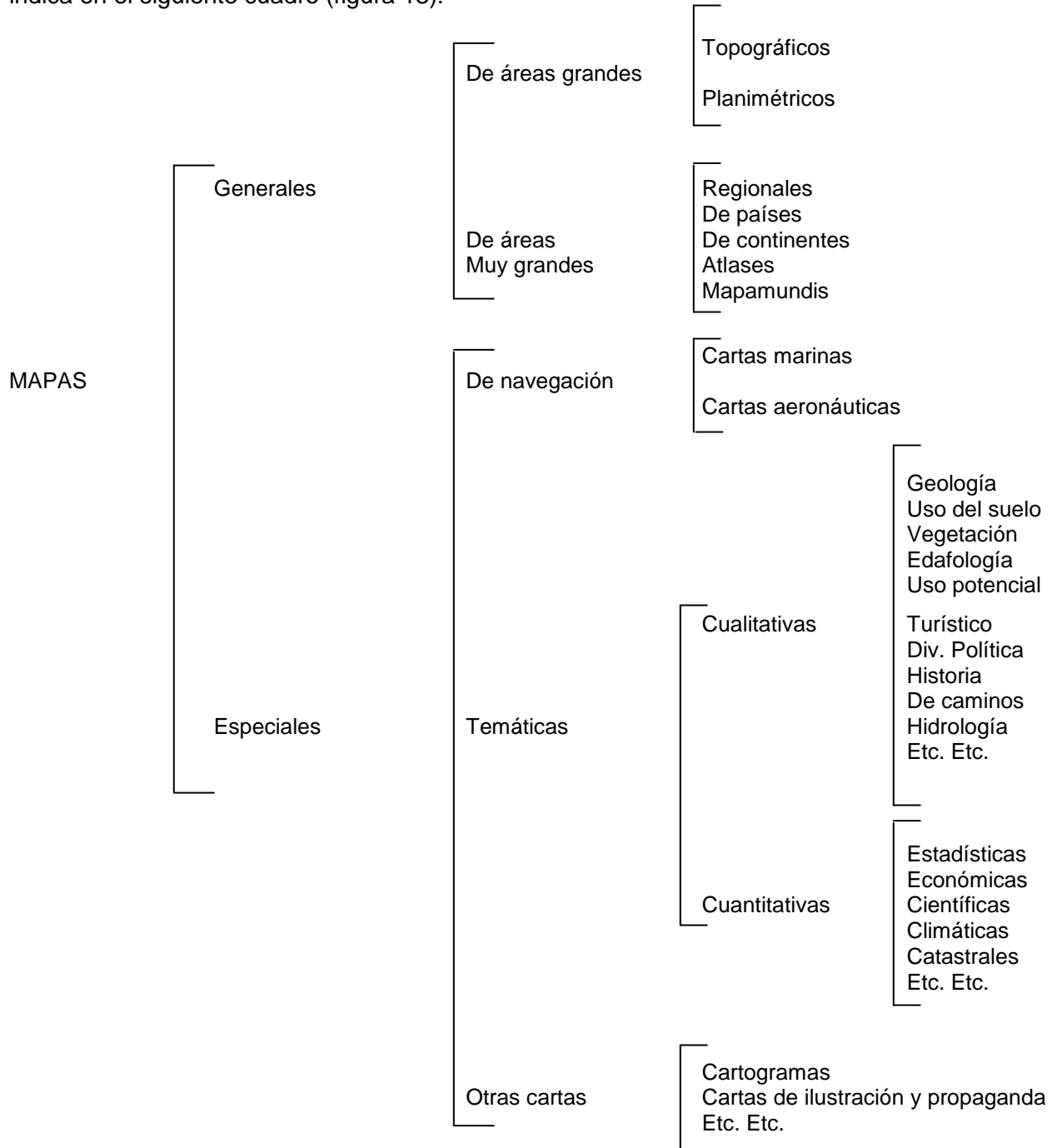


Figura 13. Clasificación según el tipo de información



En el primer nivel de la clasificación se encuentran los mapas de información general, orientados a satisfacer las necesidades de la mayoría de los usuarios. Esto debe ser racional, ya que tratar de satisfacerlos a todos es prácticamente imposible y puede conducir a problemas de congestión de la información o a tratar de emplear escalas de presentación más grandes, lo que a menudo incide fuertemente en los costos. Este problema debe resolverse en la etapa de diseño, y lo que conviene hacer es prever las necesidades con auxilio de encuestas entre los posibles usuarios. De esto puede resultar una amplia gama de elementos de información supuestamente necesarios, los que hay que juzgar en función de su frecuencia y utilidad. Por ejemplo, si resulta que el 95% de los posibles usuarios requiere de información altimétrica cuantitativa, se decide incluida en forma de curvas de nivel; si el 50% de los usuarios pide información sobre líneas de transmisión, también se puede incluir este tipo de información, pero si solamente unos cuantos usuarios requieren que los símbolos que representan estaciones de poligonal vayan en color rojo, no se atenderá la petición, debido a que para satisfacerla es necesario aumentar un color o lo que es lo mismo, una placa de impresión adicional y una corrida más de impresión, con el consiguiente aumento en el costo para un requerimiento que no es de trascendencia.

Dentro de los mapas de información general, se hace una subdivisión en mapas de áreas grandes (escalas grandes y medianas) y mapas de áreas muy grandes (escalas chicas). Con relación a los primeros se mencionan los *mapas topográficos*, entendidos como aquellos que llevan información altimétrica, de preferencia cuantitativa, y los *mapas planimétricos* o "mapas planos" que no incluyen tal información y por lo tanto no tienen representada la tercera dimensión (alturas del terreno).

En relación con los mapas especiales, a los cuales genéricamente se les llama "cartas" (de ahí el término cartografía), la información contenida está orientada a satisfacer las necesidades de ciertos usuarios, por lo que su utilidad pierde la generalidad característica del grupo anterior. Se puede decir que las cartas o mapas de información especial están orientados a representar información para usuarios específicos dentro de una cierta disciplina de interés.

Un grupo importante de los mapas especiales está constituido por las cartas de navegación, ya sean marinas o aeronáuticas, las que contienen información que facilita el trabajo de navegantes en el mar o en el aire. Así, en el caso de las cartas marinas se da información relativa a la ubicación de puertos, profundidades marinas, localización de boyas y faros, escollos, bancos de arena, naufragios ocultos, canales de navegación, dirección y velocidad de las corrientes, etc. En las cartas aeronáuticas la información es sobre ubicación de aeropuertos y sus características, información geográfica generalizada que pueda ser reconocida desde el aire, altimetría semi-cuantitativa con énfasis en alturas máximas o que puedan ser peligrosas, zonas restringidas al tráfico aéreo, localización de estaciones de radio-ayuda, etc. En general, en ambos tipos de carta, la información es sobre ayudas y obstáculos para la navegación.

Otro grupo muy importante de las cartas especiales es el que engloba a las cartas temáticas, referidas a un solo tema o factor de información, a veces muy específico. Dicho factor o tema puede ser de orden cualitativo cuando la información es predominantemente de orden descriptivo, sin que se puedan obtener relaciones numéricas directas de inmediato, y cuantitativas en el caso contrario, cuando los elementos de información contienen datos numéricos explícitos. Así por ejemplo, una carta geológica que contiene información sobre la distribución de los diferentes tipos de rocas (litología), localización de fallas, fracturas, alineamientos, ejes de anticlinales y sinclinales, etc. (Estructuras) y ubicación de minas, bancos de material, pozos, etc., (geología económica), es estrictamente cualitativa, mientras que las cartas de precipitación o temperaturas



con isoyetas o isotermas (curvas de igual precipitación o temperatura) , son predominantemente de orden cuantitativo, por cuanto de ellas se puede extraer información numérica de inmediato. Es evidente que habrá cartas que participen de ambas características, cualitativas y cuantitativas, pero el orden a que pertenecen será el predominante en la carta.

En ambos casos, se han incluido en el cuadro de la figura 13 algunos ejemplos de cartas temáticas, en el entendido de que la lista puede ser mucho más extensa, dependiendo del tema. De acuerdo con esto, las posibilidades son prácticamente inagotables y nuevamente, se recalca el hecho de que el límite no está más que en la imaginación de los interesados y que para cualquier tema de información, en tanto que sea susceptible de un análisis que conduzca a posibilidades de expresión gráfica en una distribución espacial definida, se puede hacer una carta.

Un tercer grupo de cartas, menos significativo, incluye los cartogramas (diagramas cartográficos) que son representaciones muy simbolizadas referidas a datos geográficos estadísticos, y las canas de ilustración y propaganda, en las cuales dominan los aspectos de generalización y simbolización con el objeto de llamar la atención sobre algún evento o producto. En general, son cartas para publicidad.

Con esto se concluye el tema relativo a la clasificación de mapas, en el entendido de que los diversos enfoques no están necesariamente agotados. Cualquier mapa cae dentro de todas las clasificaciones indicadas y así por ejemplo, la carta topográfica de la DGG-INEGI a la escala de 1:50,000 se puede definir:

- Conforme a la escala, como un mapa de escala media,
- Por el nivel de información, como un mapa de semidetalle,
- Según el sistema de producción, como un mapa fotogramétrico, restituído, con un sistema de ajuste numérico. Las versiones más recientes constituyen productos digitales obtenidos a partir de la modernización del sistema de producción,
- Por el propósito, como un mapa para planeación y más estrictamente, para planeación regional a nivel de anteproyecto,
- Por su precisión, es un mapa clase A-1,
- Por su origen, se cataloga como un mapa básico (de hecho es el mapa básico nacional),
- Por su forma de presentación, es un mapa plano a línea, y
- Por el tipo de información, es un mapa de información general, sobre un área grande (aproximadamente 1,000 km cuadrados) y de tipo topográfico.





## **ESCALA**

Todo mapa está necesariamente a una cierta escala, que como ya se mencionó, se define en la etapa de diseño. El propósito de la escala es el de permitir la representación de áreas grandes en un documento manejable de pequeñas dimensiones, de modo que la escala se define como una *relación lineal de las dimensiones del mapa con respecto a las dimensiones reales en el terreno*, o bien, como la *relación entre una medida de distancia en el mapa con la correspondiente medida en el terreno*.

En términos cartográficos, la escala tiene tres formas de enunciación o representación:

- a) Por la fracción representativa,
- b) Por la escala gráfica,
- e) Por la escala declarada.

### **FRACCIÓN REPRESENTATIVA**

Es una expresión numérica dada en forma de fracción como 1/50,000, ó de relación como 1:50,000, en la que el numerador representa una unidad de medida en el mapa y el denominador indica el correspondiente número de unidades de medida en el terreno. Las unidades empleadas pueden ser cualesquiera, pero uniformes, tanto para el numerador como para el denominador; es decir, si la escala es de 1:50,000:

1 cm en el mapa	equivale a	50,000 cm en el terreno
1 mm en el mapa	equivale a	50,000 mm en el terreno,
1 pulgada en el mapa	equivale a	50,000 pulgadas en el terreno,

Y así sucesivamente para cualquier unidad de medida.

Su uso es sencillo; para obtener la distancia entre dos puntos en el terreno, hay que medir la distancia en el mapa con ayuda de una regla o escalímetro, multiplicar el resultado de la medida por el denominador de la escala y hacer las reducciones necesarias para tener la distancia en la unidad de medida deseada. Por ejemplo, si en el mapa a la escala de 1:50,000 se midió entre dos puntos una distancia de 11.86 cm, la correspondiente medida en el terreno es:

$$11.86 \times 50,000 = 893,000 \text{ cm ;}$$

Corriendo dos decimales, distancia en el terreno:

$$8,930 \text{ m ó bien, } 8.93 \text{ km}$$

Si se trata de un área, hay que multiplicar por el cuadrado del denominador de la escala. Ejemplo, si un área medida en el mapa, con planímetro o por cualquier otro medio, resultó de 27.36 cm<sup>2</sup>:

Cuadrado del denominador de la escala:

$$(5 \times 10^4)^2 = 25 \times 10^8$$

Entonces:

$$27.36 \times (25 \times 10^8) = 684 \times 10^8 \text{ cm}^2$$

Para obtener el área en metros cuadrados, hay que dividir por  $10,000 = 10^4$ , lo que da:

$$\text{Área en el terreno} = 684 \times 10^4 \text{ m}^2 = 6,840,000 \text{ m}^2$$

O si se quiere en hectáreas:

$$\text{Área en el terreno} = 684 \text{ Ha, ó bien, en kilómetros cuadrados: } 6.84 \text{ km}^2$$

Si se trata de obtener un volumen, por ejemplo el volumen del embalse de una presa, el proceso se basa en la determinación de las áreas encerradas por las curvas de nivel hasta la boquilla y la obtención de los volúmenes parciales, conociendo la equidistancia entre curvas (en lo general 10 metros para las cartas topo gráficas del INEGI-DGG en la escala de 1:50,000). Los volúmenes parciales se obtienen con la siguiente expresión:

$$\text{Volumen entre dos curvas sucesivas} = 0.5i(A_n + A_{n+1})$$

En donde  $A_n$  es el área encerrada por una curva de nivel,  
 $A_{n+1}$  es el área encerrada por la siguiente curva, e  
 $i$  es la equidistancia entre curvas

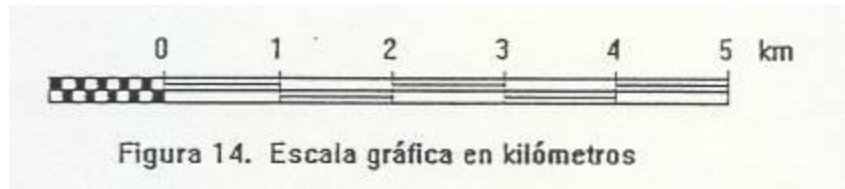
Al final se hace la sumatoria de los volúmenes parciales encontrados y se lleva a efecto la reducción de los decimales para obtener el resultado en las unidades deseadas. A continuación se hará un ejemplo en el que las áreas se dan en kilómetros cuadrados y la equidistancia está en metros. A fin de mantener consistentes la unidades, si  $i = 10\text{m}$ , hay que multiplicar por  $10/1,000=0.01$ .

n	$A_n$	$A_{n+1}$	$0.5x(A_n + A_{n+1})$	$0.51x(A_n + A_{n+1})$
1	6.84	5.76	6.300	0.06300
2	5.76	4.39	5.075	0.05075
3	4.39	4.03	4.210	0.04210
4	4.03	3.50	3.765	0.03765
5	3.50	0.00	1.750	0.01750
<b>SUMA</b>				<b>0.21100 Km<sup>3</sup></b>

$$\text{VOLUMEN} = 211,000,000 \text{ m}^3$$

### ESCALA GRÁFICA

Esta es un dibujo en forma de barra semejante al de la figura 14, en la que se han hecho divisiones correspondientes al equivalente de una cierta unidad de medida en el terreno, con la adición de una parte subdividida en la unidad inmediata inferior.



Este tipo de escala se utiliza tomando la distancia en el mapa, sin medida, y trasladándola al diagrama o escala gráfica, donde se lee la distancia. Se puede usar un compás de puntas secas, una tira de papel, el borde de una hoja, o un trozo de hilo (muy útil para distancias en curva). Si la distancia por medir es mayor que la longitud de la escala, simplemente se van tomando y sumando las partes enteras de la escala hasta llegar a la parte fraccional (semejante a lo que hacen los dependientes en las tiendas de venta de tela).

### **ESCALA DECLARADA**

Esta es una expresión, una frase, una declaración, que indica las relaciones de distancia entre mapa y realidad en unidades diferentes de medida. No es muy usual en el medio nacional, pero sí frecuente en países de habla inglesa. Por ejemplo, en Inglaterra se habla de la serie de mapas "one inch to the mile", o mapas de una pulgada por milla, queriendo decir con esto que una pulgada medida en el mapa equivale a una milla medida en el terreno. Como puede verse, a diferencia de la fracción representativa, las unidades son distintas.

En el caso de México, la escala declarada no se emplea explícitamente, pero puede formularse una con facilidad. Por ejemplo, para el caso de la escala de 1:50,000:

Se sabe que 1 cm en el mapa equivale a 50,000 cm en el terreno, o bien, 500 metros.

Si se multiplica por dos esta relación:

2 cm en el terreno equivalen a 1,000 metros, o lo que es lo mismo, 1 kilómetro.

Por lo tanto, una escala declarada para esta cartografía es de 2 centímetros por kilómetro. Aunque esta escala no es explícita, puede ser de utilidad, sobre todo si se considera que las cartas en la escala de 1:50,000 tienen una cuadrícula trazada en cuadros de 2 cm, o un kilómetro por lado, de modo que cada cuadro representa un kilómetro cuadrado en área. Es evidente que el conocimiento de la relación expuesta y su expresión gráfica pueden ser de mucha utilidad para determinaciones rápidas de distancia y estimación de áreas (contando el número de cuadros y fracciones).

De los tres tipos de escala indicados, la escala gráfica es obligatoria, mientras que las otras dos son opcionales y podrían no aparecer del todo en el mapa. Lo normal es que en los mapas se indiquen tanto la fracción representativa como la escala gráfica.

La razón de la obligatoriedad respecto a la escala gráfica se debe a que el papel en que se imprimen los mapas puede sufrir cambios dimensionales debidos a efectos de temperatura, humedad o manejo. Cuando esto ocurre, de inmediato queda alterada la fracción representativa y



ya no es válida para determinaciones que requieren cierta exactitud. Véase el siguiente ejemplo:

Supóngase que un mapa a la escala de 1:50,000 sufre una deformación por cualquier causa, tal que en 50 cm en una cierta dirección es 2 mm más largo, o sea que en realidad tiene ahora 50.2 cm. Esto quiere decir que la escala ya no es 1:50,000, sino que tiene un valor más grande, que puede determinarse con una simple operación de regla de tres:

	50 cm	son a	1/50,000
como	50.2 cm	son a	1/X

Haciendo operaciones, resulta

$$X = (50 \times 50,000) / 50.2 = 49,801$$

De modo que la nueva escala es de 1:49,801

Si la distancia de 17.86 cm medida en el ejemplo anterior está afectada por este cambio, significa que en lugar de la distancia de 8,930 m que se había calculado, se tiene ahora:

$$17.86 \times 49,801 = 889,446 \text{ cm} = 8,894.46 \text{ m,}$$

Lo que significa un error de

$$8894.46 - 8,930.00 = -35.54 \text{ m}$$

que en determinadas circunstancias podría ser inadmisibles.

Lo mismo ocurriría en el caso de la escala declarada. Con respecto a la escala gráfica, si el papel se deforma, también lo hace la escala, generalmente en la misma proporción, y aún cuando se pierda la escala original en términos numéricos, la relación mapa-terreno se mantiene razonablemente. Es por esta razón que la escala gráfica es mandatoria.

Por otra parte, cuando se hacen reducciones o ampliaciones fotográficas de los mapas, ocurre lo mismo; la escala numérica se pierde, pero se mantiene la escala gráfica, debido a que esta ha sufrido la misma proporción de reducción o ampliación. Una nota de advertencia: en estos casos se reproduce fotográficamente la escala dada por la fracción representativa, lo cual induce a error si no se tiene en consideración el proceso.

## **SISTEMA DE COORDENADAS**

Todo mapa que se precie de serio está referido a por lo menos un sistema de coordenadas universal, cuyo objeto es el de dar su ubicación geográfica y con ella la de todos los puntos y detalles contenidos en el mismo, además de facilitar la explotación de las características métricas del mapa. Es de señalar que esto no se cumple en todos los casos y que hay mapas que no llevan esta referencia, por ejemplo, los mapas de ilustración y propaganda y algunos mapas de escalas grandes en los que las referencias se dan con arreglo a un esquema cuadrícula ad-hoc o está

ausente del todo. En relación con la cartografía formal lo que se discute en este apartado está relacionado con la ubicación espacial en un marco geográfico de referencia, y en este sentido se tratarán el *sistema geográfico* o curvilíneo y el *sistema rectangular o cartesiano*.

## SISTEMA GEOGRÁFICO

El más frecuente, conocido y casi obligado sistema de coordenadas empleado en los mapas es el llamado sistema geográfico o curvilíneo a base de latitudes y longitudes geográficas. El sistema, como ya se vio en otra parte de este documento fue concebido inicialmente en la Grecia antigua y subsiste sin alteraciones hasta nuestros días. El sistema es curvilíneo debido a que los círculos máximos que lo definen son líneas curvas (figura 17). Un círculo máximo en una esfera es cualquier círculo cuyo plano contiene el centro de la esfera y por lo tanto puede haber un número infinito de círculos *máximos*, aunque de interés para el propósito son dos tipos los que interesan:

- El Ecuador terrestre, que es el círculo máximo perpendicular al eje de rotación de la Tierra.
- Los meridianos, que son círculos máximos que contienen a dicho eje, el principal de los cuales es el llamado meridiano de referencia, particularmente el Meridiano de Greenwich.

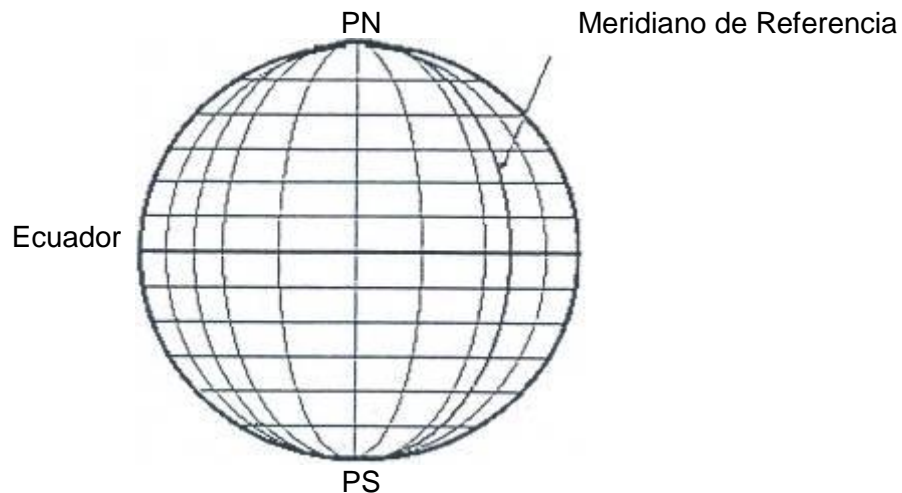


Figura 17. Ejes del sistema geográfico

El Ecuador es el origen para la medida de las latitudes y se define la latitud como la distancia angular que existe entre el Ecuador y el punto, a lo largo del meridiano que pasa por el punto. La distancia angular en este caso no es más que el ángulo en el centro de la Tierra entre el punto y la intersección con el Ecuador del meridiano que pasa por dicho punto. La latitud se mide desde cero a  $90^\circ$ , en ambas direcciones (norte o sur).

El meridiano de Greenwich, Inglaterra, es el origen para la medida de las longitudes: La longitud de un punto es la distancia angular medida sobre el Ecuador, entre el pie del meridiano que pasa por el punto y la intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador. La longitud se mide desde cero a  $180^\circ$ , hacia el este o el oeste. En la siguiente figura (18), se ilustran estas definiciones.

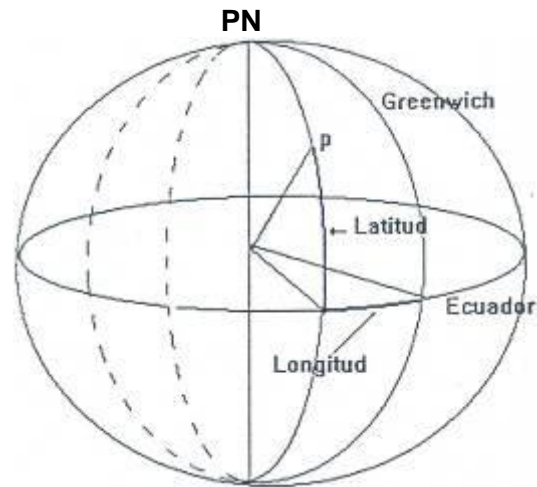


Figura 18. Latitud y longitud

Por sistema, en el manejo y expresión de coordenadas siempre se menciona en primer término la latitud con su designación norte (N) o sur (S), y en segundo, la longitud, con la indicación de si es este (E) u oeste (O). En el caso de México y para uso interno no es necesario mencionar la dirección, que ya se sabe es siempre norte para las latitudes y oeste para las longitudes. Sin embargo, en ciertos paquetes de software de aplicación, los mismos programas piden que se especifique la dirección.

La información en el mapa está limitada por un formato constituido por líneas que representan paralelos de latitud y meridianos de longitud, las que aparentemente forman un rectángulo. Los paralelos de latitud son círculos menores paralelos al Ecuador. A este conjunto de líneas se le llama comúnmente caneavá y en rigor las líneas no son paralelas como en un rectángulo, sino que constituyen lo que se llama un cuadrángulo. Si se vuelve un poco a la figura 17, se puede reconocer que si bien los paralelos son como su nombre lo indica, los meridianos son convergentes en los polos y la figura real del mapa es, sumamente exagerada, como se indica en la figura 19.

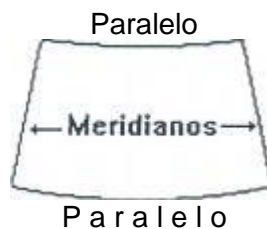


Figura 19. Formato geográfico de un mapa

Consecuencia de lo anterior es que el paralelo superior tenga menor extensión que el inferior y además que las áreas cubiertas por mapas situados más cercanos al Polo Norte sean menores que las de mapas ubicados más al sur. Esto no es muy aparente en las cartas del INEGI-DGG, debido a la escala, pero el interesado puede comprobarlo fácilmente haciendo unas cuantas medidas.

En el caso de estas cartas, el sistema de coordenadas se indica a través de cuatro niveles de aproximación diseñados para facilitar a los usuarios el trabajo de referenciación geográfica, véase la figura 20 a continuación.

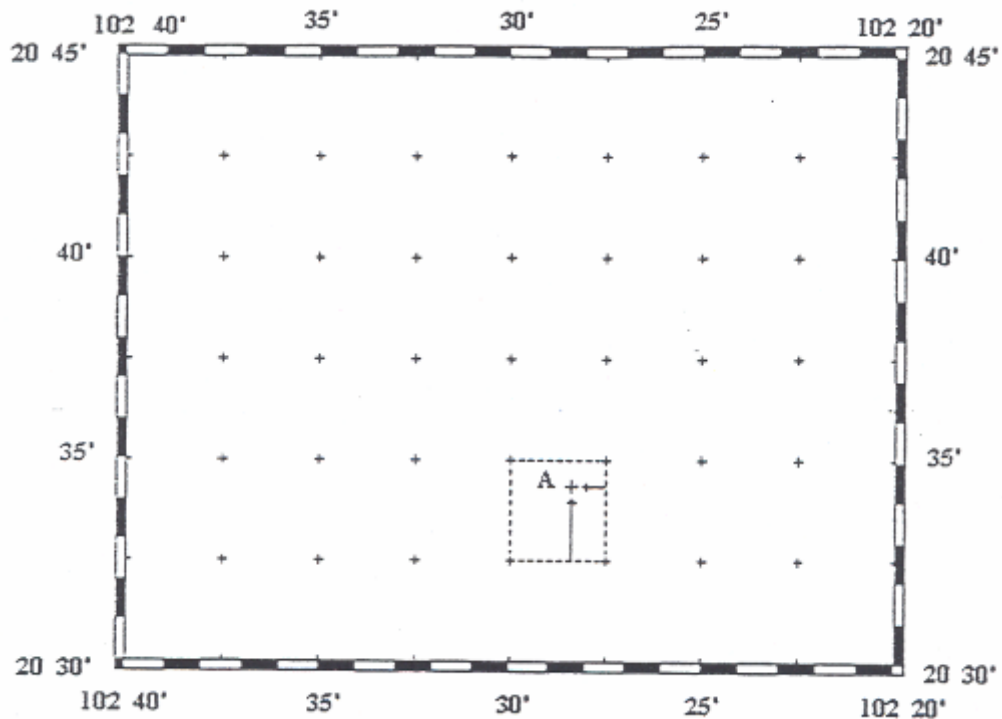


Figura 20. Sistema de coordenadas geográfico en las cartas del INEGI escala 1:50,000

### Primer nivel de aproximación

En cada una de las esquinas del mapa se indican las coordenadas geográficas, alineadas con los respectivos paralelos y meridianos (la latitud es siempre el menor de los dos valores). En el ejemplo de la figura 20 se puede ver que el mapa tiene un formato de 20 minutos de arco en longitud, por 15 minutos de arco en latitud, en una relación de cuatro a tres. En otros mapas de iguales o diferentes escalas se pueden dar formatos diferentes. El formato se define en la etapa inicial de diseño.

Con el objeto de tener una idea acerca de las dimensiones relacionadas con unidades cíclicas (grados, minutos y segundos) sobre la superficie esferoidal terrestre al nivel del Ecuador, se puede decir que aproximadamente:

Un grado equivale a	110 kilómetros
Un minuto equivale a	1,850 metros o una milla marina
Un segundo equivale a	30 metros

Se reitera que estos son valores aproximados, al nivel del Ecuador, pero útiles para tener una idea del orden de las magnitudes en la práctica. Las dimensiones a lo largo de los paralelos van disminuyendo al alejarse del Ecuador, hasta hacerse cero en los polos. Si se quiere tener una aproximación, hay que multiplicar los valores anteriores por el coseno de la latitud.

Si se usan los valores indicados para encontrar el formato lineal del mapa, se ve que horizontalmente se tiene una extensión de:

$$1.85 \times 20 = 37 \text{ km}$$

Y verticalmente:  $1.85 \times 15 = 27 \text{ km}$ ,

Es decir, un formato de 37 x 27 km.

Si se multiplican ambos valores, se encuentra el área aproximada cubierta por el mapa:

$$\text{Area} = 37 \times 27 = 999 \text{ km}^2$$

Por lo que se dice que cada carta básica del INEGI-DGG a la escala de 1:50,000 cubre aproximadamente 1,000 km<sup>2</sup>.

Hay que recordar que estos no son valores precisos; si se quiere mayor exactitud es necesario emplear fórmulas matemáticas de la Geodesia. En todo caso, el error cometido en términos de área por el empleo de las anteriores aproximaciones no es mayor que un 14% en el ámbito territorial mexicano. En efecto, la carta más extrema al norte cubre en realidad 855km<sup>2</sup>, mientras que la que está más al sur abarca una superficie de 993 km<sup>2</sup>.

### Segundo nivel de aproximación

A lo largo del canevá y por la parte exterior, se hacen subdivisiones cada 5 minutos de arco y se rotulan con el valor correspondiente.

### Tercer nivel de aproximación

Internamente, dentro del cuerpo del mapa, se hacen subdivisiones a la mitad del intervalo anterior, o sea cada 2.5 minutos de arco y se marcan con una pequeñas cruces, sin rotular.

### Cuarto nivel de aproximación

El último nivel de aproximación está a lo largo de los bordes de la carta, en donde se hacen subdivisiones cada minuto de arco.

Con este conjunto el usuario tiene varias opciones y puede determinar posiciones geográficas de puntos de interés con relativa facilidad y con una precisión de aproximadamente dos décimos de segundo de arco ( 0.2").

En la práctica, se puede proceder de dos maneras:

a) Por ejemplo, para el punto **A** señalado en la figura 20, se recomienda trazar un cuadro que una las cruces de coordenadas de modo que el punto quede encerrado en dicho cuadro.

A continuación, hay que tomar algunas medidas. En el caso de la latitud, mídase con una regla o escalímetro la distancia entre el lado inferior del cuadro y el punto, y entre el lado inferior y el superior. Supóngase que estas medidas arrojaron 3.54 y 4.61 cm respectivamente. A continuación se aplica una sencilla regla de tres:

	4.61 cm	es a	2.5 minutos de arco.
Como	3.54 cm	es a	X minutos de arco,



entonces:

$$x = (3.54 \times 2.5) / 4.61 = 1.920 \text{ minutos de arco,}$$

esto es

$$x = 1.920' = 1' 55.2''$$

la latitud del lado inferior es de  $20^\circ 32.5'$ , a la que hay que sumarle el valor encontrado:

$$\begin{array}{r} 20^\circ \quad 32' \quad 30'' \\ + \quad \quad \quad 1' \quad 55.2'' \\ \hline \end{array}$$

Latitud de A:

$$20^\circ \quad 34' \quad 25.2''$$

Lo mismo se hace en el caso de la longitud geográfica; en este caso se toman medidas desde el lado derecho del cuadro, hasta el punto y hasta el lado izquierdo. Supóngase que las medidas fueron de 2.05 y 4.62 cm respectivamente. Nuevamente se aplica la regla de tres:

$$\begin{array}{l} 4.62 \text{ cm} \quad \text{es a} \quad 2.5 \text{ minutos de arco,} \\ 2.05 \text{ cm} \quad \text{es a} \quad X \text{ minutos de arco.} \end{array}$$

resolviendo:

$$X = (2.05 \times 2.5) / 4.62 = 1.109 \text{ minutos de arco,}$$

esto es,

$$X = 1.109' = 1' 06.5'' ;$$

la longitud del lado derecho es de  $102^\circ 27.5'$ , a la que hay que sumar el valor calculado:

$$\begin{array}{r} 102^\circ \quad 27' \quad 30'' \\ + \quad \quad \quad 1' \quad 6.5'' \\ \hline 102^\circ \quad 28' \quad 36.5'' \end{array}$$

Longitud de A:

El resultado final se expresa indicando la pareja de valores, con la latitud en primer lugar; esto es:

Punto A:      **Latitud**      **20°**      **34'**      **25.2''**  
                  **Longitud**      **102°**      **28'**      **36.5''**

Si el punto está cerca de los bordes del mapa, se pueden emplear con ventaja las subdivisiones a cada minuto.

Nótese que con el sistema descrito es necesario hacer cuatro trazos, tomar igual número de medidas y efectuar varias operaciones, lo que puede consumir tiempo si se desea la determinación de varios puntos. Además, existe el riesgo de cometer errores por lo repetitivo de las operaciones. El siguiente método es más rápido y confiable una vez que se ha dominado en la práctica.

b) Como en el caso anterior, se traza un cuadro alrededor del punto uniendo las cruces de coordenadas, y se procura extenderlo un poco.

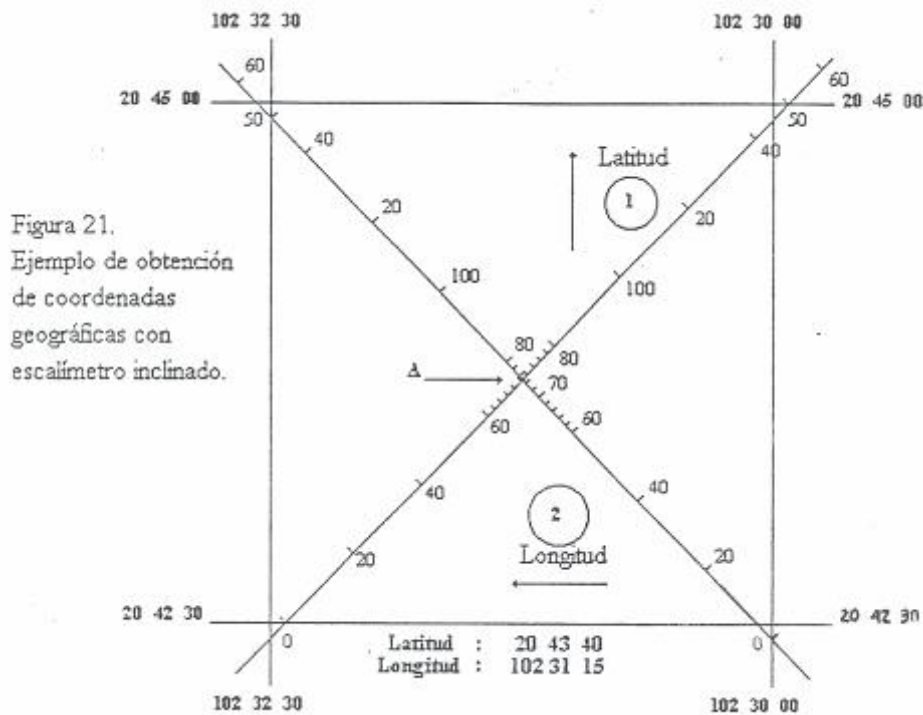
Tómese un escalímetro cualquiera y escójase un cierto número de unidades, tales que su longitud sea mayor que las dimensiones del cuadro y que sean un múltiplo cerrado del intervalo en

minutos que se quiere cubrir, en este caso, 2.5 minutos de arco. En el ejemplo que se da en la figura 21 se escogieron 150 segundos, equivalentes a los 2.5 minutos, en un escalímetro hipotético numerado de 20 en 20 unidades.

En el caso de las latitudes, se acomoda el escalímetro de modo que el cero coincida con la línea inferior del cuadro y la marca de 150 segundos esté sobre la línea superior. Trasládese el escalímetro paralelo a sí mismo, hasta que su borde coincida con el punto deseado. Hay que revisar y ajustar lo necesario ya que en el momento de hacer la lectura las coincidencias deben ser poco menos que perfectas.

Tomando en cuenta la latitud de la línea inferior, váyanse contando las divisiones según su valor, hasta llegar al punto, determinando así la coordenada buscada. A continuación se hace lo mismo para las longitudes, sólo que en este caso el cero del escalímetro se hace coincidir con el lado derecho del cuadro y la marca de 150 segundos deberá estar en el lado izquierdo, luego de lo cual el procedimiento es el mismo. En la figura 21 se ilustra este método, que tiene la ventaja de no requerir medidas ni operaciones numéricas, además de estar menos sujeto a errores. El ejemplo no es más que eso, un ejemplo y no significa que necesariamente deba haber 150 unidades; de hecho, la selección del intervalo es un tanto arbitraria y depende más bien del operador, lo importante en esto es el concepto.

Puede haber otros métodos para estas determinaciones de coordenadas geográficas, alguno de ellos basados en el uso de plantillas deslizables. En la actualidad y con los sistemas automatizados esta operación es muy sencilla; basta con apuntar en la pantalla y pulsar un botón para obtener las coordenadas instantáneamente, aunque se requiere que previamente el mapa esté en una base de datos geográficamente referenciada.





## SISTEMA RECTANGULAR

Como una opción al sistema geográfico o curvilíneo, se usa de manera intensiva el sistema rectangular, puramente cartesiano, que desde el punto de vista de uso práctico ofrece varias ventajas, entre ellas las siguientes:

- a) Las coordenadas de puntos se pueden obtener con mayor rapidez y seguridad,
- b) Los cálculos de distancias y orientación son relativamente sencillos,
- c) La determinación de áreas es más precisa cuando se emplean sistemas digitales,
- d) La digitalización se puede hacer con referencia a pares de coordenadas de más fácil manejo,
- e) Ciertas aplicaciones son más eficientes (artillería, catastro, planeación urbana, etc..) si pueden referirse a un sistema rectangular de coordenadas,
- f) Los procesos fotogramétricos trabajan con sistemas numéricos basados en coordenadas rectangulares.

Los sistemas rectangulares se superponen a la información del mapa mediante una cuadrícula en la que los valores de coordenadas están referidos a una cierta proyección cartográfica (véase el tema de proyecciones más adelante).

En el caso de la Dirección General de Geografía del INEGI, como en muchas otras organizaciones cartográficas nacionales y del exterior, se utiliza la llamada cuadrícula Universal Transversa de Mercator, basada en la proyección cartográfica del mismo nombre (Universal Transversa de Mercator ó UTM). Dicha cuadrícula es un reticulado impreso en las primeras cartas editadas a la escala de 1:50,000 a intervalos de 10 km, en color negro, y posteriormente cada 2 cm, en color azul.

Las características de este sistema son las siguientes, ver figura 22:

- a) Los ejes están orientados en las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur,
- b) El eje de las abscisas, orientado en la dirección Este-Oeste, es la línea del Ecuador Terrestre. Es con referencia a este eje que se miden las coordenadas Y, denominadas "Norte" (N), en metros, en el hemisferio norte que es el que corresponde a México y a partir del valor cero.
- c) El eje de las ordenadas, orientado en la dirección Norte-Sur, es una línea que se define como el meridiano central de la zona UTM en que está ubicada la cartografía. Es con referencia a esta línea que se miden las coordenadas X, denominadas "Este" (E), en metros, a la derecha o izquierda de la misma y a partir de un valor establecido arbitrariamente en 500,000 metros.

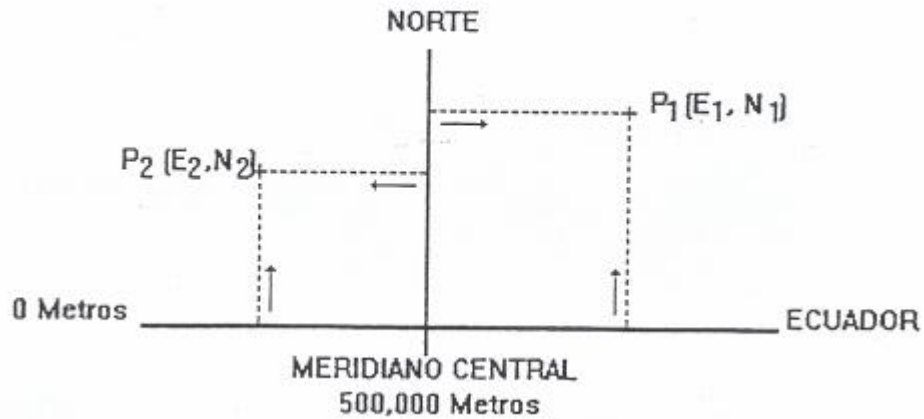


Figura 22. Sistema rectangular UTM

El concepto de meridiano central se explica a continuación, asociado al sistema universal UTM.

Imagínese el hemisferio norte visto desde un punto elevado sobre el Polo Norte. Sobre este hemisferio se representa el Meridiano de Greenwich como una línea vertical, así como los meridianos a 90 grados de éste.

Divídase esta figura en 60 panes iguales, tal como se indica en la figura 23, de modo que cada división tenga una extensión en longitud geográfica de 6 grados de arco. Lo que resulta de esta división es la representación de las denominadas *Zonas UTM*.

Desde el meridiano de 180°, numérense las zonas de 1 a 60, en sentido contrario a las manecillas del reloj. Con esto se identifican las diferentes zonas de la UTM.

Nótese que México abarca 6 zonas UTM, de la 11 a la 16 inclusive.

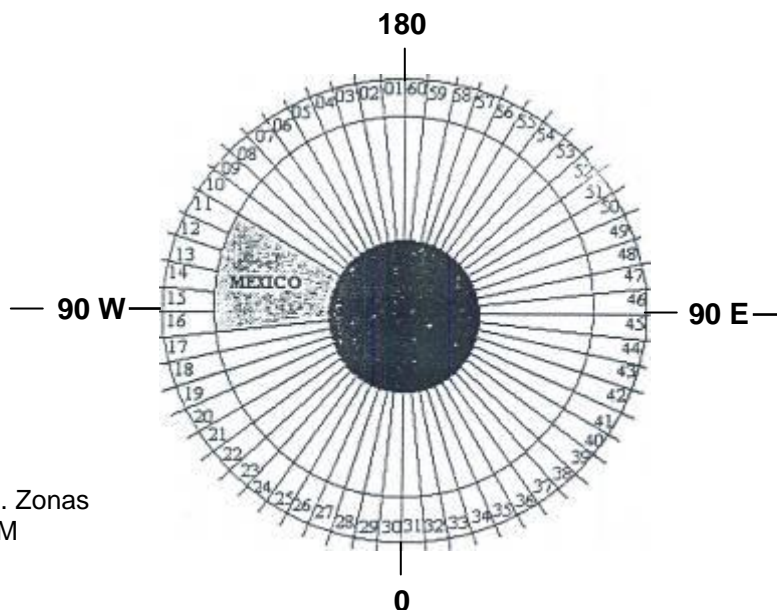


Figura 23. Zonas UTM



Si se aísla una cualquiera de las zonas, ahora vista de frente, por ejemplo la zona 14, se la puede ver como un huso horario, figura 24.

Los límites entre zonas son desde luego meridianos con una longitud geográfica conocida. El meridiano que divide la zona en dos partes es el llamado meridiano central de la zona, o eje Y de coordenadas al que se hizo referencia anteriormente.

Las coordenadas de cualquier punto estarán entonces a uno u otro lado del meridiano central. Para evitar la ocurrencia de valores negativos de la coordenada Este para puntos que estén a la izquierda del meridiano central, se le da a éste un valor de origen arbitrario igual a 500,000 metros. Dicho valor asegura que siempre habrá coordenadas Este positivas; recuérdese que 3 grados de arco son aproximadamente 330,000 metros.

Cada zona tiene su propio meridiano central con un valor de 500,000 metros. Por esta razón habrá coordenadas repetitivas a lo largo del globo terrestre, por lo que cuando se trabaja en ámbitos geográficos que comprendan varias zonas, junto con cada par de coordenadas debe especificarse el número de zona.

También ocurrirá que en los límites de zonas contiguas habrá puntos que tengan dos juegos de coordenadas diferentes. Por ejemplo, para el punto A de la figura 24, se tiene:

A(  $E_a$ ,  $N_a$ ) Zona 14,

A( $E'_a$ ,  $N'_a$ ) Zona 13

De modo que

$N_a = N'_a$  y:

$E_a \neq E'_a$

$E_a < 500,000$  ;  $E'_a > 500,000$

Cualquier valor de coordenada Este que sea mayor que 500,000, indica un punto hacia el oriente del meridiano central; si la coordenada es menor que 500,000, el punto se encuentra al oeste del meridiano central.

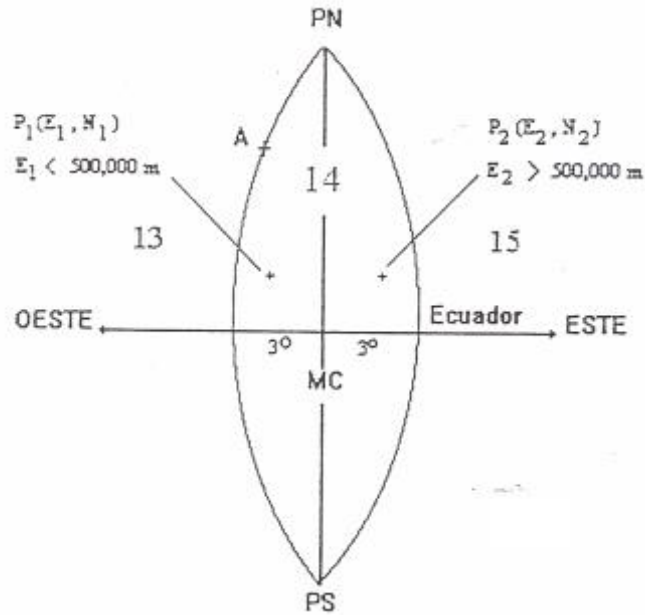


Figura 24. Zona UTM 14

En resumen:

La coordenada norte de un punto representa la distancia en metros que existe entre dicho punto y el Ecuador terrestre.

La coordenada Este de un punto, restada de 500,000, representa la distancia en metros que existe entre dicho punto y el meridiano central de la zona UTM en que está ubicada la carta que contiene al punto.

En las cartas del INEGI-DGG a la escala de 1:50,000, los valores de las coordenadas UTM de referencia se indican en la esquina inferior izquierda de cada carta, con los valores en metros, en color azul. Luego, a lo largo de los bordes y alineado con la cuadrícula, con las dos últimas cifras en unidades de kilómetros, véase la figura 25.

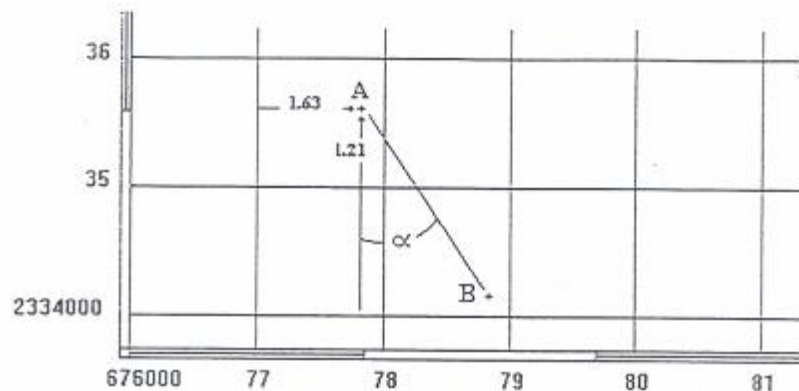


Figura 25. Ejemplo de la cuadrícula UTM

## USOS DEL SISTEMA RECTANGULAR

### DETERMINACIÓN DE COORDENADAS

La determinación de las coordenadas de puntos es de lo más sencillo. Si se quieren con una aproximación de 100 metros, basta leerlas "al ojo", con referencia a los valores indicados. El punto **A** de la figura tiene así las siguientes coordenadas:

A ( 677.8 , 2,335.6) en kilómetros

Si se quiere mayor aproximación, hay que medir con un escalímetro hasta el décimo de milímetro, lo que permite obtener coordenadas dentro de  $\pm 5$  metros. Por ejemplo, para el mismo punto, las medidas encontradas son de 1.63 cm y 1.21 cm en las direcciones horizontal y vertical respectivamente, a partir de las líneas de la cuadrícula correspondientes. Recordando que para la escala de 1: 50,000 un cm equivale a 500 metros:

$$\begin{array}{r} 1.63 \times 500 = 815 \text{ m} \\ + \quad 677000 \\ \hline E = \quad 677815 \text{ m} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1.21 \times 500 = 605 \text{ m} \\ + \quad 2335000 \\ \hline N = \quad 2335605 \text{ m} \end{array}$$

677000 y 2335000 son los valores cuadrículares de referencia, véase la figura 25.

Nota: para valores precisos conviene asegurar que el papel no se ha deformado. Si hay sospecha de que esto ha ocurrido, debe comprobarse haciendo un par de medidas sobre la cuadrícula, de unos 20 cm en la vecindad del punto. Supóngase que en la dirección Este se encontraron 20.34 cm en lugar de 20 y que en la otra dirección se obtuvieron 20.19 cm. Las medidas son entre líneas de cuadrícula. Las coordenadas corregidas se pueden calcular mediante una simple regla de tres:

Para Este	Para Norte
20.34 cm ..... 10,000 m	20.19 cm ..... 10,000 m
1.63 cm ..... X m	1.21 cm ..... X m
$X = (1.63 \times 10,000)/20.34$	
$X = (1.21 \times 10,000)/20.19$	
X = 801 m	X = 599 m

y así, las coordenadas del punto, tomando en cuenta las deformaciones del papel, son:

$$E = 677801 \quad ; \quad N = 2335599$$

En lugar de lo anterior, se podría calcular una corrección para varios puntos, de ser el caso, aplicable a los valores encontrados. Se deja al estudiante comprobar que los factores de corrección son:

$$- 0.01672 \text{ en la dirección Este y } - 0.00941 \text{ en la dirección Norte}$$



Con estos factores, las nuevas coordenadas son:

$$\begin{aligned} \text{Este:} & \quad 677000 + 815 - 0.01672 \times 815 = 677815 - 14 = 677801 \\ \text{Norte:} & \quad 2335000 + 605 - 0.00941 \times 605 = 2335605 - 6 = 2335599 \end{aligned}$$

### **DETERMINACIÓN DE DISTANCIAS**

En ocasiones, será necesario encontrar la distancia recta entre dos puntos con una precisión mayor que la que pueden dar el empleo de la fracción representativa o la escala gráfica. En este caso, la distancia puede calcularse determinando las coordenadas UTM de los puntos extremos de la línea y aplicar las siguientes expresiones:

$$D_{1-2} = \sqrt{S}$$

$$S = (E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2$$

En donde  $(E_1, N_1)$  son las coordenadas UTM del primer punto y  $(E_2, N_2)$  son las correspondientes del segundo punto. La solución requiere hacer dos subtracciones, dos elevaciones al cuadrado, una suma y una raíz cuadrada, lo que consume tiempo si se hace a mano, pero con el uso actual de calculadoras de bolsillo, las cuales son muy accesibles, la operación requiere solamente unos cuantos segundos.

El procedimiento anterior es válido para cualquier distancia que se quiera calcular dentro de un mapa o dentro de una zona UTM, pero pierde validez para líneas que estén en dos o más zonas, debido a que las coordenadas de los puntos extremos no son compatibles por estar referidas a meridianos centrales diferentes. En estas hay situaciones hay que recurrir a fórmulas geodésicas para cálculo de distancias en función de .coordenadas geográficas.

La distancia obtenida a base de coordenadas rectangulares es una distancia de cuadrícula. Si se desea la distancia topo gráfica, es necesario aplicar una corrección por lo que se llama factor de escala, el cual es la relación que existe entre la distancia recta de la cuadrícula y la correspondiente distancia curva sobre la superficie terrestre. Más adelante, en el tema de proyecciones cartográficas se tratará con un poco de mayor extensión el factor de escala. Sin embargo, queda al criterio del usuario hacer la corrección o no, de acuerdo con la precisión requerida, considerando que el máximo error que se puede cometer es del orden de una parte en 2,500.

### **DETERMINACIÓN DE DIRECCIONES**

La dirección de una línea (rumbo o acimut) se puede determinar usando las coordenadas de los puntos extremos o de parejas de puntos intermedios a lo largo de la línea. Por ejemplo, el rumbo de la línea A-B de la figura 25 se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Tan}\alpha = (E_2 - E_1) / (N_2 - N_1)$$

En donde  $\alpha$  es el ángulo entre la línea y la dirección norte-sur. En este caso se obtiene un rumbo sureste. Si se invierte el orden en los puntos, se obtiene un rumbo noroeste. Nuevamente, el cálculo se puede hacer fácilmente con una calculadora de bolsillo.





El rumbo así obtenido corresponde a una dirección de cuadrícula, ya que como en el caso de la distancia, los valores empleados son coordenadas que están en la cuadrícula UTM. El usuario puede estar interesado en conocer ya sea la dirección astronómica real o verdadera, o bien la dirección magnética, lo cual lleva a la consideración de que en la carta se manejan tres diferentes nortes; el norte astronómico, el norte de cuadrícula y el norte magnético. Para tales efectos, se pueden hacer ciertas "correcciones a las direcciones cuadrículas:

- La corrección por convergencia en el caso de transformación de la dirección cuadrícula a la dirección astronómica, real o verdadera,
- La corrección por declinación en el caso de la transformación a dirección magnética, aplicada a la dirección verdadera.

En el primer caso, hay que recordar que los meridianos que limitan el mapa definen la dirección norte real y convergen hacia los polos, mientras que las líneas "verticales" de la cuadrícula son paralelas y definen la dirección del llamado *norte de cuadrícula*.

Lo anterior quiere decir que entre ambos sistemas de coordenadas, el geográfico y el rectangular, existe una relación angular que depende de la posición geográfica, tal que para un punto dado existe un ángulo llamado ángulo de convergencia entre el meridiano que pasa por el punto y la correspondiente línea de cuadrícula vertical, véase figura 26, ángulo c.

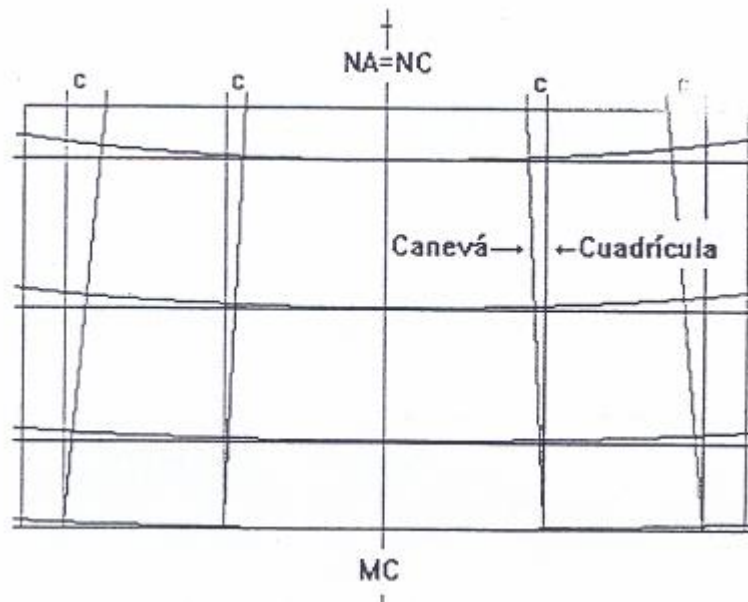


Figura 26. Ángulo de convergencia

Como puede verse en la figura, la magnitud del ángulo de convergencia es variable; desde el valor cero en el centro de cualquier zona UTM donde ambos nortes son coincidentes, con valores crecientes que llegan a un máximo en los límites de la misma. Para una latitud de  $30^\circ$ , por ejemplo, este máximo vale  $1.5^\circ$ .

En el mapa topográfico del INEGI-DGG a la escala de 1: 50,000, el valor de la convergencia se indica en la leyenda, junto a lo que se denomina el *diagrama de convergencia*, o *diagrama de declinación*, o bien *diagrama de declinación y convergencia*, el cual tiene el aspecto mostrado en la figura 27.

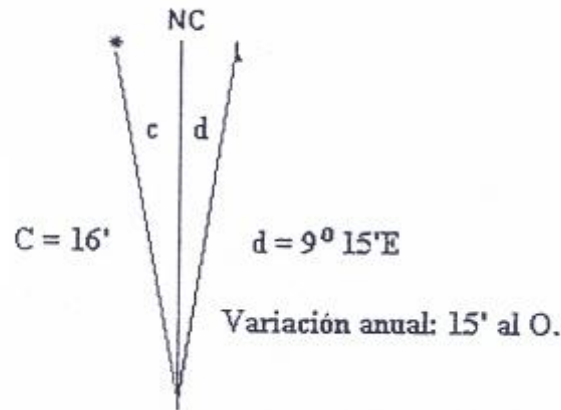


Figura 27. Diagrama de convergencia o declinación

La línea rematada por una estrella representa la dirección del norte verdadero; la línea vertical rotulada con "NC" representa en este caso la dirección del norte de cuadrícula y la línea con una flecha indica la dirección del norte magnético. **C** es la convergencia de cuadrícula y **d** es el ángulo de declinación magnética. Junto a diagrama se indican los valores de **c** y **d**, determinados para el centro de la hoja. Obsérvese que el norte real puede quedar a la izquierda o la derecha del norte de cuadrícula., dependiendo de la posición con respecto al meridiano central de la zona UTM y por lo tanto, la convergencia puede ser positiva o negativa; positiva si se está al este del meridiano central, y negativa en caso contrario.

El valor del ángulo de convergencia para un punto dado se calcula con la siguiente expresión:

$$C = \Delta\lambda \operatorname{sen} \varphi$$

En donde  $\Delta\lambda$  es la diferencia en longitud geográfica que existe entre el punto considerado y el meridiano central que le corresponde, es decir,

$$\Delta\lambda = \lambda_o - \lambda_p,$$

y  $\varphi$  es la latitud del punto.

Ejemplo: para un punto en México con una latitud de  $22^\circ$  y longitud de  $103^\circ$ , se tiene que

$$\varphi = 22^\circ$$

Para determinar  $\Delta\lambda$  se puede emplear la siguiente expresión:

$$\Delta\lambda = 177 - 6n - \lambda_p$$

en donde **n** es un número entero que se encontrará como se indica a continuación. En este



caso,

$$\Delta\lambda = 177 - 6n - 103$$

$$\Delta\lambda = 74 - 6n$$

Ahora, búsqese un valor de  $n$  tal que multiplicado por 6, dé un resultado muy próximo a 74. En este caso,  $n = 12$  satisface este requisito, ya que  $6 \times 12 = 72$ ; entonces,

$$\Delta\lambda = 74 - 72 = + 2^\circ ;$$

Por lo tanto, la convergencia vale

$$C = 2\text{sen}22^\circ = 2 \times 0.375 = 0.75^\circ = 45'$$

El signo positivo indica que el punto se encuentra al este del meridiano central.

Si se conoce el número de zona UTM, se puede encontrar  $\Delta\lambda$  aplicando lo siguiente:

$$\Delta\lambda = 183 - 6N - \lambda_p$$

En donde  $N$  es el número de zona. Para la longitud del punto resulta que  $N = 13$ ; luego,

$$\Delta\lambda = 183 - 6 \times 13 - 103$$

$$\Delta\lambda = 183 - 78 - 103$$

$$\Delta\lambda = 183 - 181$$

$$\Delta\lambda = + 2^\circ$$

Nota:  $N = 13$  corresponde a un meridiano central de  $105^\circ$

La corrección a la dirección de cuadrícula se aplica sumando o restando el valor de la convergencia según el signo dado por la diferencia en longitud calculada.

El meridiano central tiene una longitud  $\lambda_0$  determinada por

$$\lambda_0 = 183 - 6N$$

Para  $N = 13$ , se tiene entonces que

$$\lambda_0 = 183 - 6 \times 13 = 183 - 78$$

$$\lambda_0 = 105^\circ$$

Ahora se verá el caso de la conversión a dirección magnética.

En tanto el Polo Norte terrestre es una entidad geométrica relativamente fija, el Polo Norte magnético es una entidad física variable, no coincidente con la primera. Debido a esto, las respectivas direcciones son diferentes y por lo tanto existe un ángulo entre ambas, al cual se le conoce como declinación magnética, véase figura 28.

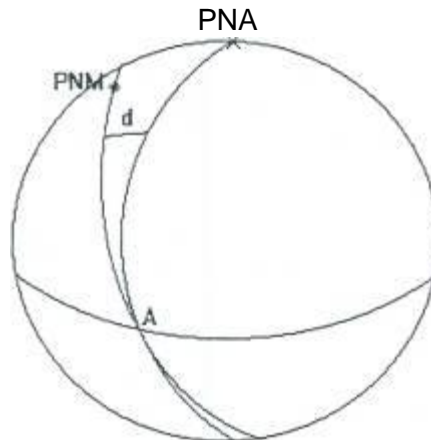


Figura 28. Declinación magnética

En consecuencia, se define a la declinación magnética en un punto dado como el ángulo que existe entre la dirección norte magnética y la correspondiente dirección norte astronómica. La declinación es variable con el tiempo, debido a que la posición del Polo Norte Magnético está cambiando continuamente, por razones no del todo conocidas. Se reconocen tres tipos de variaciones:

- a) Variaciones seculares; medidas en períodos largos, del orden de siglos,
- b) Variaciones anuales, computables de año en año, y
- c) Variaciones diurnas, que corren de día en día.

Desde el punto de vista cartográfico interesan las variaciones anuales, que se determinan con el objeto de conocer los valores de la declinación en un momento dado, con referencia a una cierta fecha. A tal efecto, algunas organizaciones científicas, nacionales e internacionales realizan con una periodicidad de 5 ó 10 años medidas tendientes a determinar los parámetros geomagnéticos de intensidad del campo, declinación e inclinación. Conocidos los valores de declinación, es posible elaborar una *carta de isogonas*.

Una carta de isogonas representa, sobre una base cartográfica, un conjunto de isogonas, o líneas de igual declinación magnética (ver figura 29). Junto a éstas suele también representarse un segundo conjunto de curvas de igual variación anual a las que se denomina *isoporras*, agregando a la información en la carta la fecha (o época) para la cual los valores indicados empiezan a tener vigencia. De ahí en adelante hay que corregirlos por variación anual.

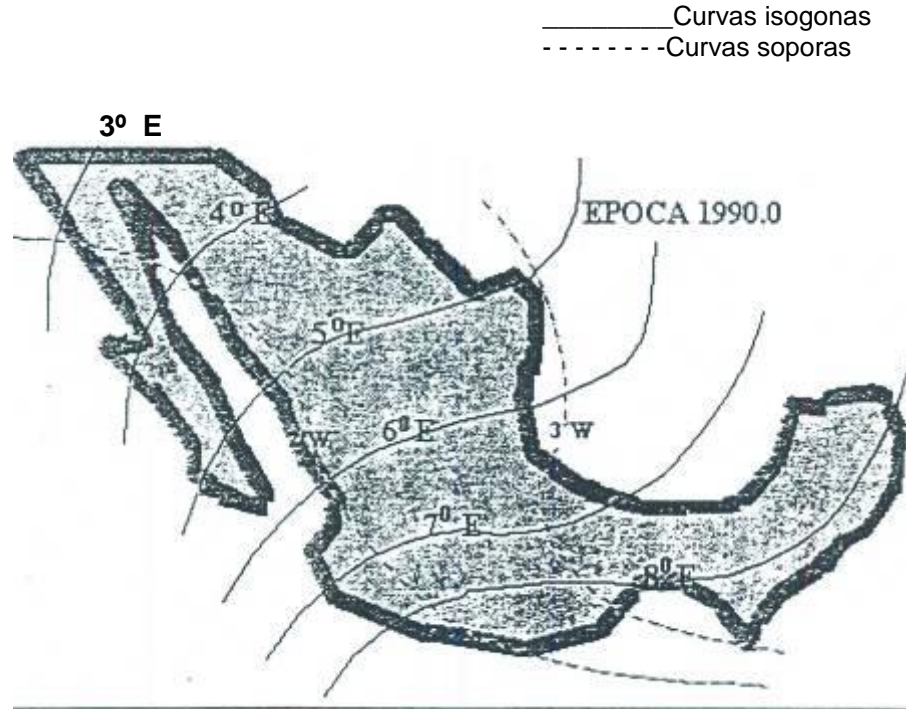


Figura 29. Carta de isogonas (hipotética)

Nota: La figura es puramente hipotética; el estudiante no debe interpretarla como una realidad, ya que es solamente un ejemplo ilustrativo.

Esta carta forma parte de los elementos de trabajo empleados en la etapa de edición, en la que se determinan los valores de declinación y variación anual que aparecen en cada mapa, como es el caso del diagrama de la figura 27. Dichos valores se obtienen de la carta isogónica interpelando linealmente entre las curvas que correspondan según la posición geográfica del mapa que se está editando.

En el caso de México, las curvas isogónicas indican valores de declinación hacia el Este, la variación anual es hacia el oeste y la época es 1990.0 (las cero horas del 1 de enero de 1990).

Para encontrar la dirección magnética es necesario determinar el valor de la corrección a la dirección astronómica o sea la declinación en la época actual. Hay que recordar que el valor de la declinación indicada en el mapa está referido a la época 1990.0, por lo que hay que corregirlo por la variación total acumulada entre el 1 de enero de 1990 y la fecha de interés, teniendo en cuenta el valor de la variación anual. Se ilustrará esto con un ejemplo.

Tómense los valores indicados en el diagrama de la figura 27; esto es, una declinación de  $9^{\circ}$  con  $15'$  al Este y una variación anual de  $15'$  al oeste. Supóngase que ya se conoce una dirección astronómica de  $28^{\circ} 46' 34''$ , obtenida por la determinación de una dirección de cuadrícula corregida por convergencia. Asísumase que se desea obtener la dirección magnética para la fecha 5 de noviembre de 1996.



1. Calcúlese el lapso de tiempo transcurrido entre el 1 de enero de 1990 Y el 5 de noviembre de 1996.

La fecha actual en años es 1996.85

El tiempo transcurrido es  $1996.85 - 1990.0 = 6.85$  años;

2. Calcúlese la variación magnética total:

$6.85 \times 15 = 102.75$  minutos de arco =  $1^\circ 42' 45''$  al oeste

3. Corríjase la declinación inicial:

$$9^\circ 15' 00''$$

$$1^\circ 42' 45''$$

declinación al 5/11/96:

$$7^\circ 32' 15'' \text{ al Este;}$$

4. Aplíquese este valor a la dirección astronómica. Puesto que la declinación es hacia el Este, hay que restada de la dirección astronómica:

$$28^\circ 46' 34''$$

$$07^\circ 32' 15''$$

Dirección magnética actual:

$$21^\circ 14' 19''$$

Para efectos prácticos, el valor anterior se puede redondear a  $21^\circ 14'$  (al minuto, que es la precisión de interpolación en la carta isogónica, por lo que los segundos de arco ya no tienen significado práctico).

### **ÁREAS POR COORDENADAS**

El área de una porción de terreno se puede obtener empleando las coordenadas UTM de los puntos esquineros. Basta para ello obtener las coordenadas en el mapa y aplicar la siguiente rutina de cálculo:

- 1) Se hace un listado ordenado de las coordenadas, repitiendo al final el primer par. Este primer par puede ser cualquiera, pero el orden del listado debe ser secuencial, en cualquier dirección que se siga. Por ejemplo véase la figura 30 para un polígono de cinco lados.

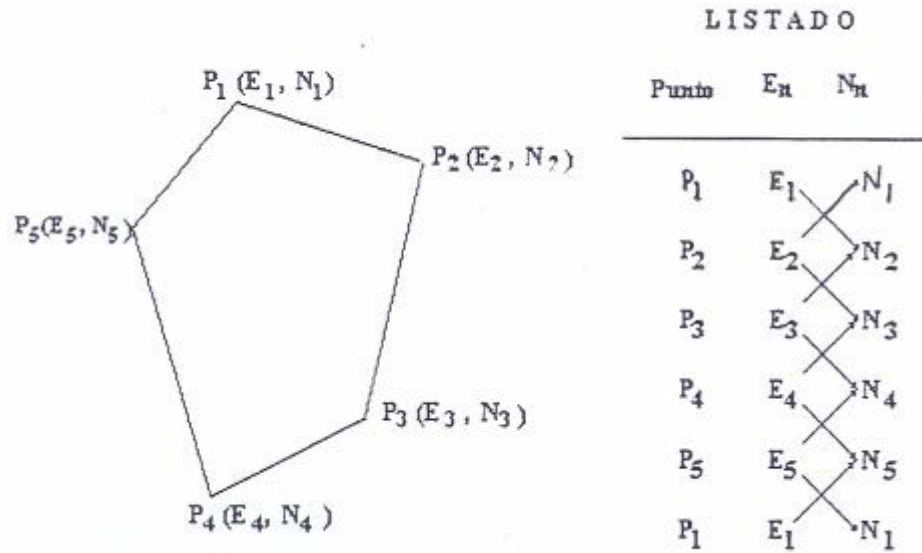


Figura 30. Esquema para el cálculo de áreas

- Se calculan los productos en el sentido indicado por las flechas, de arriba hacia abajo y se suman los resultados; es decir, se hace:

$$E_1N_2 + E_2N_3 + E_3N_4 + E_4N_5 + E_5N_1$$

- Luego se repite la operación, pero ahora multiplicando de abajo hacia arriba nuevamente en el sentido mostrado por las flechas:

$$E_1N_5 + E_5N_4 + E_4N_3 + E_3N_2 + E_2N_1$$

- Tómese la diferencia en valor absoluto de los resultados obtenidos en los pasos 2 y 3 y divídase por 2. El valor que resulte es el área buscada.

Ejemplo; supóngase que las coordenadas (cualesquiera no necesariamente UTM) son:

$$P_1(30,55), P_2(60,50), P_3(50,25), P_4(15,05), P_5(10,30)$$

Paso 1:

P <sub>1</sub>	30	55
P <sub>2</sub>	60	50
P <sub>3</sub>	50	25
P <sub>4</sub>	15	05
P <sub>5</sub>	10	30
P <sub>1</sub>	30	55

Paso 2:

$$30 \times 50 + 60 \times 25 + 50 \times 5 + 15 \times 30 + 10 \times 55 = 4250$$

Paso 3:

$$30 \times 30 + 10 \times 5 + 15 \times 25 + 50 \times 50 + 60 \times 55 = 7125$$

Paso 4:

$$\frac{|4250 - 7125|}{2} = 1437.5$$

Por lo tanto, el área es:

$$A = 1437.5 \text{ unidades}^2$$

En la práctica, con el uso de las coordenadas UTM se tiene el inconveniente de tener que operar con números muy grandes. Para esto, se pueden reducir las coordenadas a un valor mínimo si a todas ellas se les resta la menor. Con esto, las operaciones numéricas se hacen con números más pequeños. En el ejemplo anterior los menores valores en E y N son 10 y 5 respectivamente; con lo que el nuevo listado quedaría en la forma siguiente:

Paso 1:

P <sub>1</sub>	20	50
P <sub>2</sub>	50	45
P <sub>3</sub>	40	20
P <sub>4</sub>	05	00
P <sub>5</sub>	00	25
P <sub>1</sub>	20	50

Paso 2:  $20 \times 45 + 50 \times 20 + 40 \times 00 + 05 \times 25 + 00 \times 50 = 2025$

Paso 3:  $20 \times 25 + 00 \times 00 + 05 \times 20 + 40 \times 45 + 50 \times 50 = 4900$

Paso 4:  $ABS(2025 - 4900)/2 = 1437.5 \text{ unidades}^2 = \text{Área}$

En todo caso, se recomienda el uso de una calculadora de bolsillo con capacidad para almacenar números grandes. Si se tienen que calcular muchas áreas, como por ejemplo en cartas catastrales o de predios, conviene organizar el trabajo y automatizarlo de alguna manera; las coordenadas pueden ser determinadas por digitalización y los cálculos se efectúan en una computadora, con un programa que como puede verse en la rutina anterior, es fácil de elaborar. De hecho, existen ya muchos paquetes de software para aplicaciones cartográficas que ya tienen incorporadas las rutinas de cálculo de áreas, con lo que la operación se hace muy fácil, con la ventaja de que se pueden determinar áreas de contornos muy irregulares. Esto último es posible debido a que dichas áreas se pueden asimilar a polígonos cerrados con un número grande de lados que las computadoras modernas no tienen mayor dificultad para manejar.

Una nota de advertencia: las áreas calculadas con este método son áreas planas, obtenidas de valores de coordenadas cuadrículares en la Proyección Universal Transversa de Mercator, por lo que están afectadas por las deformaciones propias de la proyección. Esto quiere decir que no son las áreas sobre la superficie elipsoidal terrestre. Sin embargo, las diferencias se deben juzgar desde el punto de vista práctico y del propósito para el cual se calculan estas áreas. En la mayoría de las aplicaciones estas diferencias son ignoradas.



Existen otras opciones para la determinación de áreas: uso de cuadrículas finas, cálculos geométricos, planímetros de diversos tipos e inclusive por peso. Dichas opciones pueden ser utilizadas dependiendo del usuario y sus necesidades. El método descrito aquí es uno de los más precisos.

### CLAVES CARTOGRÁFICAS

Ya que se ha estado hablando de sistemas de coordenadas para efectos de ubicación geográfica, conviene discutir la clave de las cartas del INEGI-DGG a fin de explicar su significado y destacar su característica identificatoria de localización espacial.

Cada carta en las escalas de 1:20,000, 1:50,000 y 1:250,000 se identifica con una clave única que la ubica geográficamente sobre la superficie terrestre.

En el caso de la carta en la escala de 1:50,000, se tiene una clave alfanumérica integrada por cuatro elementos, como por ejemplo, F-14-B-47.

El primer término alfabético (F) identifica una faja de latitud geográfica de 4 grados de ancho, con los términos A, B, C,....F,..... referidos al Ecuador:

FAJA	RANGO EN LATITUD		
A	00	a	04
B	04	a	08
C	08	a	12
O	12	a	16
E	16	a	20
F	20	a	24
G	24	a	28
H	28	a	32
I	32	a	36
J	36	a	40

De esta manera, la carta en cuestión está ubicada entre los paralelos de 20° y 24°

El segundo término de la clave (14) identifica la zona UTM.

Para encontrar el rango de longitud geográfica correspondiente, resuélvase la siguiente expresión:

$$\text{Límites} = (183 - 6N) \pm 3$$

De modo que si  $N = 14$ , se tiene:

$$\text{Límites} = (183 - 6 \times 14) \pm 3 = (183 - 84) \pm 3 = 99 \pm 3 ,$$

Lo que da:

$$\begin{aligned} 99^\circ + 3^\circ &= 102^\circ \\ 99^\circ - 3^\circ &= 96^\circ \end{aligned}$$

por lo que la carta está ubicada entre los meridianos de  $96^\circ$  y  $102^\circ$  (recordar que es al oeste de Greenwich).

Los dos términos anteriormente indicados definen un cuadrante básico sobre la superficie de la Tierra dentro de los límites de coordenadas geográficas encontradas, como se muestra en la figura 31 a continuación.

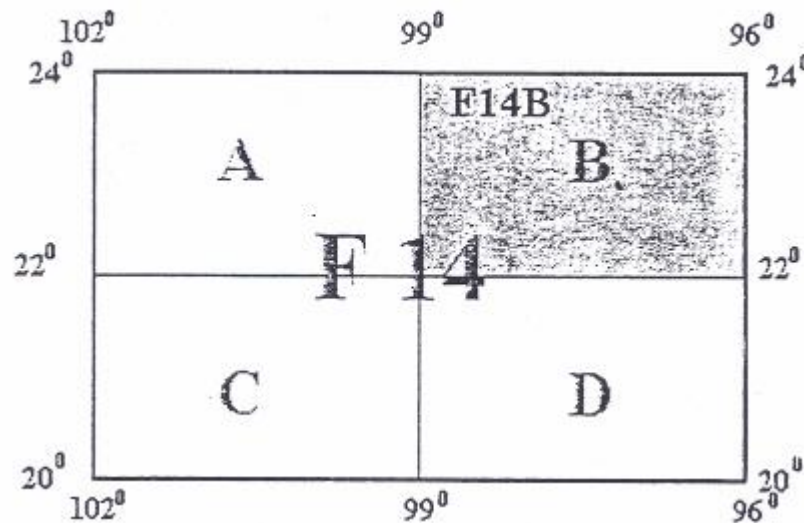


Figura 31. Cuadrante básico F14

Si este cuadrante se divide en cuatro partes iguales y éstas se designan como A, B, C y D, en la forma indicada en la figura, se tiene el significado del tercer término de la clave (B). En este cuadrante, los límites geográficos son ahora:

En latitud, de  $22^\circ$  a  $24^\circ$

En longitud, de  $96^\circ$  a  $99^\circ$

Para explicar el cuarto término de la clave, tómese el subcuadrante (B) y divídase verticalmente en 8 fajas y horizontalmente en 9 columnas, numerándolas sucesivamente de arriba a abajo y de izquierda a derecha, respectivamente, como se muestra en la figura 32 de la siguiente página.

De acuerdo con el último término de la clave, la carta del ejemplo está ubicada en la cuarta columna y en la séptima columna (cuatro, siete y no cuarenta y siete).

Como hay 2 grados de extensión en latitud, cada carta cubre un rango de  $120/8 = 15$  minutos de arco y con esto es fácil ver que estará comprendida entre los  $23^\circ 00'$  Y  $23^\circ 15'$  de latitud norte. Del mismo modo, en longitud se tendrá un cubrimiento de  $180/9 = 20$  minutos de arco, con lo que los límites en esta coordenada están comprendidos entre  $96^\circ 40'$  Y  $97^\circ 00'$ .

Con esto, puede verse que la clave define en forma única cada carta escala 1:50,000 en un formato de 20 x 15 minutos de arco.

En el caso de fotomapas a la escala de 1:20,000 que se están produciendo actualmente, se tendrá una clave con un carácter adicional, indicativo del número de divisiones correspondientes a la carta 1:50,000, dividida para estos efectos en 6 partes iguales, como se nota en la figura 33, con un formato de 6' 40" en longitud, por 7' 30" en latitud. Las divisiones se designan con las letras de la A a la F. En este caso se tiene el fotomapa F14B47-E.

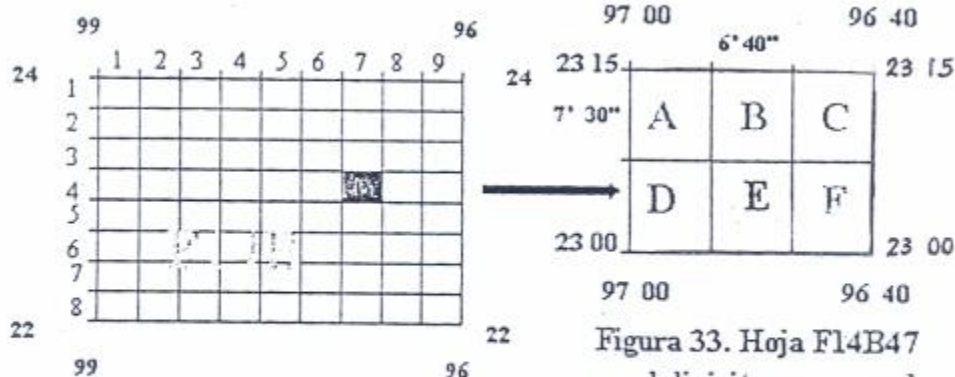


Figura 32. Divisiones del subcuadrante básico

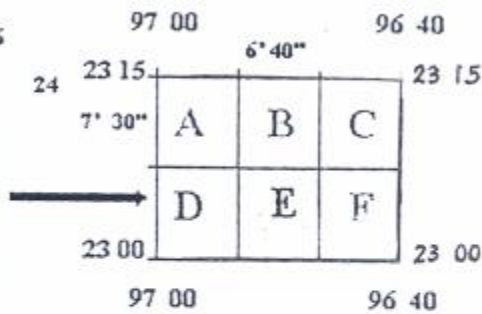


Figura 33. Hoja F14B47 y subdivisión para escala 1: 20,000 de fotomapas. Clave F14B47-E

Para cartas en la escala de 1:250,000, se conserva el cuadrante básico, pero ahora se le divide en 12 partes iguales que se numeran como se indica en la figura 34, en donde se tiene entonces una clave de tres términos en cartas con un formato de 2 por 1 grados. Los dos primeros términos tienen el mismo significado anterior, mientras que el tercero corresponde a la numeración en la subdivisión del cuadrante básico. Nótese que una carta en la escala de 1:250,000 está integrada por el cubrimiento de 24 cartas en la escala de 1:50,000 y por lo tanto representa un área de aproximadamente 24,000 km<sup>2</sup>.

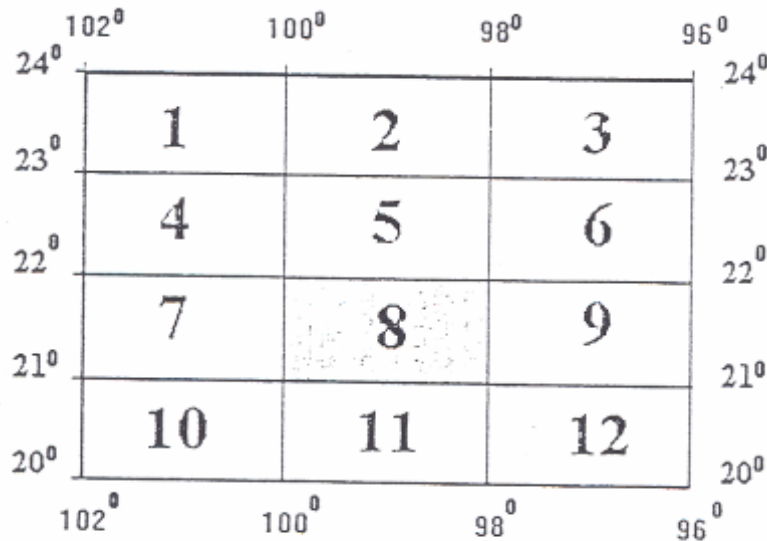


Figura 34. Sistema para la clave 1: 250,000 Carta F14-8



## SISTEMAS DE REFERENCIA GEOGRÁFICA

Como parte del conocimiento que se supone debe tener todo cartógrafo, se introducen ahora algunas notas sobre los conceptos elementales relacionados con los sistemas de referencia geográficos en que se apoya la producción cartográfica.

### CONCEPTOS SOBRE DÁTUM

Al discutir el tema de coordenadas geográficas se habló de términos tales como latitud y longitud y que cada mapa y punto que se encuentre contenido en él está referido a dicho sistema, cuyo origen está en el Ecuador y el Meridiano de Greenwich. Pero, ¿dónde están físicamente el Ecuador y dicho Meridiano? De este último solamente se conoce un punto al cual arbitrariamente se le definió como el meridiano cero, y eso es todo lo que se sabe. No hay líneas trazadas sobre la superficie de la Tierra que definan meridianos y paralelos y en los que se puedan apoyar los levantamientos geodésicos y topográficos necesarios para cartografía. El problema estriba entonces en disponer de un punto inicial, o Dátum de coordenadas conocidas, del cual se pueda partir, así como una línea de dirección también conocida. Es lo mismo que tradicionalmente se necesita en cualquier levantamiento topográfico, con la diferencia de que en éste las coordenadas pueden ser arbitrariamente establecidas y en el sistema geográfico deben ser bastante absolutas y de aplicación a escala mundial. Esto conduce al concepto de Dátum Horizontal.

### Dátum horizontal; el NAD27 y el ITRF92

Por lo que se dijo en el párrafo anterior, dátum quiere decir "dato" u "origen" de un sistema de medición, punto de partida: Cuando se sintieron las necesidades geodésicas y e arto gráficas en los Estados Unidos de Norteamérica, se llevaron al cabo una serie de determinaciones astronómicas de alta precisión sobre la latitud, longitud y acimut en un punto situado en el centro geográfico aproximado del territorio norteamericano. Esto es en el estado de Kansas, en un sitio llamado Meades Ranch y durante mucho tiempo ha .sido el origen de las coordenadas geográficas de la mayor parte del continente americano.

Desde este punto, designado como *Dátum Norteamericano de 1927* se generó la red de apoyo geodésico primario mediante triangulaciones y levantamientos geodésicos en general que se extendieron en todas direcciones, por el norte hasta Alaska, pasando por Canadá, y *por* el sur internándose en México, América Central y las Antillas, conformando así un sistema único en el que se apoyó la cartografía de todas estas áreas geográficas.

De este modo, el dátum horizontal de referencia, hasta hace poco, ha sido el Dátum Norteamericano de 1927, abreviado NAD27. Es el dátum al cual se encuentra ligada toda la cartografía nacional producida por el INEGI-DGG en lo que respecta a valores de latitud, longitud y acimut. Esto está cambiando, como se verá más adelante.

Para generalizar, existen y pueden existir otros data como resultado de determinaciones, astronómicas precisas, en los que las coordenadas astronómicas obtenidas se hacen iguales arbitrariamente a las coordenadas geodésicas (por ejemplo, en Venezuela se desarrolló el llamado Dátum de las Canoas). Sucede sin embargo, que si se trata de ligar un dátum con otro, no será posible sin tener en consideración ciertos efectos físicos dinámicos, y de hecho se llegará al cierre



con un error no atribuible a causas instrumentales, errores de medición o circunstancias ambientales.

Con el pasar del tiempo se llegó a percibir que el desarrollo de los levantamientos con base en el NAD27 estaban acusando ciertas inconsistencias y distorsiones aleatorias no explicadas y que la extensión de los mismos señalaba la presencia de errores y deterioro de la precisión esperada, en lo que se señalaron causas tales como el efecto acumulativo de los errores con la distancia, densidad no uniforme de los cubrimientos, las inconsistencias generadas por la aplicación de instrumentos, metodologías y normas no uniformes en los levantamientos o la no rígida aplicación de las mismas, el hecho de que el sistema de referencia estaba definido geoméricamente, era solamente bidimensional y no consideraba los efectos dinámicos, además de la presencia de defectos en la aplicación de correcciones a las observaciones, y otras causas. Todo esto dio lugar a una redefinición del NAD27, materializada en lo que ahora se conoce como NAD83, nuevo dátum que ya se está aplicando en los Estados Unidos y Canadá y algunos otros países.

El NAD83 es el resultado de un masivo esfuerzo por reducir las inconsistencias del NAD27 a través de un reajuste o compensación matemática de todos los datos disponibles levantados a lo largo del tiempo: No se pretende aquí abundar en los detalles de tal trabajo y solamente se menciona para seguir la secuencia e introducir el concepto del nuevo sistema de referencia que se está empleando ya en el INEGI-DGG.

En el caso de México, no se está aplicando el NAD83. Las razones de esto estriban en que el dátum continúa definido en forma puramente geométrica bidimensional y que en el proceso de generación y aplicación del reajuste no se tomaron mayormente en cuenta los datos mexicanos, por lo que los parámetros de transformación tienen más bien un carácter extrapolatorio en el que no se puede confiar, ya que así persisten las distorsiones inherentes al NAD27. Hay que considerar por otra parte, que las necesidades de información muy precisa son ahora más demandantes que en épocas anteriores, por lo que los sistemas de referencia geográfica deben ser correspondientemente muy confiables.

Con el advenimiento de los sistemas satelitales para posicionamiento geodésico se entró de lleno en el campo de la geodesia física, pues éstos han hecho posible definir los sistemas de referencia en una forma dinámica y universal, con la tendencia a tener un sólo sistema a nivel mundial. De este modo, la definición del sistema de referencia se hace más generalizada y universal. Por otra parte, los sistemas de medición tradicionales están siendo sustituidos por otros apoyados en la recepción de señales de satélite, en particular la instrumentación asociada al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), cuya precisión permite la determinación de posiciones absolutas con errores de unos cuantos centímetros.

Sobre estas consideraciones, el INEGI-DGG ha tomado la decisión de adoptar un nuevo sistema de referencia, el denominado ITRF92 (International Earth Rotation Service Terrestrial Reference Frame 01 1992), época 1988.0. El sistema es global, tridimensional, dinámicamente definido y de muy alta precisión, tiene su origen en los estudios y trabajos del IERS (International Earth Rotation Service), con base en la combinación de varias soluciones globales tridimensionales y se propuso como patrón al cual referir todos los trabajos geodésicos. Este sistema ha dado lugar a la creación de la nueva red geodésica nacional, denominada Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), constituida por 14 estaciones fijas distribuidas en todo el territorio nacional, equipadas con instrumental GPS y las cuales están constantemente monitoreando el paso de los satélites de la constelación GPS-Navstar y además constituyen la



base de apoyo para los levantamientos geodésicos GPS que se efectúan en el ámbito del territorio nacional.

Conforme a estos criterios, hay un cambio en el concepto de datum, que en esta forma dejar de ser un punto, para definirse en términos de una especificación relativa al marco de referencia y a la definición del conjunto de coordenadas tridimensionales pertenecientes a puntos físicamente establecidos en el terreno.

El hecho de que el nuevo marco de referencia se asocie a una determinada época se debe a que habiendo sido definido dinámicamente, está cambiando constantemente en respuesta a diversos efectos geofísicos; las estaciones de la RGNA monitorean estos cambios, los que por otra parte son relativamente pequeños para tener mayores efectos en la cartografía.

Sin embargo, el cambio de sistema de referencia sí tiene implicaciones cartográficas, pues un punto cualquiera que anteriormente tenía ciertas coordenadas en el NAD27, ahora las tendrá un tanto diferentes en el nuevo sistema. De hecho, estas diferencias son tales que en términos de coordenadas UTM se tienen diferencias de hasta unos 60 metros en la dirección este-oeste y de alrededor de unos 200 metros en la dirección norte-sur. Lo que se está haciendo al momento es señalar en las cartas el valor de las correcciones aplicables a las coordenadas geográficas y mostrar en las mismas una doble cuadrícula UTM, una para el NAD27 y otra para el ITRF92. Esto se hará durante algún tiempo, hasta que se abandone en definitiva el NAD27.

Las correcciones anteriormente mencionadas son el resultado de un algoritmo de transformación desarrollado en el propio INEGI mediante la comparación de coordenadas geográficas en el-NAD27 para unos 300 puntos distribuidos en todo el país, sobre los cuales se hicieron medidas GPS. Este algoritmo se está empleando en todas las transformaciones cartográficas y además está a disposición del público usuario.

### **CONCEPTOS SOBRE ELIPSOIDE Y GEOIDE**

Las ideas y conceptos relacionados con los sistemas de referencia anteriormente tratados, están estrechamente vinculados con el conocimiento sobre la forma terrestre, la cual ha venido evolucionando con el tiempo, desde el concepto de Tierra plana, hasta la forma geoidal, pasando por la esfera y el elipsoide de revolución.

A pesar de que las ideas iniciales son conceptualmente erróneas, siguen teniendo vigencia en cuanto a sus aplicaciones prácticas. Así por ejemplo, para el topógrafo interesado en levantamientos a gran escala, donde no tiene que hacer consideraciones sobre curvatura terrestre, la Tierra es prácticamente plana. Para el astrónomo práctico basta y sobra la consideración de una Tierra esférica, sin tener que ocuparse de desviaciones con respecto a esta forma ideal.

A través de la medición de grandes sistemas de triangulación para determinar la extensión y curvatura de meridianos de longitud, se descubrió que la curvatura no es uniforme, como debía ser en el caso de una Tierra esférica, sino que se encontró que un grado de latitud cerca del Ecuador es más corto que un grado de latitud cerca del Polo. Esto es posible solamente si la Tierra no es esférica sino elipsoidal, achatada en los polos, con el eje ecuatorial mayor que el eje polar, ver figura 35, de modo que  $a > b$ . En dicha figura, que es una elipse, el contorno representa un meridiano cualquiera. Si a modo de un trompo, se la hace girar alrededor del eje menor, se obtiene



el sólido de revolución que en la terminología del medio se designa como elipsoide, que es en la actualidad la aproximación geométrica adoptada como forma de la Tierra.

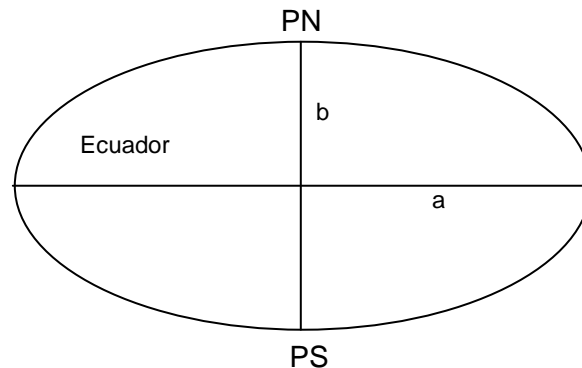


Figura 35. Sección elipsoidal

Lo anterior es extremadamente importante, por cuanto constituye un concepto puramente geométrico, una superficie de referencia sobre la cual está el sistema de coordenadas geográficas que se conoce y a la cual se llevan todas las medidas y levantamientos que se hacen sobre la superficie terrestre real, o superficie topográfica.

Un elipsoide se define normalmente por la longitud de los semiejes mayor o menor  $a$  y  $b$ . A través del tiempo, se han realizado diversas investigaciones en diferentes lugares del globo terrestre, las que invariablemente han conducido a la determinación de ambos parámetros, con resultados que difieren entre sí en cantidades relativamente pequeñas, pero no despreciables.

Cada pareja de valores encontrados para los semiejes ha dado lugar a la definición de un elipsoide particular, designado en la mayoría de las ocasiones con el nombre del investigador principal envuelto en su determinación. De este modo, se habla de elipsoides tales como los siguientes:

Bessel,  
Clarke 1866,  
Clarke 1880  
Everest,  
Hayford,  
Airy,  
Krassovsky,  
Hough,  
Internacional,  
Etc., etc.

A estos elipsoides se pueden agregar otros determinados más o menos recientemente, a base de sistemas geodésicos dinámicos, ya sea terrestres o satelitales.

### **DÁTUM HORIZONTAL; EL NAD27 Y EL ITRF92**

En el Continente Americano y por lo que respecta a México en lo particular, se ha venido usando el Elipsoide de Clarke de 1866, asociado al NAD27, cuyos parámetros son:

$$a = 6378,206,4 \text{ m}$$

$$b = 6356,583.8 \text{ m}$$

con lo que puede verse que la diferencia entre los semiejes es de 21.6 km.

Otra forma de especificar un elipsoide es mediante el valor de **a** y de una cantidad a la cual se le llama *Relación de Achatamiento* o Aplastamiento, definida por la siguiente expresión:

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

Esta relación es una medida del grado de desviación con respecto a la forma esférica. Si por ejemplo, se tuviera una esfera, resulta que  $a = b$ , por lo que  $a - b = 0$ , lo que indica que no hay achatamiento. Si se tuviera  $a = 2b$  se tendría que  $f = 0.5$ , con lo que se tendría un achatamiento en la relación de 1 a 2.

En el caso del Elipsoide de Clarke de 1866 resulta que  $f = 1/295$ , lo que es una relación bastante baja (0.34%), la cual es difícil de notar; en una esfera de 1 metro de diámetro esta diferencia es de apenas 3.4 mm. La forma, sin ser perfectamente esférica, lo es muy aproximadamente, por lo que al elipsoide también se le llama esferoide.

El Elipsoide de Clarke de 1866 fue adoptado en nuestro medio, debido a que se juzgó que en el ámbito de aplicación se ajusta bien al geode. Geode, como término, significa "*forma de la Tierra*" y en este sentido se dice que la Tierra tiene la forma de un geode, lo que a pesar de lo redundante de la expresión, conduce a la idea de que la Tierra tiene una forma muy propia. La figura geoidal, con ser en primera aproximación la de un elipsoide de revolución, presenta irregularidades y ondulaciones que la hacen apartarse en mayor o menor grado de dicha forma, véase la figura 36.

En el caso del elipsoide, una expresión analítica que permite su manejo en términos de coordenadas cartesianas es:

$$b^2(X^2 + Y^2) + a^2Z^2 = a^2b^2$$

La anterior es una expresión que puede manejarse con relativa facilidad.

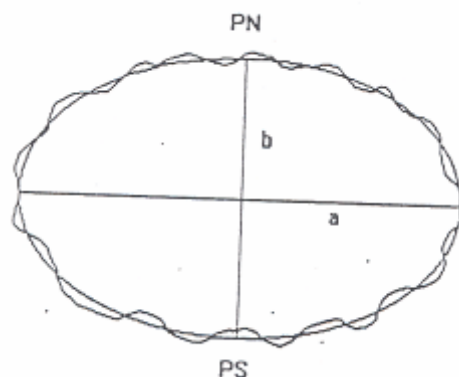


Figura 36. Elipsoide y geode



Para el Geoide no existe una fórmula semejante y ni siquiera es práctico tratar de desarrollarla. En lugar de ello, se procura determinar las desviaciones de la superficie geoidal con respecto a la superficie elipsoidal de referencia, todo ello según los resultados de investigaciones geodésicas muy acuciosas. A dichas desviaciones ( $N$ ) en la figura 37, definidas como la separación vertical entre geoide y elipsoide se les llama "ondulaciones del geoide"

A diferencia del elipsoide, que responde a un concepto esencialmente geométrico, el geoide tiene una naturaleza puramente física, definida como la superficie equipotencial (de igual capacidad para hacer trabajo) al nivel medio del mar. Conceptualmente, el geoide está definido por las superficies medias marinas prolongadas por debajo de los continentes, en equilibrio hidrostático. Nótese el aspecto físico del concepto.

El mejor elipsoide será aquel para el que las ondulaciones geoidales sean mínimas, lo que hasta la fecha es sujeto de mucha investigación geodésica especializada, fundamentalmente en lo que se refiere al geoide. Al momento y en relación con el ITRF92 ya discutido, el elipsoide de referencia es el denominado GRS80 (Geodetic Reference System of 1980) cuyos parámetros elipsoidales son:

$$a = 6378137.0 \text{ m}$$

$$b = 6356752.3 \text{ m}$$

Considérese que en el momento de hacer una medida, el topógrafo o geodesta está trabajando sobre el geoide; al instalar y nivelar su instrumento, la línea de la plomada se orienta en la dirección de la vertical, la cual es en todo punto perpendicular al geoide. Al procesar sus observaciones, las proyecta al elipsoide y ocurre entonces que por falta de coincidencia o paralelismo entre ambas superficies, se produce un error que no puede reducirse si no se conoce el valor de  $N$  y el de la desviación de la vertical con respecto a la normal al elipsoide ( $d$  en la figura 37).

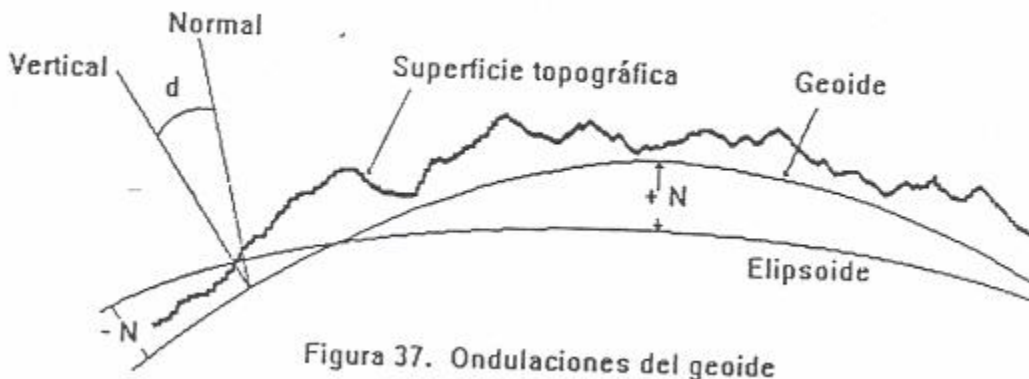


Figura 37. Ondulaciones del geoide

Hay que recordar que el NAD27 se concibió como un punto, el cual se asumió arbitrariamente que estaba sobre el geoide, coincidente con el elipsoide por lo que en dicho punto se hace  $N = 0$ , aunque sí hay desviación de la vertical.

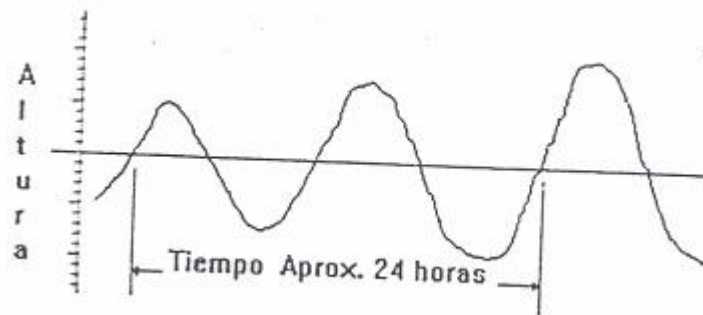


### **EL DÁTUM VERTICAL. NIVEL MEDIO DEL MAR.**

Así como en el plano horizontal se ha tenido un dátum para coordenadas y direcciones, para la medida de alturas o elevaciones se tiene un dátum vertical, pero ahora en un plano o nivel de referencia que para el caso de la mayoría de los sistemas cartográficos se define como el Nivel Medio del Mar.

Desde el punto de vista del método de obtención para satisfacer propósitos geodésicos, se define el Nivel Medio del Mar como el promedio aritmético de las alturas horarias de la marea, obtenido por el registro de un mareógrafo estándar a lo largo de un período de aproximadamente 19 años (período de Saros).

Nótese en primera instancia que se trata de un promedio aritmético; en segundo, los valores por promediar se obtienen mediante el registro continuo de una aparato llamado *mareógrafo estándar*, el cual es un graficador que registra las alturas de la marea, diseñado para tal efecto, de ahí lo de "estándar". Con este instrumento se obtiene un gráfico diario de dichas alturas al cual se le llama *mareograma* o *marigrama*, ver figura 38.



**Figura 38. Aspecto de un mareograma**

La tercera característica en la definición es el período necesario para obtener el valor requerido con una precisión que satisfaga propósitos de investigación geodésica. Esto se debe a que la marea es un fenómeno físico que obedece a las leyes de atracción universal de Newton y depende así de las posiciones relativas de la Tierra, el Sol y la Luna en un momento dado. La configuración indicada en la figura 39 produce una marea marina de una altura específica. Al día siguiente por ejemplo, las posiciones relativas ya no son las mismas, el efecto es distinto en magnitud y por lo tanto la altura de la marea en el mismo sitio será diferente.

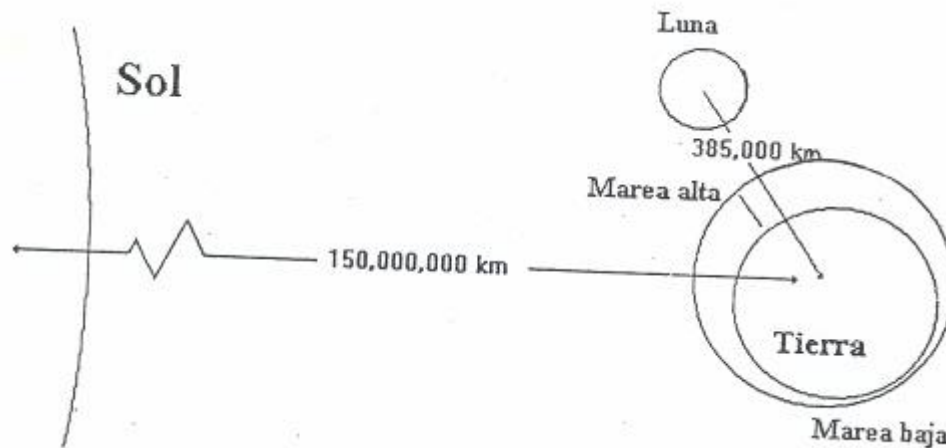


Figura 39. Esquema del fenómeno de las mareas

Con el pasar del tiempo se seguirán observando diferencias y resulta que es necesario que transcurran unos 19 años para que las posiciones relativas de los tres cuerpos celestes vuelvan a ser exactamente las mismas y produzcan el mismo efecto inicial. De este modo, y para una determinación precisa se habrán cubierto todas las variables posibles.

En la práctica y para propósitos cartográficos, no es necesario esperar tanto tiempo; determinaciones iniciales de unos seis meses serán suficientes para satisfacer la precisión cartográfica requerida.

Debe aclararse que el nivel medio del mar determinado por estaciones mareográficas a lo largo de las costas, no es el mismo en todos los sitios, debido en mucho a efectos dinámicos y de configuración marina, además de lo que en un lugar determinado puede ser la altura geoidal.

En las cartas marinas no se usa directamente el nivel medio del mar, sino otros niveles más relacionados con la navegación, tales como el nivel medio de mareas más altas para la definición de detalles costeros y canales de navegación seguros, y el nivel medio de mareas más bajas en relación con obstáculos a la navegación tales como naufragios, bajos, escollos y bancos de arena.

Finalmente, y como dato complementario, así como hay mareas marinas, también las hay terrestres, debido a que no siendo la Tierra un cuerpo rígido, también está sujeta a los efectos dinámicos de la atracción del Sol y la Luna, aún cuando las amplitudes de las mareas terrestres son mucho menores que las marinas.

Resumiendo todo este apartado, las cartas del INEGI-DGG han tenido como dátum horizontal el NAD27 en el Elipsoide de Clarke de 1866 y el dátum vertical ha sido el Nivel Medio del Mar. En la actualidad se está cambiando al ITRF92, época 1988.0, en el GRS80 y, se sigue empleando el Nivel Medio del Mar, aunque hay que recordar que el ITRF es un sistema de referencia tridimensional y por lo tanto abarca también la dimensión vertical.

## PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

Todo mapa está en un determinado sistema de proyección, que responde a la necesidad de representar en una forma sistemática la superficie terrestre, con sus detalles, sobre la superficie del mapa.

Para refrescar las ideas sobre *proyección*, considérese la figura 40 en la que O es un punto fijo en el espacio al que se llamará centro de proyección, y P es un plano fijo, también en el espacio.

Para un punto cualquiera A, si se traza una recta desde el centro de proyección que pase por dicho punto hasta que intersecte el plano, el punto A' es la proyección de A sobre el plano P, desde el punto O.

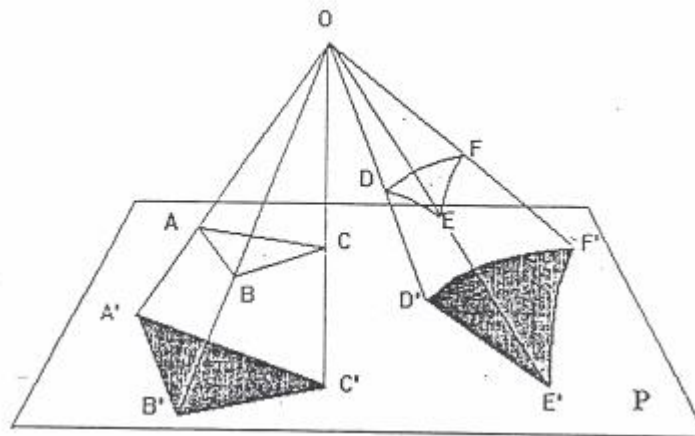


Figura 40. Idea simple de proyección

Lo mismo se puede hacer con el punto B y entonces B' es la proyección de B sobre P desde el punto O.

En el espacio, los puntos A y B definen una línea recta. Si los puntos proyectados A' y B' se unen, se tiene entonces que la línea A'B' es la proyección de la línea AB sobre el plano P, desde el punto O.

Con un razonamiento similar se puede tratar el punto C y resulta que la figura A'B'C' es la proyección de la figura ABC sobre P desde el punto O.

Con todo lo anterior, se tiene la idea sobre proyección de puntos, líneas rectas y áreas planas. Pero una línea curva como la DF también puede proyectarse y lo mismo se puede decir de cualquier superficie curva como la DEF, que en este ejemplo resulta proyectada en la figura D'E'F'. Aquí es donde se principia a visualizar la relación con la cartografía, en el sentido de que en la práctica la superficie curva es análoga a la superficie terrestre y P es el plano del mapa.

El centro de proyección puede ser cualquiera, estar en cualquier posición, así como el plano P, que puede tener cualquier posición y orientación.

Si se reflexiona un poco y se observa la proyección de DF, se puede reconocer que no necesariamente se reproduce fielmente. En efecto, y sólo para propósitos ilustrativos, la línea curva DE se podría proyectar como una recta, lo que indica que en el proceso de proyección se produjo una deformación. En cartografía, se desea que las representaciones sean fieles en cuanto a forma y dimensiones y resulta que ningún sistema es capaz de resolver este requisito con toda

fidelidad. De hecho, no existe ninguna proyección que pueda representar una superficie curva (la superficie terrestre) sobre una superficie plana (el mapa) sin que se produzcan deformaciones. Un ejemplo objetivo es el de una semicáscara de naranja. Si se trata de hacerla plana, por ejemplo aplastándola, no se puede hacer sin romperla, es decir, sin deformarla.

A lo largo del tiempo, los cartógrafos e investigadores han tratado de resolver este problema, con un éxito relativo, en el sentido de que las soluciones han permitido el desarrollo de una considerable variedad de proyecciones cuyas propiedades satisfacen determinados requisitos cartográficos, pero no todos, sin que haya sido posible hasta la fecha llegar a una solución absoluta. Este es uno de los grandes problemas de la cartografía.

### REQUISITOS DE LAS PROYECCIONES

En términos generales, se requiere de una proyección que se satisfaga los siguientes requisitos:

- a) Mantenimiento de la escala (equidistancia),
- b) Preservación de las áreas (equivalencia),
- c) Conservación de las formas (ortomorfismo)
- d) Exactitud en las direcciones.

Estas cualidades no pueden ser satisfechas simultáneamente, y así, toda proyección operativa es una solución de compromiso entre éstas. Su escogencia depende del propósito de uso de la proyección, según el tipo de mapa.

### Mantenimiento de la escala

Es imposible mantener una escala constante cuando se representa una superficie curva como la terrestre, sobre una superficie plana. Dependiendo del tipo de proyección, la escala puede ser constante en una cierta dirección, por ejemplo a lo largo de un meridiano, mientras que es variable en la otra, en la que la escala se deforma. Puede verse con claridad en la figura 41.

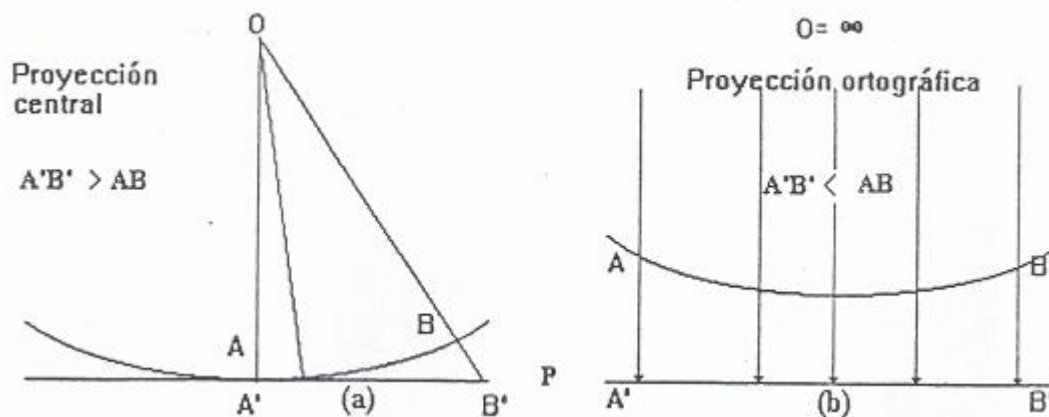


Figura 41. Deformaciones de escala en las proyecciones

En el caso de la figura 41a, se tiene una proyección central ( $O$  es un centro de proyección definido); para puntos cercanos a  $A$ , no es mucha la diferencia, mientras que a medida que se va



alejando del centro, la diferencia entre la longitud proyectada A'B' y la longitud real AB, se hace mayor.

Lo mismo ocurre en el caso de la proyección ortográfica de la figura 41b, en la que el centro de proyección está en el infinito y por lo tanto las líneas de proyección son paralelas, solamente que ahora la relación se invierte.

Respecto a la idea anterior, se define lo que se llama *factor de escala* de una proyección, el cual es una medida de la distorsión entre la escala nominal y la escala real en un punto cualquiera de la proyección. El factor de escala es variable en el espacio cubierto por la proyección y en la mayoría de los casos según la dirección en que se midan las distancias. De este modo, se define el factor de escala (FE) como:

$$FE = \frac{\text{Distancia medida en el mapa sobre la proyección}}{\text{Distancia real sobre la superficie terrestre a la escala nominal de publicación.}}$$

En la relación anterior, la escala nominal es la indicada para el mapa.

Lo ideal sería tener un factor de escala igual a la unidad en cualquier punto del mapa, pero, ya se ha visto que esto es imposible y que en la realidad se producen distorsiones en mayor o menor grado. En mapas a escalas pequeñas el efecto es más notorio y puede aceptarse en determinada proporción con el objeto de satisfacer ciertos requisitos cartográficos. Sin embargo, en la cartografía a escalas medias y grandes el usuario debe estar en capacidad de medir ángulos y distancias sobre el mapa con un error despreciable. Desde el punto de vista práctico, se puede decir que no se debe permitir que la magnitud de los errores debidos a variaciones en el factor de escala supere a la de los errores naturales de trazo del mapa.

Supóngase que un límite natural y razonable en el error de trazo y marcación de detalles es de 0.2 mm y que la gran mayoría de las distancias que se pueden medir sobre el mapa no son mayores que 50 cm. Esto quiere decir que las medidas en este límite serán de:

$$50 \text{ cm} \pm 0.2 \text{ mm}, \text{ o sea:}$$

$$50.02 \text{ y } 49.98 \text{ cm}$$

En esta forma, se considerará que el mapa no tiene errores efectivos o apreciables en la escala, si el factor de escala de la proyección está comprendido entre:

$$\frac{49.98}{50.00} \quad \text{y} \quad \frac{50.02}{50.00}$$

o sea, como límites prácticos:

$$0.9996 \leq FE \leq 1.0004$$

Normalmente y para efectos comparativos, en una proyección se consideran los factores de escala separadamente, tanto en la dirección de los meridianos como de los paralelos.

Lo importante de estas consideraciones consiste en reconocer el hecho de que ningún mapa, debido a la proyección empleada, tiene una escala uniforme, pero que en el caso de la cartografía



a escalas medias y grandes, es posible reducir el error a límites prácticos en que ya su magnitud no es significativa. A las proyecciones que conservan razonablemente la escala se les denomina *equidistantes*.

### Preservación de áreas

A fin de satisfacer determinados propósitos cartográficos, puede ser necesario que las áreas se deban representar en sus proporciones correctas; es decir, que cualquier área del mapa en relación con el área real en el terreno, esté en la misma proporción que el área cubierta por el mapa con relación a la totalidad de la región cubierta en el terreno.

Es evidente que esto puede lograrse a expensas de las formas. Así por ejemplo, un área de forma cuadrada en el terreno de 1 kilómetro por lado (un  $\text{km}^2$ ) puede estar representada en un mapa a la escala de 1 :50,000 por un rectángulo de 1.6 x 2.5 cm, o al contrario, o en otras formas, tales que siempre se obtengan 4  $\text{cm}^2$ , véase figura 42.

En la práctica, resulta que cuando se logra la condición de preservación de áreas, se pierde la de mantenimiento de las formas y viceversa. En otras palabras, si se quiere conservar la relación de forma (un cuadrado en el mapa corresponde a un cuadrado en el terreno), ya no se preserva el área.

A las proyecciones que cumplen con el requisito de preservación de áreas se les llama de *igual área*, o *proyecciones equivalentes*. Se puede demostrar matemáticamente que si el producto de los factores de escala en dos direcciones mutuamente perpendiculares es igual a la unidad, la proyección es equivalente. Se excluye el caso en que ambos factores son iguales al, condición que nunca se cumple. Por otra parte, cualquier proyección que tenga un factor de escala igual a la unidad en una cierta dirección, no podrá nunca ser de igual área, ya que el otro factor en la dirección perpendicular a la del primero ya no puede ser la unidad.

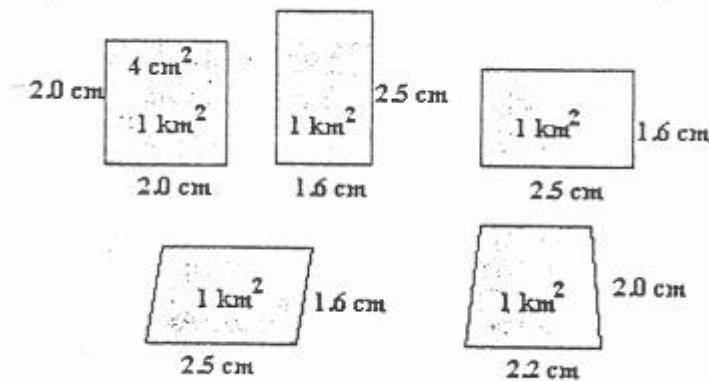


Figura 42. Formas distintas, áreas iguales

### Conservación de formas

Es evidente que resulta imposible tratar de representar correctamente la forma de un área sobre un mapa. Si esto fuera posible, todas las áreas, distancias y direcciones serían poco menos que perfectas y el problema general de las proyecciones no existiría. En mapas de escalas medias



y grandes es muy importante obtener una representación de las formas prácticamente perfecta, ya que debe ser posible medir distancias y rumbos con exactitud en cualquier dirección.

Si para cualquier punto en un mapa que está en una cierta proyección se tiene que los factores de escala a lo largo de los paralelos y meridianos son iguales, y además éstos se cruzan en ángulo recto, resulta que la forma de cualquier área relativamente pequeña en el mapa, es la misma forma correspondiente en el terreno.

Las dos condiciones anteriormente apuntadas definen lo que se llama una proyección *conforme* u *ortomórfica*.

En la práctica cartográfica se considera que una proyección o es conforme si la "igualdad" de los factores de escala se mantiene dentro de los márgenes anteriormente apuntados (0.9996 y 1.0004). Ninguna proyección es absolutamente conforme y se puede decir que el grado de ortomorfismo depende de la escala.

### **Exactitud en las direcciones**

Para ciertos propósitos como el de navegación, es importante comprobar la fidelidad con que los rumbos son representados en una proyección dada. Se llaman *acimutales* o *cenitales* las proyecciones que desde un punto central mantienen las direcciones con su verdadero valor. Existen proyecciones concebidas específicamente para mostrar círculos máximos (distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie terrestre) o líneas de rumbo constante como líneas rectas sobre el mapa, a fin de facilitar su manejo por parte de los navegantes.

### **TIPOS DE PROYECCIONES**

Por lo que se ha visto, el término *proyección* se refiere a la representación de la superficie terrestre sobre una superficie plana de acuerdo con ciertas reglas de perspectiva. El concepto así definido es puramente geométrico; sin embargo, la mayoría de las proyecciones son una modificación matemática del caneavá que se hubiera obtenido por la sola aplicación de las reglas de perspectiva, lo que se ha hecho para satisfacer en cierta medida determinados requisitos.

Las superficies o planos de proyección tienen que ser *planos*, no necesariamente antes de proyectar, lo que permite el uso de superficies desarrollables como las del cilindro y el cono. Se concibe igualmente que las superficies empleadas tocan la superficie terrestre en forma tangente, o la cortan en cualquier lugar y que el centro de proyección está igualmente en cualquier sitio, aunque en la mayoría de las proyecciones en uso actual, es el centro de la Tierra, en cuyo caso se tienen las proyecciones centrales o gnomónicas. Si el centro de proyección está en el punto antipodal por ejemplo, se tiene el grupo de proyecciones estereográficas y si éste se va al infinito, como ya se vio, se tienen las proyecciones ortográficas.

Desde el punto de vista de construcción geométrica y según la superficie de proyección que se emplee, las proyecciones pueden ser:

- Cilíndricas
- Cónicas
- Acimutales





A las que podría agregarse una cuarta categoría de proyecciones *neutras* o *convencionales*, diseñadas más que todo para satisfacer ciertos requisitos de presentación a escalas muy chicas. No serán discutidas aquí.

### Proyecciones cilíndricas

En este tipo de proyección el centro de proyección está en el centro de la Tierra y el plano de proyección es la superficie interna de un cilindro tangente a la superficie terrestre, algo así como introducir una pelota dentro de un tubo. La concepción más simple es la representada en la figura 43 en la que el cilindro se hace tangente al Ecuador. Una vez que se han proyectado los detalles, se corta el cilindro a lo largo y se extiende; es decir, se desarrolla, obteniéndose así un patrón en que los meridianos son líneas rectas paralelas uniformemente espaciadas y los paralelos son igualmente líneas rectas paralelas, pero con un espaciamiento que aumenta rápidamente hacia los polos, los que como puede verse, no se pueden proyectar; su proyección está en el infinito.

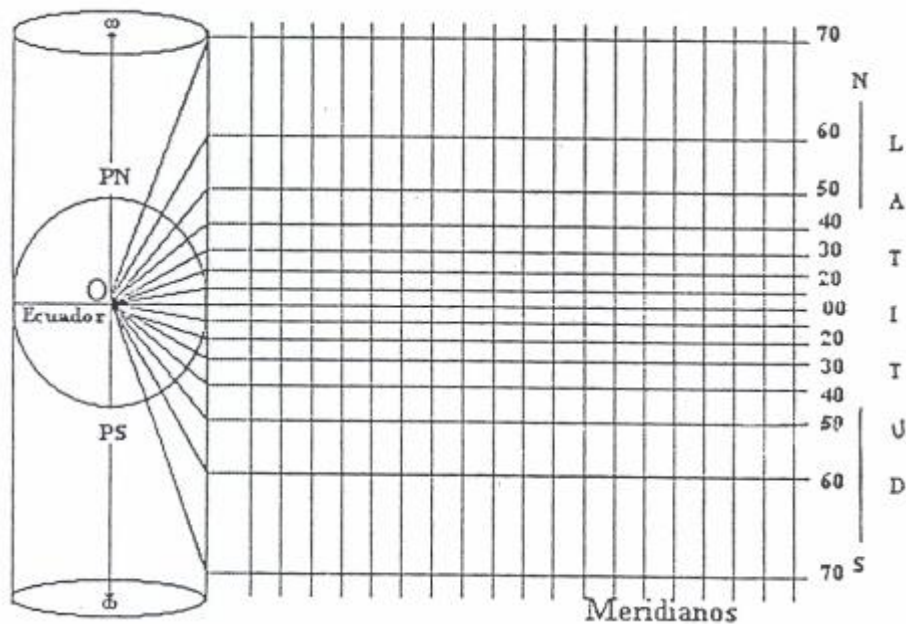


Figura 43. Proyección cilíndrica

Es en este tipo de proyección que los círculos máximos pueden trazarse como líneas rectas, por lo que es de mucha ayuda a la navegación.

Como se puede apreciar en la proyección, las deformaciones aumentan en magnitud a medida que la proyección se extiende hacia los polos.

La llamada proyección simple o *Plate Carree* (placa Cuadrada) es una variante del concepto general anterior y constituye una de las más antiguas proyecciones, concebida en la época griega y usada por Eratóstenes alrededor del año 300 a.C. En dicha proyección los meridianos se representan por líneas rectas paralelas equidistantes y de la misma longitud que los meridianos terrestres (en el caso anterior, son de longitud infinita); los paralelos son perpendiculares a los



meridianos y están representados por líneas rectas paralelas equidistantes y de igual longitud que el Ecuador. En una proyección del Globo Terrestre lo que se obtiene es una cuadrícula regular.

Por construcción, la proyección conserva la escala a lo largo de los meridianos, no así en los paralelos, pues el único que tiene correcta la escala es el Ecuador (la línea de tangencia con el cilindro), mientras que en los demás paralelos la escala se va haciendo más y más chica a medida que se avanza hacia los polos. En el caso extremo de los polos, que son puntos, quedan representados en la proyección por una línea de 40,000 km de longitud, lo que es una deformación extremosa.

La proyección no es equivalente ni conforme, no tiene utilidad práctica en cartografía topográfica y se ha descrito solamente con el objeto de que el estudiante visualice mejor la idea acerca de las proyecciones cilíndricas y lo que puede hacerse en términos de las variaciones matemáticas que pueden introducirse dentro del concepto geométrico.

Para reafirmar un poco más la idea, se tiene la Proyección de Mercator, que es una proyección en la que conservando las demás características descritas, se varía el factor de escala a lo largo de los meridianos (antes era constante), de modo que sea igual al factor de escala a lo largo de los paralelos; logrando en esta forma que la proyección sea conforme u ortomórfica.

Si con el concepto de la proyección cilíndrica simple o Plate Carreé se toma el cilindro y se le da un giro de  $90^\circ$  de modo que ahora sea tangente a un meridiano, se obtiene la llamada Proyección Cilíndrica Transversa, o Proyección de Cassini. Posteriormente se discutirá la Proyección Transversa de Mercator.

También se da el caso de proyecciones cilíndricas oblicuas, que son los casos entre las posiciones normal y transversa del cilindro, con lo que las variedades son prácticamente infinitas.

### **Proyecciones cónicas**

En este tipo de proyección el centro de proyección sigue siendo el centro de la Tierra, pero el plano de proyección es ahora la superficie interna de un cono tangente a la esfera, como si se introdujera una pelota dentro de un vaso cónico de papel, ver figura 44. El caso más simple es el de un cono tangente a lo largo de un cierto paralelo de referencia.

Después de proyectar, se corta el cono a lo largo de una generatriz y se desarrolla, obteniéndose el patrón indicado en la figura, en donde los meridianos son líneas rectas convergentes uniformemente espaciadas y los paralelos son círculos concéntricos alrededor del vértice del cono, con un espaciado variable que aumenta a medida que se avanza (en este caso) hacia las latitudes menores. El Polo Norte se proyecta en el vértice del cono, mientras que el Polo Sur se va al infinito.

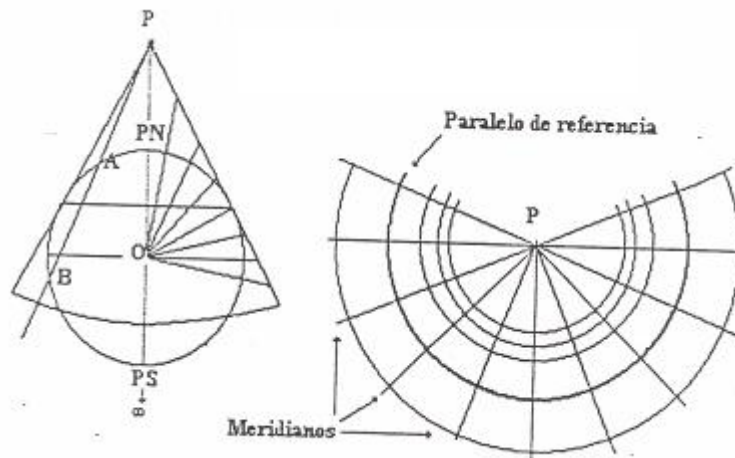


Figura 44. Proyección cónica

Existe una gran variedad de proyecciones cónicas que dependen de la posición del vértice del cono (más, o menos alto), de la orientación del eje del mismo (normal, transversal u oblicuo), e inclusive del uso de un cono secante (línea PAB en la figura 44), con dos paralelos de referencia, o de múltiples conos. Mediante variaciones matemáticas, se pueden desarrollar proyecciones cónicas con ciertas propiedades, la más común de las cuales es el ortomorfismo. Una de las más populares es la Proyección Cónica Conforme de Lambert, que es una proyección secante con dos paralelos de referencia a lo largo de los cuales la escala es correcta. Otra es la llamada Proyección Policónica, en la que se usan varios conos tangentes con un espaciamiento en latitud de un grado. La proyección resultante no es conforme, equivalente o equidistante, pero proporciona una buena solución de compromiso entre estas tres características.

### Proyecciones acimutales (o cenitales)

En las proyecciones acimutales se utiliza como plano de proyección una superficie plana tangente a la superficie del esferoide en un punto dado, solamente que ahora el centro de proyección puede estar en distintas posiciones como se indica en la figura 45b.

- Si el centro de proyección está en el centro de la Tierra, se tiene la llamada *Proyección Gnomónica*.
- Cuando el centro de proyección se sitúa en el punto diametralmente opuesto al de tangencia, resulta la denominada *Proyección Estereográfica*.
- En el caso en que el centro de proyección se vaya al infinito, los rayos de proyección se hacen paralelos y se obtiene entonces la *Proyección Ortográfica*.

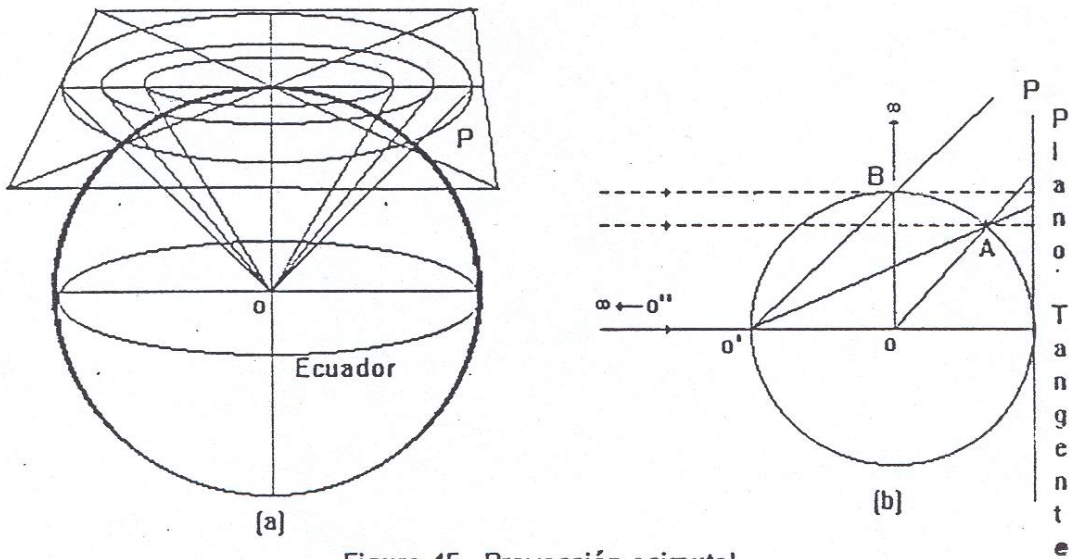


Figura 45. Proyección acimutal

Observando la figura, se nota que la proyección Gnomónica es la que produce las mayores distorsiones y que inclusive puntos como B no se pueden proyectar, mientras que la proyección Ortográfica es la que acusa las menores deformaciones.

Las más conocidas de las proyecciones acimutales son aquellas en que el plano de proyección se hace tangente a uno de los polos terrestres, en cuyo caso se tienen, según la posición del centro, las proyecciones Polares Gnomónica, Estereográfica y Ortográfica respectivamente. El patrón que se observa en la figura 45(a) es el de una serie de círculos concéntricos que representan los paralelos de latitud, centrados en el polo y con espaciamentos variables, mientras que los meridianos son líneas rectas divergentes a partir del polo, uniformemente espaciadas. Obsérvese en la figura 46 el caso de la Proyección Estereográfica Polar.

En esta proyección en particular se pueden igualar los factores de escala de modo que se logre el ortomorfismo.

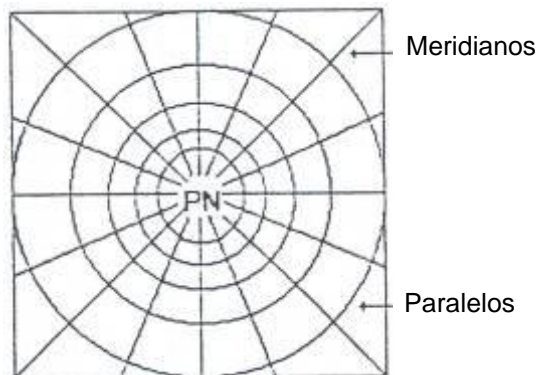


Figura 46. Proyección Estereográfica Polar



La proyección no es equivalente, pero resulta que los factores de escala no son excesivos y así la exageración en área no es mucha. Su importancia reside en el hecho de que es conforme y por lo tanto puede usarse en la cartografía de escalas medias y grandes para las regiones polares; es decir, en las altas latitudes. En la práctica cartográfica se usa al norte del paralelo de  $84^{\circ}$  N y al sur del de  $80^{\circ}$  S para completar el cubrimiento de la Proyección Universal Transversa de Mercator, que se describe más adelante.

Una observación con respecto a todas las proyecciones discutidas hasta el momento: si en el caso de la proyección cónica el vértice del cono se va al infinito, se obtiene la proyección cilíndrica, mientras que en el extremo opuesto, cuando la altura del vértice del cono se hace nula, resulta la proyección acimutal, con lo que puede verse que tanto las cilíndricas como las acimutales son casos especiales de la proyección cónica.

### La Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)

Esta proyección es semejante a la de Cassini en el sentido de que el eje del cilindro está girado  $90^{\circ}$ , con la diferencia de que éste no es tangente, sino secante al esferoide, lo que se hace con el propósito de reducir la magnitud del factor de escala, véase la figura 47.

Si se trata de proyectar la superficie terrestre de grandes extensiones, se obtendrá un patrón sumamente deformado, pero para áreas vecinas a la zona secante, la proyección resulta extremadamente uniforme en escala, conforme y equivalente. Para lograr esto, además de las transformaciones matemáticas envueltas, cada zona UTM es proyectada a la vez, con lo que en realidad se obtienen 60 proyecciones iguales. El procedimiento consiste en centrar cada meridiano central en la zona de corte secante, proyectar, avanzar  $6^{\circ}$  a la siguiente zona, proyectar, y así sucesivamente. De este modo, limitando la proyección a cada zona de  $6^{\circ}$  se reducen las deformaciones a valores compatibles con la cartografía de escalas medias y grandes.

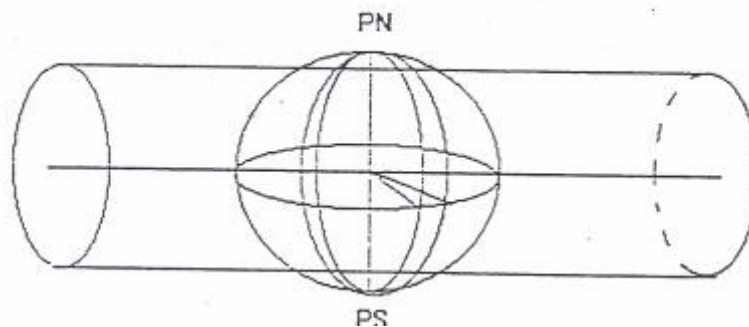


Figura 47. Proyección Universal Transversa de Mercator

El cilindro se hace secante con el objeto de limitar el valor del factor de escala, como puede notarse en la figura 48 (muy exagerada).

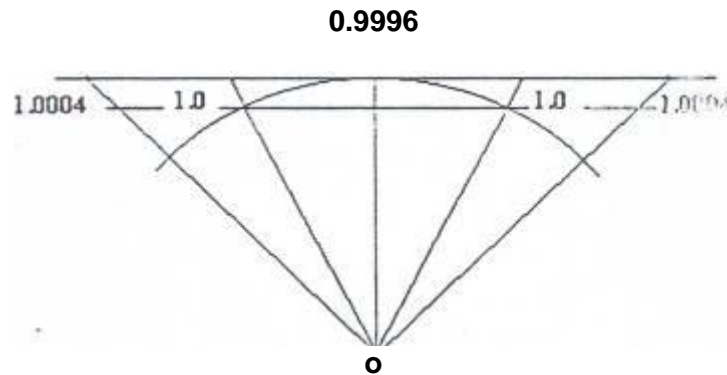


Figura 48. Factor de escala en la UTM

Si se conservara tangente el cilindro, el factor de escala en el meridiano central sería la unidad, pero en el límite de la zona de  $6^\circ$  tendría un valor de 1.0009, mientras que con el cilindro secante se balancean los errores, de modo que a lo largo del meridiano central el factor de escala vale 0.9996, en los dos meridianos simétricos a  $1.6^\circ$  del meridiano central vale 1.0000 y en los extremos de la zona tiene un valor de 1.0004.

Estas cantidades, como puede verse son compatibles con las obtenidas para la precisión requerida teniendo en cuenta la precisión de trazo y marcación.

Cabe recordar que esta proyección tiene un rango de aplicación entre los  $84^\circ$  N y los  $80^\circ$  S de latitud, más allá de los cuales es sustituida por la Proyección Universal Estereográfica Polar (UPS).

La UTM es la proyección utilizada en el INEGI para su cartografía de escalas medias y grandes (no menores que 1:500,000), así como en la mayoría de otras instituciones, nacionales y del exterior. De hecho, la mayor parte de la cartografía topográfica americana está en este tipo de proyección junto con su cuadrícula asociada del mismo nombre. Como una opción a la UTM se acostumbra el uso de la Proyección Cónica Conforme de Lambert y en ocasiones sobre un mismo mapa y para regiones poco extensas se han señalado sobre la cuadrícula UTM marcas de una cuadrícula asociada con la proyección Lambert.

Toda proyección es susceptible de una expresión matemática que permite obtener los valores de coordenadas rectangulares en función de las coordenadas geográficas. De este modo el caneavá correspondiente a una proyección dada puede trazarse con facilidad sobre un sistema cartesiano, sobre todo si se dispone de un coordinatógrafo preciso, o un graficador electrónico. (Ambos son utilizados en el INEGI).

Las proyecciones utilizadas en el INEGI son la UTM para escalas hasta 1:500,000, la Cónica Conforme de Lambert con dos paralelos base a  $17^\circ 30'$  y  $29^\circ 30'$ , y la Proyección de Mercator simple para la cartografía oceanográfica.

Con esto, se termina la discusión sobre proyecciones y en general sobre las características intrínsecas de los mapas.