

CAPÍTULO 7

Cartografía

Leandro V. Soto y Héctor A. Salgado

La Cartografía (del griego χάρτης, chartēs = mapa y γραφειν, graphein = escrito, gráfico) es la ciencia dedicada a los métodos y sistemas para representar en un plano una parte (por ej. Carta Topográfica) o la totalidad de la superficie terrestre (por ej., planisferio). También puede definirse como el arte de dibujar cartas geográficas.

Una carta o mapa es una representación geométrica, plana, simplificada y convencional de una parte o la totalidad de la superficie terrestre con una relación métrica de similitud denominada escala.

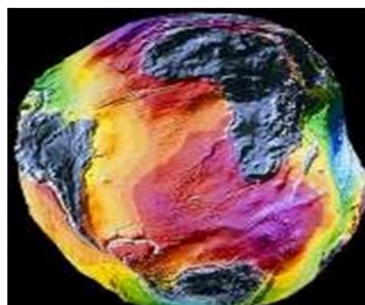
Formas de la tierra

La superficie de la Tierra sobre la cual vivimos y nos desplazamos, o bien la **superficie topográfica**, es compleja e irregular. En cartografía se utilizan aproximaciones, como son el Geoide y el Elipsoide, para lograr la proyección de la superficie terrestre sobre el plano.

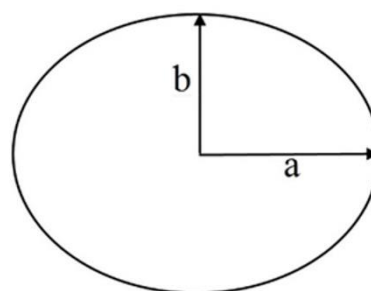
Figura 7.1: Formas de la Tierra



Superficie topográfica



Geoide



Elipsoide

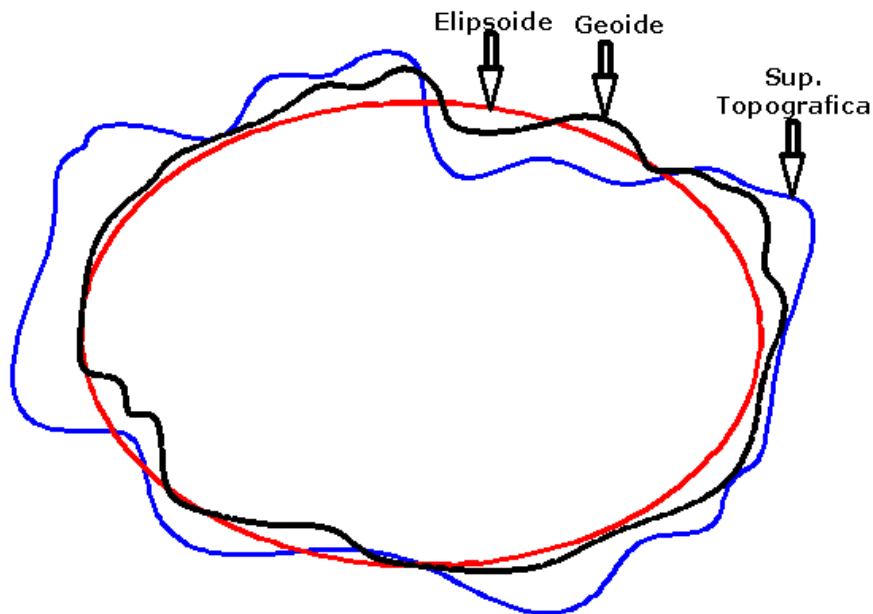
El **Geoide** es una superficie geofísica, correspondiente con la posición del mar en estado de reposo, prolongado hipotéticamente por debajo de los continentes. Es la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre, y constituye la aproximación más cercana a la verdadera forma de la Tierra. El geoide correspondería a la superficie de los mares en calma prolongada por

debajo de los continentes y libre de la acción de vientos y mareas. Es una superficie equipotencial e irregular, por lo que no tiene una ecuación matemática que lo represente integralmente. Se trata de una superficie de referencia útil, ya que define la horizontal en todas partes y la fuerza de gravedad es ortogonal a ella. Los instrumentos topográficos utilizan una plomada, la cual señala la vertical o perpendicular al geoide.

El **Elipsoide** se genera por la rotación de una elipse alrededor de uno de sus ejes. En el caso del Elipsoide Terrestre, la elipse rota alrededor de su semieje menor “b”, es una figura geométrica, por lo cual responde a una ecuación matemática. La elipse de revolución está caracterizada por sus dos semiejes y el achatamiento o aplastamiento polar: un semieje menor “b” de 6357 Km y un semieje mayor “a”) de 6378 Km.

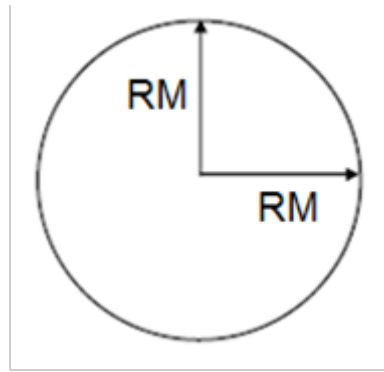
Tanto el Geoide como el Elipsoide se emplean en **Geodesia** (ciencia que estudia la verdadera forma y dimensiones de la Tierra) como superficies de referencia. Métodos geodésicos brindan puntos de apoyo, que son tomados como puntos de arranque para los levantamientos plani-altimétricos.

Figura 7.2: Comparación de las diferentes superficies representativas de la Tierra

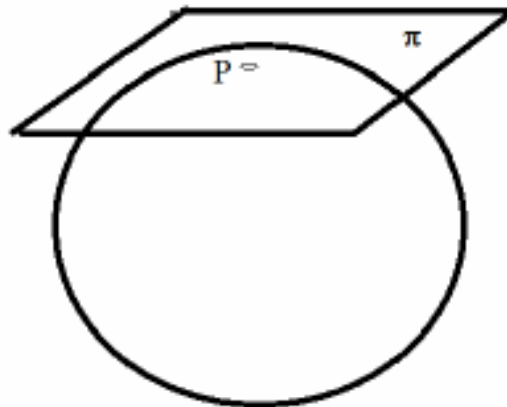


Una forma más simplificada de la Tierra es la de una **Esfera de Radio Medio “RM”** (aproximadamente 6370 km). Dicha esfera responde a una ecuación matemática sencilla.

$$RM = \sqrt{a \cdot b}$$

Figura 7.3: Tierra de Radio Medio RM

El plano tangente en el Punto P a la esfera de radio medio RM es utilizado en Topografía para la proyección de la superficie terrestre.

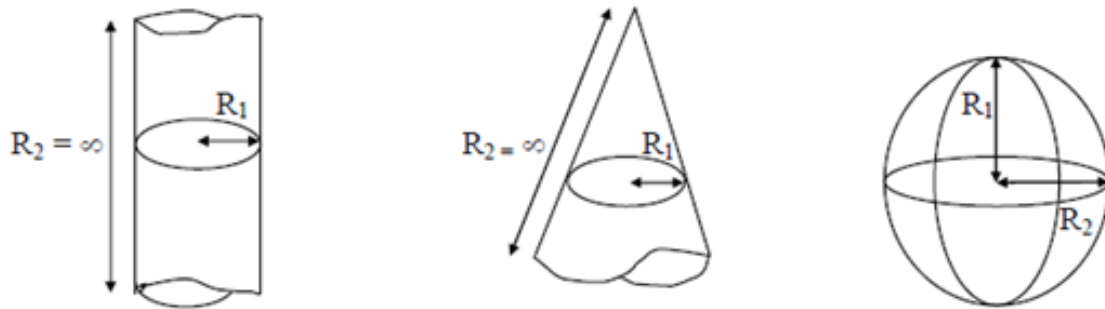
Figura 7.4: Plano tangente a la esfera en el punto P

Superficies desarrollables

Debido a la esfericidad de la Tierra, no es posible representarla en un plano sin que se produzcan deformaciones y diferencias entre las magnitudes reales (en el terreno) y las representadas a escala. Por lo tanto, para poder proyectarla en un plano se recurre a figuras geométricas auxiliares desarrollables en un plano. Las superficies desarrollables son, de acuerdo a Gauss, aquéllas en las que el producto de sus curvaturas es nulo, siendo la curvatura el valor inverso del radio:

$$C = 1 / R$$

Donde C = Curvatura y R = radio

Figura 7.5: Radios de 3 superficies (cilindro, cono y esfera/elipsoide)

Tanto en el cilindro como en el cono uno de los radios es infinito “ ∞ ”, por lo que una de las curvaturas es nula y el producto de las curvaturas también lo es, siendo las superficies de ambas figuras desarrollables en un plano. A su vez, en la esfera ninguno de los radios es ∞ , por lo que ninguna de las curvaturas es nula, constituyendo una figura cuya superficie no es desarrollable en un plano.

Proyección cartográfica

La proyección cartográfica o proyección geográfica es un sistema de representación gráfica que establece una relación ordenada entre los puntos de la superficie de la Tierra y los de la superficie plana (mapa). Estos puntos se localizan mediante una malla de meridianos y paralelos, en forma de marco, denominado “canevas”. La única forma de evitar las distorsiones de esta proyección sería usando un mapa esférico (Globo Terráqueo).

En un sistema de coordenadas proyectadas, los puntos se identifican por las coordenadas cartesianas (x e y) en una malla cuyo origen depende de los casos. Este tipo de coordenadas se obtienen matemáticamente a partir de las coordenadas geográficas (longitud y latitud).

Propiedades

Las proyecciones cartográficas se pueden clasificar en función de su principal propiedad; el tipo de superficie sobre la que se realiza la proyección: cenital (un plano), cilíndrica (un cilindro) o cónica (un cono); así como la disposición relativa entre la superficie terrestre y la superficie de proyección (plano, cilindro o cono) pudiendo ser tangente, secante u oblicua.

Según la propiedad que posea una proyección puede distinguirse entre:

- proyecciones equidistantes o automecóicas, si conservan la relación en las distancias.
- proyecciones equivalentes o equiareas, si conservan la relación en las superficies.
- proyecciones conformes o isogónicas, si conservan las formas (o sea, los ángulos).

No es posible tener las tres propiedades anteriores a la vez, por lo que es necesario optar por soluciones de compromiso, que dependerán de la utilidad a la que sea destinado el mapa.

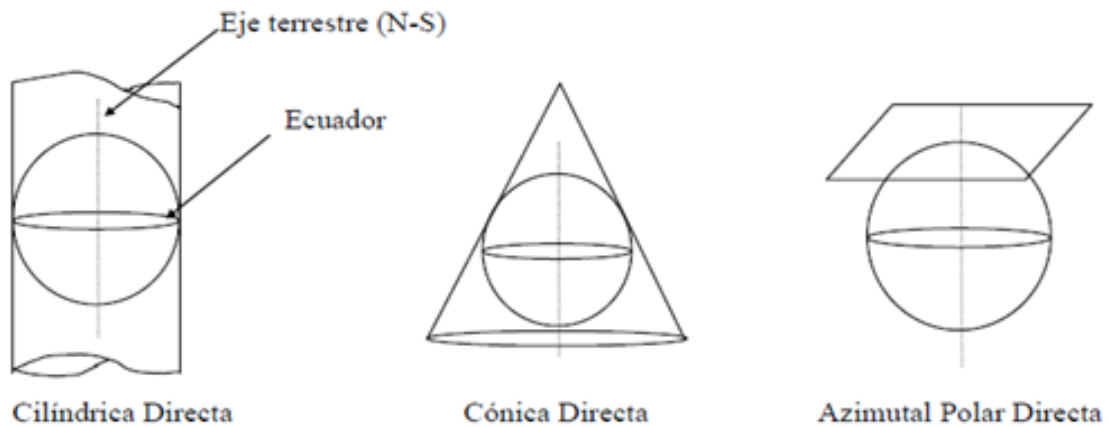
Según la posición que adoptan con relación al eje terrestre se clasifican en:

- Directa: el eje de revolución coincide con el eje terrestre.
- Transversa: el eje de revolución está contenido en el plano ecuatorial.
- Oblicua: el eje de revolución en otra posición que las definidas anteriormente.

Según la figura auxiliar, se clasifican en:

- Cilíndrica: cuando la Tierra se proyecta contra un cilindro.
- Cónica: cuando se proyecta contra un cono.
- Azimutal: cuando se proyecta contra un plano tangente.

Figura 7.6: Proyecciones, según sus figuras auxiliares

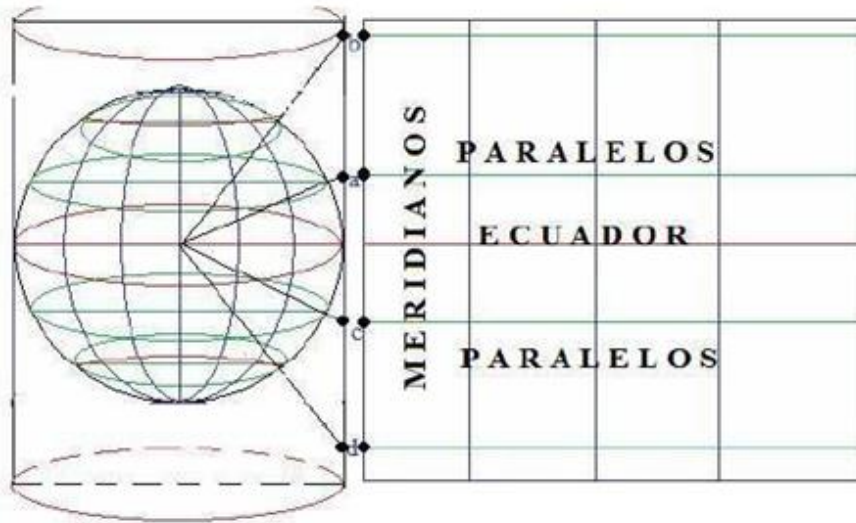


Proyección Mercator

La proyección Mercator (G.Mercator, 1569) es muy utilizada (desde el siglo XVIII) para cartas náuticas porque permite trazar las rutas de rumbo constante (loxodrómicas) como líneas rectas e ininterrumpidas, a diferencia de otras proyecciones más precisas.

Es un tipo de proyección cilíndrica directa, tangente al Ecuador (o secante a lo largo de un paralelo). O sea, deforma las distancias entre los meridianos en líneas paralelas, aumentando su ancho real cada vez más a medida que se acerca a los Polos (Figura 7.7).

Esta proyección tampoco respeta las distancias reales entre los paralelos, la amplía en largo, cada vez más a medida que se acerca a los Polos, distorsionando las áreas cercanas a los Polos aún más.

Figura 7.7: Proyección Mercator

Proyección UTM

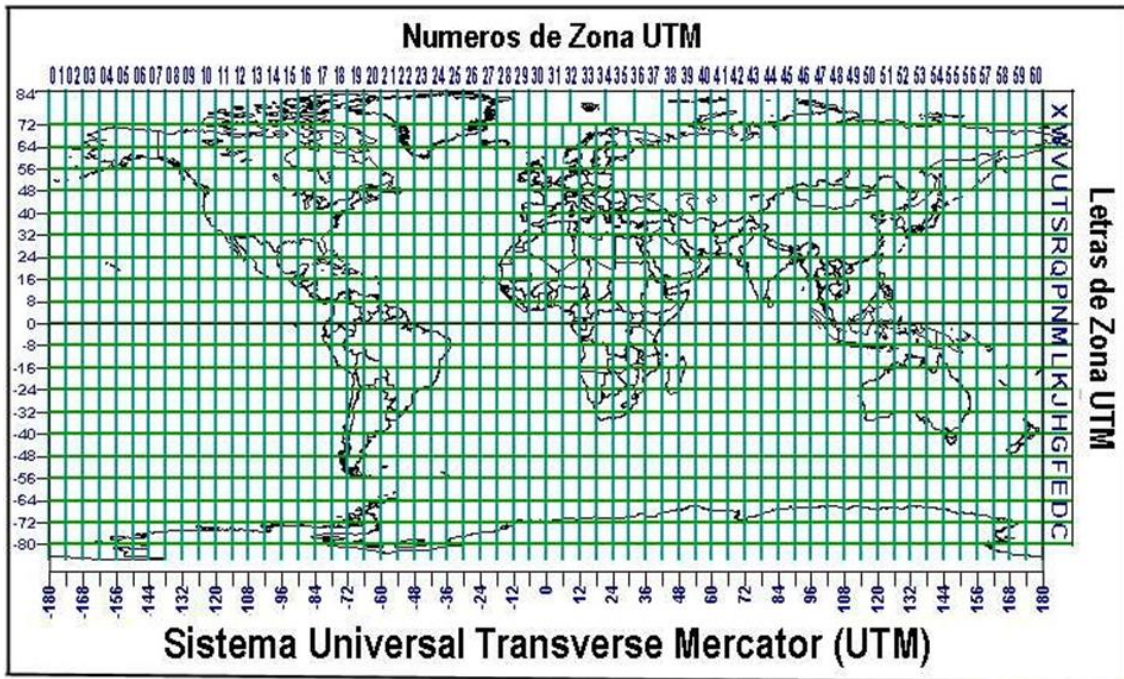
La proyección Universal Transverse Mercator (UTM), desarrollada por el Ejército de Estados Unidos de Norteamérica (USA) a finales de los 1940, se ha difundido como una proyección standard mundial para los levantamientos topográficos. La UTM es una proyección cilíndrica, transversa y conforme, con un ancho de faja de meridianos de 6° , es decir 3° a ambos lados del meridiano central.

La proyección UTM se pensó para la cobertura del mundo entre latitudes de 80° .

El mundo es dividido en 60 zonas de 6° de longitud en ancho, numeradas de W a E de 1 a 60, y 8° de latitud, designadas con letras. Por ejemplo, la ciudad de Buenos Aires, Argentina, se encuentra en la zona 21H (Figura 7.8).

Es una proyección plana, con un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales. Las ordenadas "N" tienen su origen en el Ecuador o Polo Sur, según los hemisferios N o S, y abscisas "E" con origen en cada zona (con valor asignado 500.000m), ambas con unidad de medida el metro.

Figura 7.8: Nomenclatura del Sistema UTM



Adaptado de: Peter H. Dana 9/7/94

Las condiciones que se imponen en esta proyección son:

- Debe conservar los ángulos, es decir, debe ser conforme.
- El meridiano central es automecico, es decir, no puede tener deformación lineal.
- El Ecuador y el meridiano central de cada huso se representan por líneas rectas.
- Los orígenes de coordenadas son, para la "x", el Ecuador (para hemisferio N) y el Polo S (para hemisferio S), y para las "y", el meridiano central del huso.
- Los casquetes polares no se suelen representar en UTM, quedando limitado su empleo a latitudes menores de 80°.
- A partir de la intersección del meridiano central del huso y del Polo S (o el Ecuador), se construye una cuadrícula, de forma que un punto en la superficie terrestre queda representado en el mapa con unas coordenadas planas universales.

En todos los mapas con coordenadas UTM, al igual que en los de Gauss-Krüger (que se tratan a continuación), tienen tres referencias: Norte magnético, Norte geográfico y Norte de la cuadrícula UTM.

El ángulo entre el Norte de la cuadrícula y el Norte geográfico se llama convergencia de meridianos.

El ángulo entre el Norte magnético y el Norte geográfico se llama declinación magnética, que puede ser:

- Positiva si el Norte magnético está al Este del Norte geográfico.
- Negativa si el Norte magnético está al Oeste del Norte geográfico.

El Norte magnético es variable en su posición, por lo que es importante indicar la fecha de realización del mapa y su variación anual. La corrección a aplicar se obtiene de la carta isógona del lugar.

Proyección Gauss-Krüger

El Instituto Geográfico Nacional IGN (ex Instituto Geográfico Militar IGM) tiene a su cargo, de acuerdo a la Ley de la Carta, la confección de la cartografía topográfica de nuestro país. Se adoptó, para ese fin, la proyección cartográfica *Gauss-Krueger* o Sistema *Gauss-Krüger* (GK).

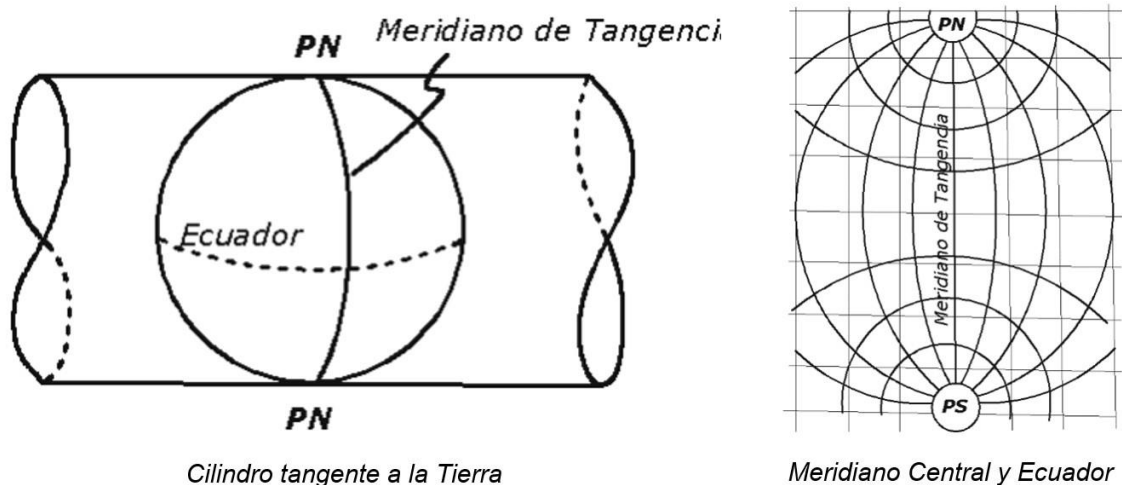
Como todo sistema de proyección cartográfica, establece una correspondencia biunívoca entre cada punto de la superficie terrestre (caracterizado por sus coordenadas geográficas latitud φ y longitud ω , y su homólogo en el plano (definido por sus coordenadas planas cartesianas x e y).

GK es un sistema desarrollado sobre un cilindro recto tangente a la Tierra según un meridiano (Figura 7.8). En la proyección GK las figuras mantienen su forma y sus ángulos (“conforme”), pero resultan agrandadas en función de su alojamiento al meridiano de tangencia (Figura 7.9), el cual resulta la única línea automecica, (en la cual se conserva perfectamente la relación de escala). A medida que se alejan del meridiano de tangencia, las figuras se agrandan de acuerdo a un módulo de agrandamiento (m).

$$m = 1 + \frac{y'^2}{2R^2}$$

Donde y' es la distancia desde la figura hasta el meridiano de tangencia y R el radio medio de la Tierra.

Figura 7.9: Cilindro tangente a lo largo de un meridiano en Proyección GK

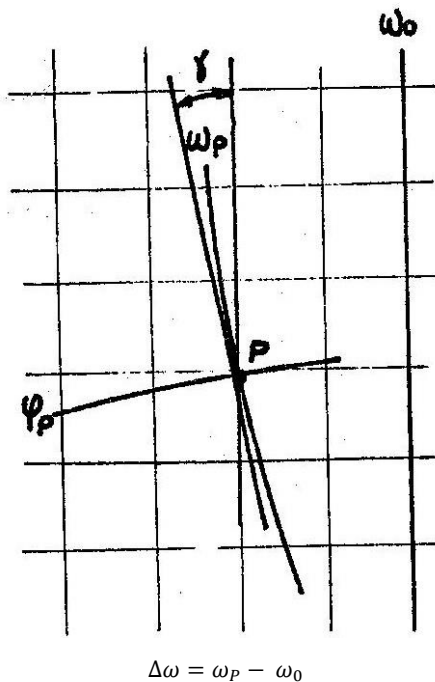


Los paralelos resultan curvos con concavidad hacia el Polo elevado correspondiente, y el Ecuador es una recta perpendicular al meridiano de tangencia. Los demás meridianos presentan curvatura hacia el meridiano de tangencia (Figura 7.9). La curvatura se expresa a través de la **convergencia de meridianos**, que es función de la latitud (φ) y de la diferencia de longitud $\Delta\omega$ entre el punto considerado y el meridiano central (de tangencia) (Figura 7.10).

$$\gamma = \Delta\omega \cdot \text{Sen} \varphi$$

El rango de valores de γ va desde 0 (nula) en el Ecuador, hasta $1^\circ 30'$ en el Polo Sur (para el Hemisferio Sur).

Figura 7.10: Convergencia de Meridianos (γ) en el punto P (φ_P ; ω_P)

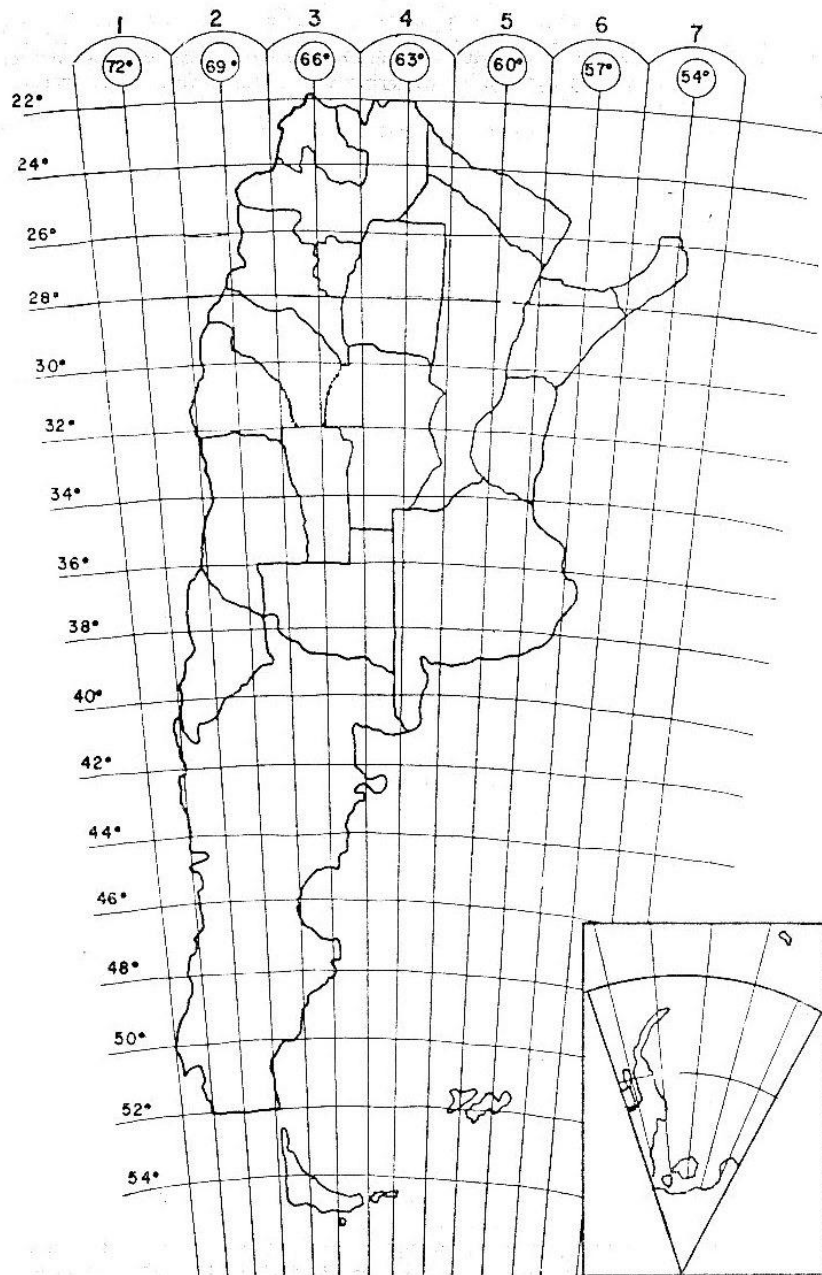


Debido al agrandamiento de las figuras en función del alejamiento del meridiano de tangencia, resulta conveniente la elección de éste en las cercanías de la figura (según Krüger, un ancho de 3°), o sea un alejamiento máximo de $1^\circ 30'$ a cada lado del meridiano central es suficiente para reducir las deformaciones a valores compatibles para los usos cartográficos. Significa que tales deformaciones no son perceptibles a simple vista a la escala de la carta.

Se dividió a la República Argentina en fajas de 3° de amplitud en longitud, siendo el meridiano de tangencia en cada caso, el meridiano central de faja (ver Figura 7.11). Son 7 fajas, ordenadas de W a E, cuyo N° de orden es la característica (K) de cada faja.

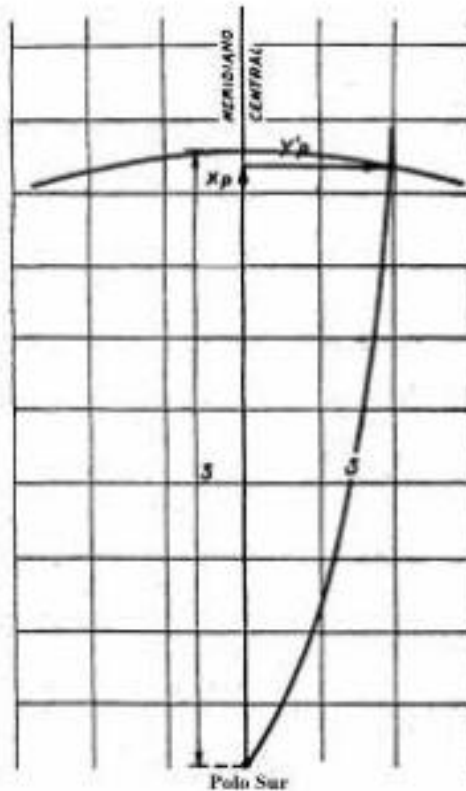
Meridiano Central:	-72°	-69°	-66°	-63°	-60°	-57°	-54°
Característica (K):	1	2	3	4	5	6	7

Figura 7.11: Fajas del sistema GK



Cada faja forma un sistema de coordenadas independiente. En cada uno, el meridiano central es el eje de las "x", y a partir de él, ortogonalmente, se miden las "y". Existen 2 orígenes para las abscisas (x): el Ecuador para el hemisferio N y el Polo Sur para el hemisferio S.

Para un punto P (Figura 7.12), la abscisa X_p expresa la distancia desde el origen hasta la proyección ortogonal del punto P sobre el meridiano central.

Figura 7.12: Coordenadas planas GK del punto P

A fin de evitar valores negativos para las ordenadas (y) y también individualizar el meridiano central, se atribuye a su ordenada el valor:

$$y_0 = K \cdot 10^6 + 500.000$$

La ordenada Yp se obtiene sumando a la ordenada del meridiano central, la distancia entre Y'p entre éste y el pto. P. Las y' son + al E del meridiano central y - al W.

Cálculo de coordenadas planas Gauss-Krüger

Para obtener las coordenadas planas Gauss-Krüger de un punto P a partir de sus coordenadas geográficas latitud φ y longitud ω se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Y = K \cdot 10^6 + 500.000 + \Delta\omega \cdot \cos \varphi \cdot N + \frac{(\Delta\omega \cdot \cos \varphi)^3}{3!} \cdot N \cdot (1 - t^2 + \eta^2) + \dots$$

$$X = S + \frac{(\Delta\omega \cdot \cos \varphi)^2}{2!} \cdot N \cdot t + \frac{(\Delta\omega \cdot \cos \varphi)^4}{4!} \cdot N \cdot t \cdot (5 - t^2 + 9 \cdot \eta^2) + \dots$$

en las que: $\Delta\omega = \omega_p - \omega_0$; $t = \tan \varphi$

N = radio de curvatura de la sección normal que pasa por P en el elipsoide de Hayford

$$\eta^2 = e'^2 \cdot \cos^2 \varphi \quad (\text{donde } e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \text{ segunda excentricidad del elipsoide})$$

S = longitud del arco de meridiano entre el Polo Sur y el punto P

N, e'^2 y S se obtienen de las tablas del Elipsoide de Hayford

En las ecuaciones anteriores se han tomado los dos primeros términos del desarrollo en serie que las origina, con lo que las coordenadas calculadas resultan con una vacilación del orden del centímetro.

Carta topográfica

La Carta Topográfica es un documento cartográfico con información planialtimétrica, susceptible de ser representada a diferentes escalas. Por su carácter documental, permite su empleo en mediciones lineales y angulares.

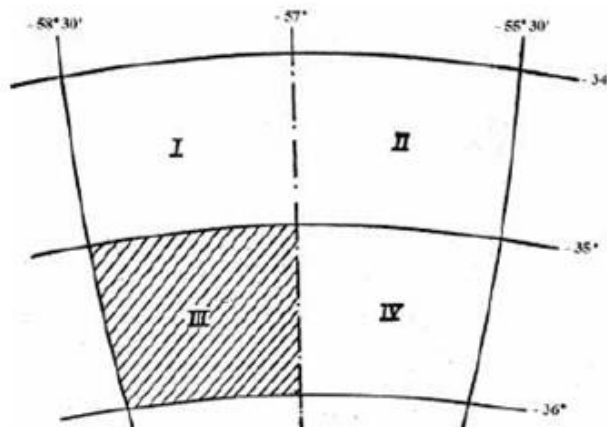
Nomenclatura de la Carta Topográfica del IGN

Las cartas del IGN se publican a las escalas: 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000, 1:50.000 y 1:25.000, fraccionadas en hojas denominadas "planchetas", las cuales se individualizan con un nombre y un código numérico, que está relacionado con la posición geográfica, en función de la Escala:

E=1:500.000: Cada hoja abarca 3° de amplitud en longitud, y 2° en latitud (ver Figura 7.13). Su N° identificador está compuesto por 4 cifras; las dos primeras corresponden al paralelo central de la hoja (Número impar); las otras 2 al meridiano central. Por ejemplo, en la Figura 7.13:

$$3557 \left\{ \begin{array}{l} \text{paralelo central } 35^\circ \\ \text{meridiano central } 57^\circ \end{array} \right.$$

Figura 7.13: Hoja 3557



E= 1:250.000: es la cuarta parte de una hoja E=1:500.000, (Figura 7.13), identificándose con un número romano. Su extensión es de 1°30' en longitud y 1° en latitud. Por Ej., la hoja sombreada en la Figura 7.13:

3557 – III

E= 1:100.000: es la 36 ava parte de una carta E=1:500.000. Abarca 30' en longitud y 20' en latitud. (Figura 7.14). Por Ejemplo, en la Figura 7.14 se indica la:

3557 – 14

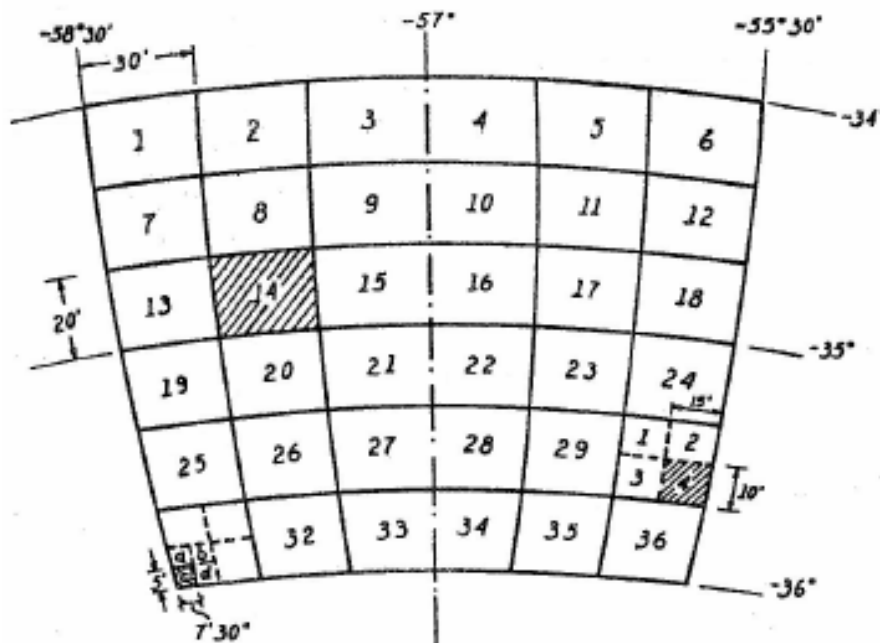
E= 1:50.000: es la cuarta parte de una hoja E=1:100.000. Abarca 15' de longitud y 10' de latitud. Por Ej., en la Figura 7.14 se marca rayada:

3557 – 30 – 4

E= 1:25.000: es la cuarta parte de una hoja E= 1:50.000. Abarca 7' 30" en longitud y 5' en latitud. Para su denominación se usan letras minúsculas: a, b, c, d. Por Ej. en la Figura 7.14 se señala:

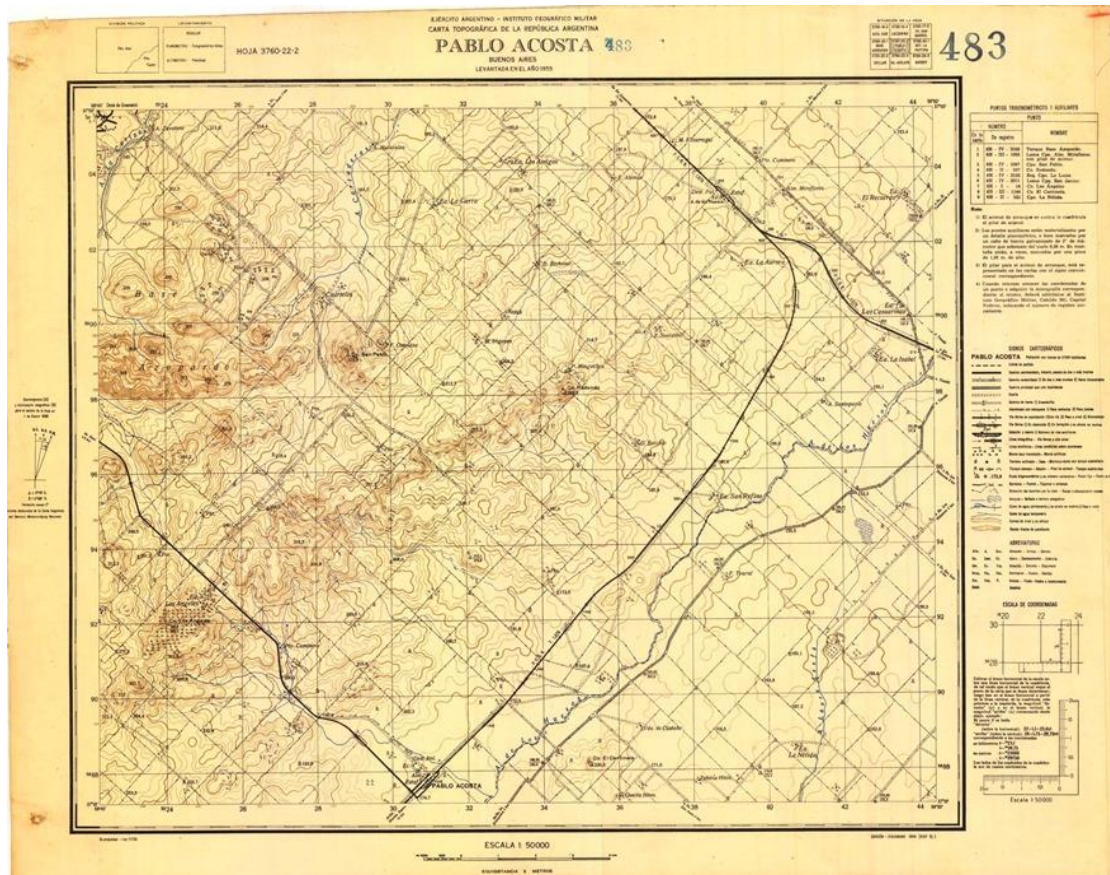
3557 – 31 – 3 – c

Figura 7.14: Divisiones de la Hoja madre 3557



A modo de ejemplo, se presenta la Carta Topográfica 3760-22-2 Pablo Acosta, correspondiente a la localidad homónima, ubicada en zona serrana del Partido de Azul, Provincia de Buenos Aires (Figura 7.15).

Figura 7.15: Hoja 3760-22-2 Pablo Acosta



Interpretación

La interpretación de una carta topográfica requiere la identificación, conocimiento y comprensión de todos los elementos alfabéticos, numéricos, símbolos y gráficos a los fines de la formación del modelo del terreno para aplicarlo a un objetivo determinado. Entre los elementos componentes de una plancheta se tiene:

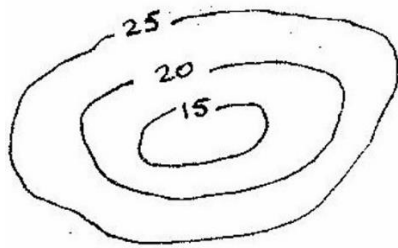
- **Escala:** relación entre las magnitudes lineales en el plano y el terreno (abajo en el centro). También cuenta con una escala gráfica simple.
- **Croquis de situación de la hoja:** para relacionar la plancheta con las vecinas (arriba a la derecha).
- **Nómina de puntos trigonométricos y auxiliares:** útiles para relacionar cualquier trabajo topográfico a la red fundamental del país.
- **Convergencia de meridianos y declinación magnética** (para el centro de la carta y fecha fija, por ej. 1° de enero de 1958) en el margen izquierdo.
- **Signos cartográficos** más frecuentes, indispensable para la interpretación de la simbología de la plancheta.
- **Curvas de nivel:** las líneas que unen puntos de igual altitud, o sea desnivel con respecto al Nivel medio del Mar. Resultan fundamentales para la interpretación de la altimetría del

terreno. La equidistancia, (que también figura abajo, junto a la escala) es el desnivel que separa dos curvas de nivel consecutivas. El análisis de las curvas de nivel permite la identificación de las formas del relieve. Entre las formas topográficas más comunes:

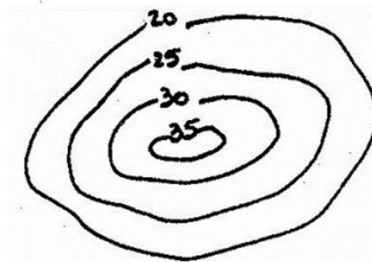
– **Hoyas y lomas**

Las zonas bajas presentan en general curvas de mayor cota rodeando a curvas de cota menor. Lo contrario ocurre en zonas altas, donde las curvas de menor cota rodean a las de mayor cota (Figura 7.16 a y b).

Figura 7.16: Hoyas y lomas



a: Hoya, bajo o depresión



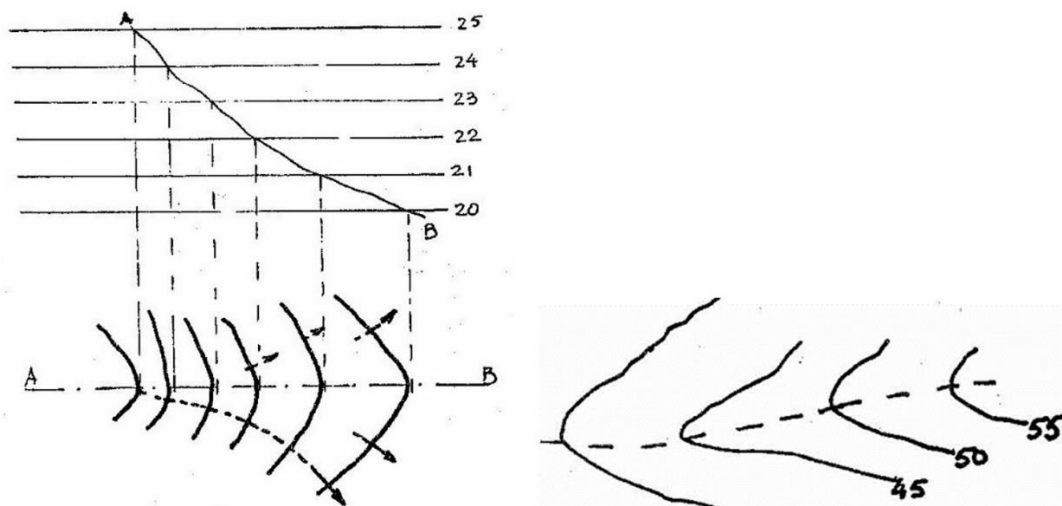
b: Cerro, morro, loma

– **Laderas con líneas de máxima pendiente**

A los fines de manejo de suelos y aguas para objetivos conservacionistas, de riego o de estudio de cuencas hídricas en general es particularmente necesario la identificación de: **divisoria de aguas**, que delimitan superficialmente una cuenca hídrica. En toda loma, dorsal, sierra, etc., existe una línea directriz que une los puntos de mayor cota de las sucesivas secciones transversales, llamada “divisoria de aguas”, pues es la línea intersección de 2 laderas a partir de la cual las aguas superficiales escurren en sentido opuesto (Figura 7.17).

Las aguas escurren en general siguiendo líneas de máxima pendiente, que son perpendiculares a las curvas de nivel.

Figura 7.17: Divisoria de aguas y líneas de máxima pendiente (flechas)



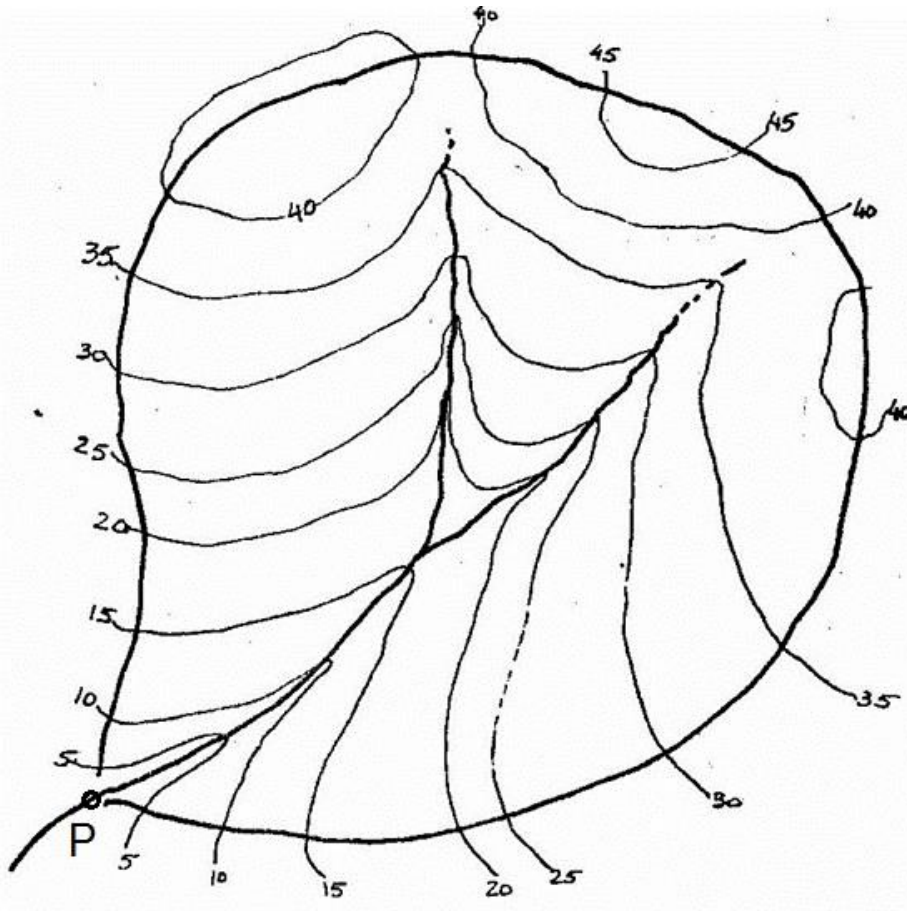
El escurrimiento en los bajos se lleva a cabo por las líneas directrices que unen los puntos de menor cota de las sucesivas secciones transversales, llamadas **vaguadas** (Figura 7.18).

Figura 7.18: Vaguada o cauce (flecha)



La interpretación del relieve a través de las geformas descritas permite delimitar áreas, donde el escurrimiento superficial converge hacia un punto P de un cauce o vaguada. Es decir, por P pasa toda el agua de escorrentía captada (por ej., proveniente de lluvia). Vale aclarar que pueden elegirse diferentes puntos de un cauce, originando cada uno un área diferente propia (Figura 7.19). Esta tarea es aplicable en proyectos de embalses, vertederos, obras de control de erosión hídrica, etc.

Figura 7.19: Delimitación topográfica de área de aporte superficial en P



Carta de Imagen

Se entiende por Carta de Imagen al resultado del procesamiento de imágenes satelitales, de modo de obtener un producto gráfico o digital, sobre el cual puedan realizarse medidas de distancias, ángulos y superficies, como en la tradicional Carta Topográfica de Línea.

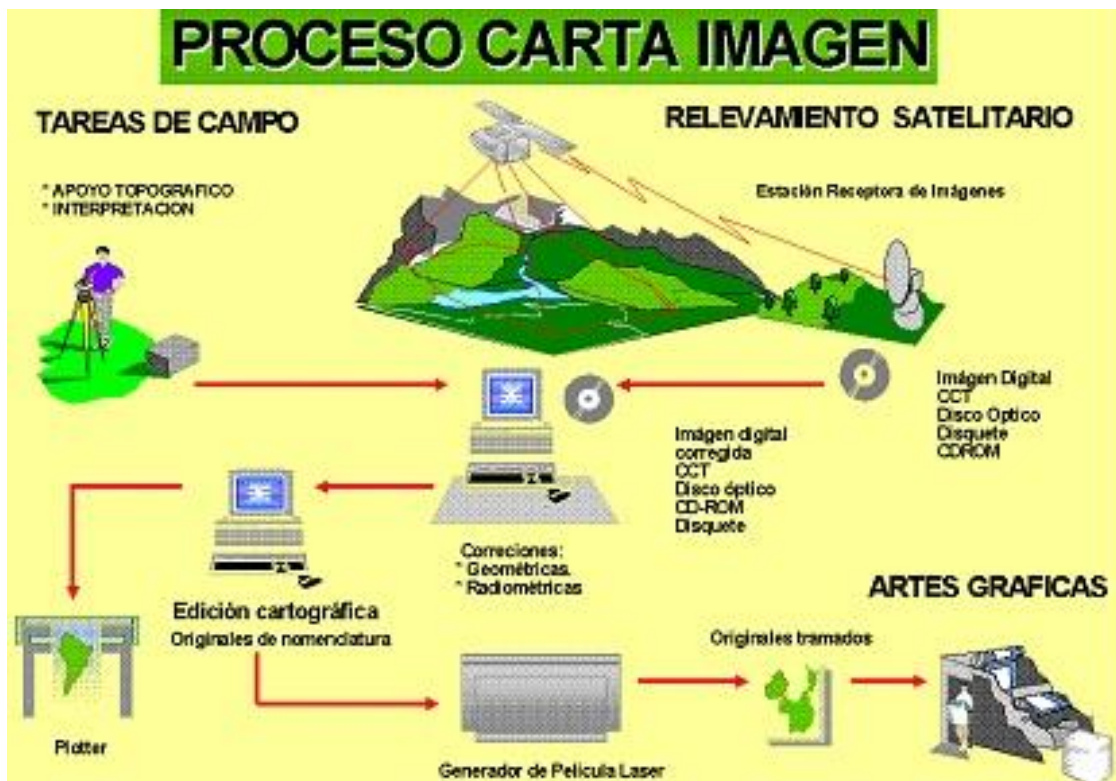
Se trata de un documento cartográfico que tiene como base una o más imágenes satelitales, con el agregado de datos y toponimia propios de cartas convencionales.

No tiene superpuestas las curvas de nivel, razón por la cual no pueden realizarse mediciones altimétricas (pendientes, delimitación de cuencas hídricas, geoformas, etc.). Por otra parte, se identifican claramente los diversos tipos de uso y cobertura del suelo (forestal, agrícola, infraestructura vial y urbana, etc.).

La **confección de la carta** de imagen requiere una serie de etapas (Figura 7.20).

- Captura de imágenes (LANDSAT y SPOT en general)
- Apoyo de campo
- Proceso de imágenes, correcciones geométricas y radiométricas, georreferenciación, mosaico, etc.
- Generación de originales
- Impresión

Figura 7.20: Proceso de la Carta de Imagen (Fuente: IGM)



En la República Argentina, paralelamente a la clásica carta topográfica de línea, el IGM ha desarrollado la correspondiente carta de imagen. Se ha mantenido el mismo esquema y

nomenclatura, de manera que, para una misma zona, se puede tener información topográfica tradicional e información actualizada (a la fecha de confección de la Carta de Imagen), si se dispone de ambas Cartas (Figuras 7.21 y 7.22).

Figura 7.21: Carta topográfica

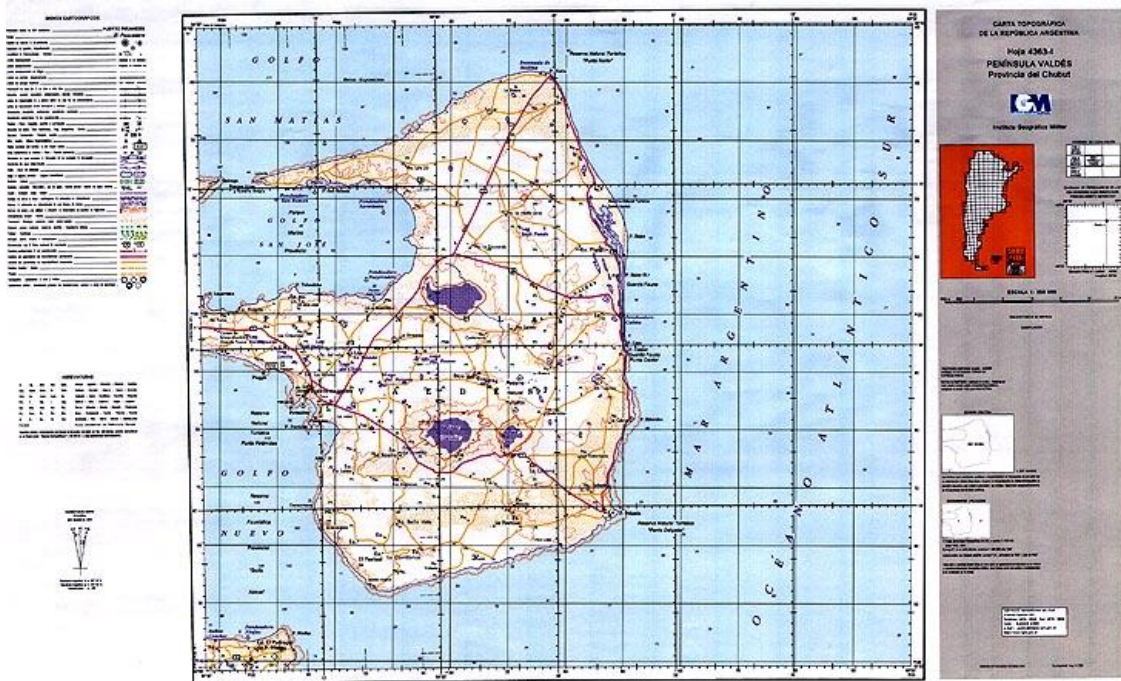


Figura 7.22: Carta de imagen



En las Figuras anteriores se presentan las Cartas de la Península Valdés (Provincia de Chubut) a escala E= 1:250.000, ambas con el mismo canevas geográfico.

La Carta de Imagen (Figura 7.22) presenta lateralmente información sobre el satélite empleado, características del sensor (bandas, etc.) y fecha de adquisición. También una Leyenda con las principales coberturas correspondientes. Toda esta información es fundamental para interpretación y aprovechamiento de la Carta.

La Carta de Imagen no tiene graficadas las curvas de nivel, ni los símbolos cartográficos, como la de Línea. Por otra parte, muestra una visión integrada y actual del medio ambiente (uso del suelo, riberas de cuerpos de agua, estado de desarrollo urbano y rural, etc.). Resulta una herramienta muy útil para estudios dinámicos temporalmente, por ejemplo, inundaciones en zonas bajas, desplazamientos en masa en zonas de montañas, crecimiento urbano, etc.

En conclusión, ambos tipos de Cartas presentan información complementaria, brindando datos de suma utilidad para estudios y proyectos a distintas escalas y necesidades.

Referencias

Dana, Peter H. (1994). Coordinate Systems Overview, The Geographer's Craft Project. Department of Geography, University of Texas at Austin.

IGN (2021). Manual de Símbolos cartográficos 2010. Disponible en Internet en: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/ProduccionCartografica/documentacion-tecnica>