Cartografia

Licenciatura em Engenharia Geoespacial
2º ano/2º semestre

Ano lectivo de 2019/2020

Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Ciências ULisboa
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

ÍNDICE

1. Fundamentos
2. Sistemas de coordenadas
3. A teoria das projeções cartográficas
4. Projeções cartográficas

1. Fundamentos

1.1. Definição de cartografia

1.2. Definição de mapa e carta

1.3. Classificação das cartas

1.4. Cartografia portuguesa atual

1.5. Superfícies de referência

1.6. *Data* geodésicos

1.7. Projeções cartográficas

1.8. Propriedades das projeções cartográficas

1.9. Classificação das projeções cartográficas

1. Fundamentos

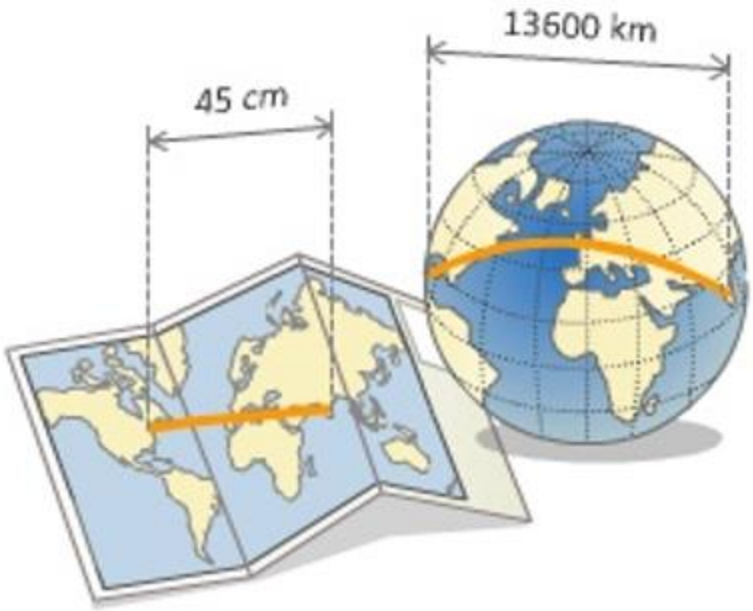
The **International Cartographic Association** (ICA) is "the world authoritative body for **Cartography**, the discipline dealing with the conception, production, dissemination and study of maps." The mission of the Association is to promote the discipline and profession of Cartography and GIScience in an international context. The ICA is the prime international body for Cartography and GIScience (see www.icaci.org for more information).

International Cartographic Association
Association Cartographique Internationale

https://icaci.org/files/documents/reference_docs/ICA_Strategic_Plan_2011-2019.pdf

1. Fundamentos

Chama-se **mapa** a qualquer representação plana da superfície da Terra, ou de outro corpo celeste, na qual são representadas as posições relativas dos vários objetos, numa determinada **escala** e numa determinada **projeção cartográfica**.



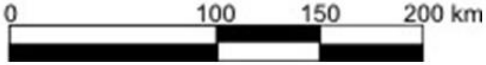
1. Fundamentos

A **escala** de uma carta é uma relação de proporção entre a realidade e a sua representação;

Por exemplo, a escala 1:100 000 indica que as dimensões do terreno foram reduzidas 100 000 vezes para serem representadas na carta.

Existem 2 tipos de escala :

Numérica (A) Ⓐ 1: 100.000

Gráfica (B) Ⓑ 

1. Fundamentos

A palavra **mapa** teve origem na Idade Média e era usada para designar apenas as representações terrestres.

A partir do século XIV, os mapas marítimos passaram a ser conhecidos por cartas, designação essa que, posteriormente, se estendeu a outros tipos de representação cartográfica.

Atualmente, o termo **carta** é utilizado para designar qualquer tipo de mapa, independentemente da sua especificidade.

1. Fundamentos

A representação dos elementos do terreno sobre uma carta pressupõe uma **escolha em número**, dado que apenas alguns elementos deverão ser representados, e uma **escolha em importância**, dado que serão representados apenas os elementos que correspondam a determinados critérios.

Dado isto, uma carta é um documento cuja construção é subjetiva e submetida a normas pré-definidas de seleção e de representação, correspondendo sempre a uma **representação incompleta do terreno** independentemente da escala.

1. Fundamentos

Um dos sistemas mais consensuais de classificação das cartas consiste em agrupá-las em duas grandes classes, de acordo com o seu objetivo:

Cartas de base	Cartas temáticas
As cartas de base são aquelas cujo objetivo é a representação da superfície da Terra, dos objetos que a ocupam e de outra informação geográfica de caratér genérico. Nestas cartas estão representados os acidentes topográficos naturais e artificiais, tais como o relevo do terreno, os cursos de água, os aglomerados populacionais e as vias de comunicação, e também os objetos de carácter abstrato, tais como as fronteiras entre estados e outros limites administrativos.	As cartas temáticas são aquelas cujo objetivo é representar informação, ou apoiar atividades, de caráter especializado. Existe uma grande diversidade de cartas temáticas, parecendo não haver limite para o tipo de informação que pode ser representado cartograficamente.

1. Fundamentos

Cartas de base		
Cartas topográficas	Destinadas a cobrir as zonas terrestres, de acordo com a escala, e em consequência com o detalhe da representação	Cartas geográficas
		Cartas corográficas
		Cartas topográficas propriamente ditas
Cartas hidrográficas	Destinadas a cobrir as zonas costeiras e oceânicas	Não existindo em Portugal cartografia hidrográfica de base propriamente dita, o seu papel é desempenhado pela cartografia náutica

1. Fundamentos

Cartas topográficas	
Cartas geográficas	Cartas de pequena escala, inferior a 1: 500 000, que representam os traços mais gerais de vastas regiões do globo terrestre
Cartas corográficas	Cartas de escala intermédia, entre 1:500 000 e 1:50 000, que representam países ou regiões
Cartas topográficas propriamente ditas	Cartas de grande escala, superior a 1:50 000, que representam os aspetos geográficos mais salientes da superfície terrestre O termo planta cartográfica é utilizado para designar as cartas topográficas de maior escala, superior a 1:10 000, representando áreas suficientemente pequenas para que a curvatura da Terra possa ser ignorada e a escala se possa considerar constante

1. Fundamentos

Cartas temáticas	
Cartas administrativas	Cartas que representam as divisões administrativas de um território e os centros populacionais mais importantes
Cartas fisícas	Cartas que representam, essencialmente, os aspetos naturais da topografia e hidrografia da superfície terrestre; cartas hipsométricas (altitude) e cartas batimétricas (profundidade)
Cartas náuticas	Cartas concebidas expressamente para apoiar a navegação marítima sendo por imperativos de segurança sujeitas a atualizações permanentes
Cartas demográficas	Cartas destinadas a representar a distribuição geográfica dos parâmetros demográficos de uma região, designadamente a distribuição e densidade da população, os índices de natalidade e mortalidade, entre outros
Cartas meteorológicas	Cartas que se destinam a representar informação de caráter meteorológico, tais como as cartas climáticas e as cartas de tempo

1. Fundamentos

Cartas temáticas (cont. ...)	
Cartas geológicas	Cartas destinadas a representar informação sobre a geologia de uma região terrestre ou maritíma
Cartas geomorfológicas	Cartas destinadas a representar informação sobre as formas do relevo da superfície e a sua génese
Mapas de estradas ou cartas itinerárias	Cartas destinadas a representar as vias de comunicação (estradas, caminhos, caminhos de ferro, etc.) e outra informação complementar de interesse ao viajante (distâncias, postos de reabastecimento, oficinas, hotéis, etc.)
Cartas ou plantas urbanas	Cartas de grande escala destinadas a representar ruas, edifícios, monumentos e outros objetos de interesse para quem percorre ou utilize as zonas urbanas
Cartas ou plantas cadastrais	Cartas de grande escala destinadas a representar os limites de propriedade rústica ou urbana e a localização das construções

1. Fundamentos

Existem três instituições em Portugal com atribuições legais no âmbito da produção cartográfica:

Direção-Geral do Território – DGT (resultante da fusão do Instituto Geográfico Português - IGP e da Direção-Geral de Ordenamento do Território e Urbanismo- DGOTDU) www.dgterritorio.pt
Centro de Informação Geoespacial do Exército – CIGeoE (antigo Instituto Geográfico do Exército- IGeoE) www.igeoe.pt
Instituto Hidrográfico – IH www.hidrografico.pt

1. Fundamentos

Principal produção cartográfica da DGT				
Designação/Série	Escala	Projeção	Elipsóide	N.º folhas
Carta de Portugal	1:10 000	Gauss	GRS80	2 416
Carta de Portugal *M7810- Continente* (*) *M7811- Açores* *P722- Madeira*	1:50 000	Gauss UTM UTM	GRS80 Hayford Hayford	175 10 4
Carta de Portugal *M684- Continente* (*)	1:100 000	Gauss	GRS80	53
Carta de Portugal *M585- Continente* *M587- Açores* *P521- Madeira*	1:200 000	Gauss UTM UTM	Hayford Hayford Hayford	8 2 1
Carta de Portugal *Continente*	1:500 000	Gauss	GRS80	1
Carta de Portugal *Continente*	1:1 500 000	Gauss	GRS80	1
Carta de Portugal Continental e Regiões Autonómas	1:2 500 000	Lambert	Hayford	1

(*) nas folhas anteriores a 2002 (1:50 000) e anteriores a 2009 (1:100 000) elipsóide de Bessel e projeção de Bonne

Fonte: DGT, fevereiro 2020

1. Fundamentos

Principal produção cartográfica do CIGeoE				
Designação/Série	Escala	Projeção	Elipsóide	N.º folhas
Carta Militar de Portugal *M888- Continente* *M889- Açores* *P821- Madeira*	1:25 000	Gauss UTM UTM	WGS84 (*) WGS84 (**) WGS84 (**)	632 35 15
Carta Militar de Portugal *M782/M783- Continente*	1:50 000	Gauss	WGS84	175
Carta Militar de Portugal *M586- Continente*	1:250 000	Gauss	WGS84	8
Carta Oficial de Estradas de Portugal (2014)	1:500 000	UTM	WGS84	1

(*) até abril de 2001 elipsóide de Hayford
(**) antes da 2ª edição elipsóide de Hayford

Fonte: IGeoE, fevereiro 2020

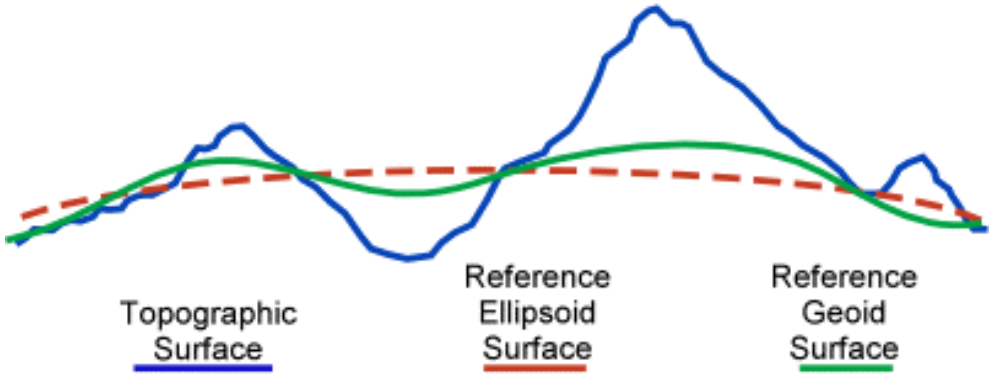
1. Fundamentos

Principal produção cartográfica do IH				
Designação/Série	Escala	Projeção	Elipsóide	N.º folhas
Pequena escala	1:3 500 000 a 1:1 000 000	Mercator	WGS84	3
Média escala *Continente* *Açores* *Madeira*	1:1 000 000 a 1:150 000	Mercator Mercator Mercator	WGS84 WGS84 WGS84	9 3 2
Grande escala *Continente* *Açores* *Madeira*	1:150 000 a 1:5 000	Mercator Mercator Mercator	WGS84 WGS84 WGS84	23 18 10
Navegação de recreio	1:150 000	Mercator	WGS84	12
Apoio à Pesca	1:150 000	Mercator	WGS84	3
Fonte: IH, fevereiro 2020				

1. Fundamentos

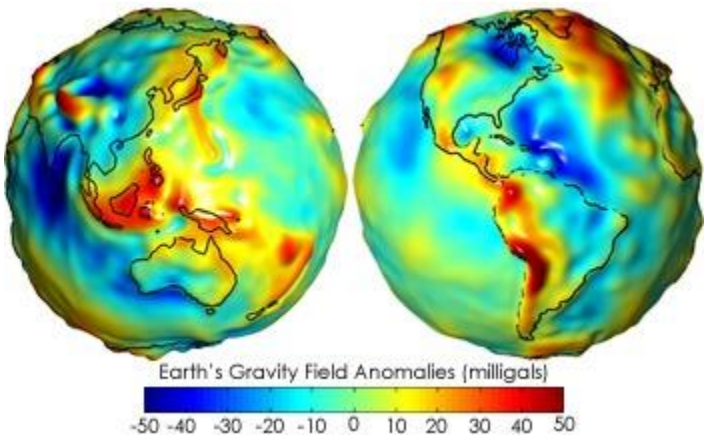
A superfície topográfica da Terra apresenta uma forma muito irregular e complexa pelo que não pode ser utilizada diretamente para a realização de cálculos.

A superfície que melhor se aproxima da forma da Terra é o **geóide**, que é uma superfície equipotencial que corresponde aproximadamente ao nível médio das águas do mar.



1. Fundamentos

O **geóide** é uma superfície ondulatória, suave e contínua e que ficticiamente se estende sob os continentes ao mesmo nível e que, por definição, é perpendicular em cada ponto à direção da gravidade.



Esta superfície não é simétrica em relação ao eixo de rotação, sendo irregular a distribuição de densidades no interior da Terra (o monte Everest tem cerca de 8 km de altitude e a fossa das Marianas tem cerca de 11 km de profundidade).

1. Fundamentos

Chama-se **superfície de referência** a uma superfície teórica destinada a servir de modelo da superfície da Terra:

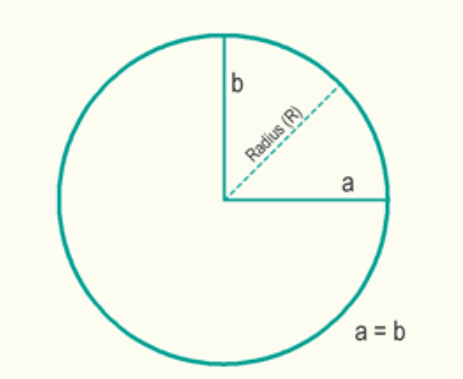
- Superfície de **referência geodésica** (elipsóide de referência) é um modelo com formas e dimensões tão próximas quanto possível das da Terra, destinado a estabelecer com grande exatidão, as posições relativas entre os vários lugares;
- Superfície de **referência cartográfica** é um modelo da superfície da Terra com base no qual se realizam cálculos destinados a construir as projeções cartográficas (plano, esfera e elipsóide de revolução).

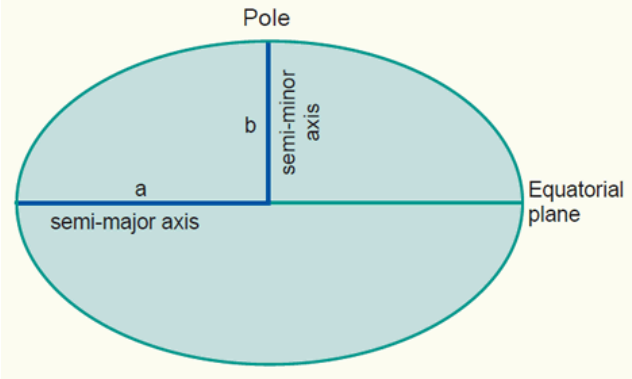
1. Fundamentos

A melhor forma de representar a superfície da Terra depende, de algum modo, da extensão da área que se pretende representar:

- Para **regiões suficientemente pequenas** (alguns km de raio), o erro em se ignorar a curvatura da Terra pode, em geral, ser desprezado (considerando-se o **plano**), pelo que as posições relativas de todos os pontos são preservadas;

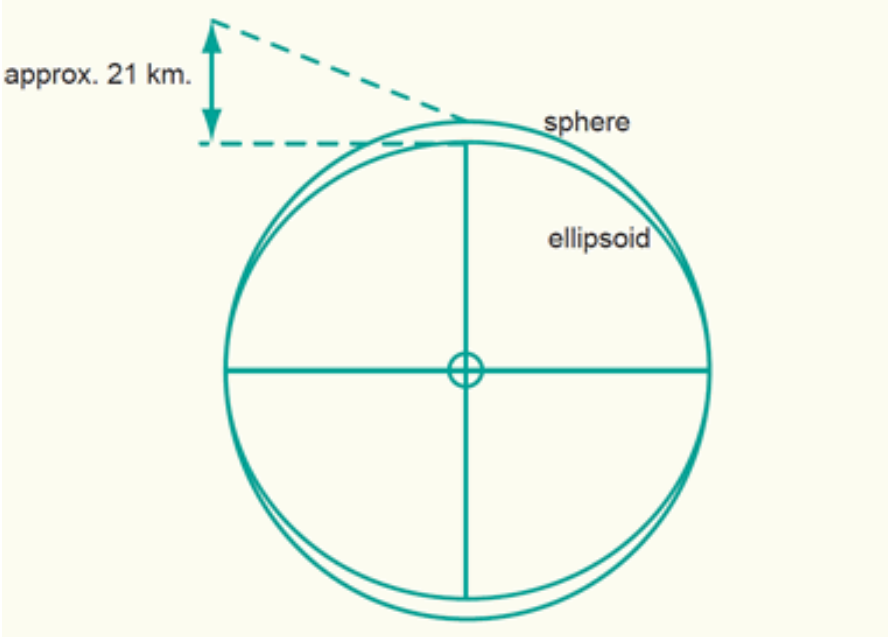
- Para **regiões vastas** é necessário ter em conta a curvatura da Terra: em alguns casos, bastará considerar a **esfera**; noutros casos, será necessário recorrer a uma melhor aproximação, o **elipsóide de revolução**, com o objetivo de minimizar as distorções.





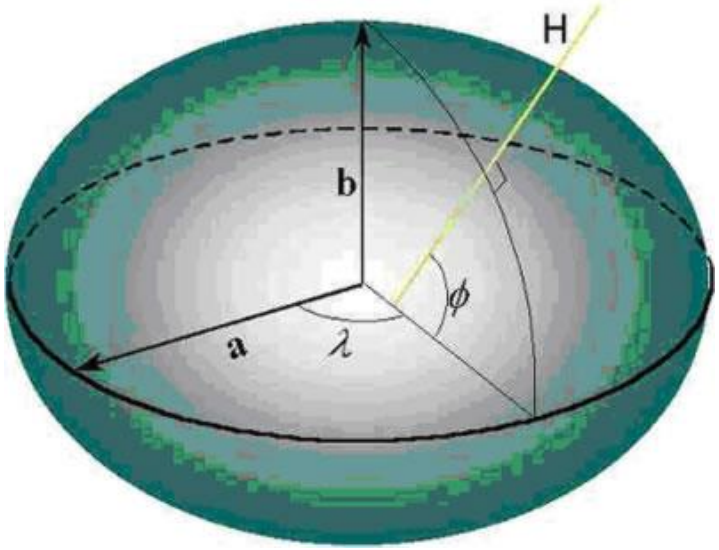
1. Fundamentos

- Considerando uma esfera com um raio de cerca de 6 370 km existe um erro de aproximação de cerca de 10 km;
- Considerando um elipsóide (achatamento) com um raio equatorial de 6 378 km e um raio polar de 6 357 km, existe um erro de aproximação de cerca de 50 m.



1. Fundamentos

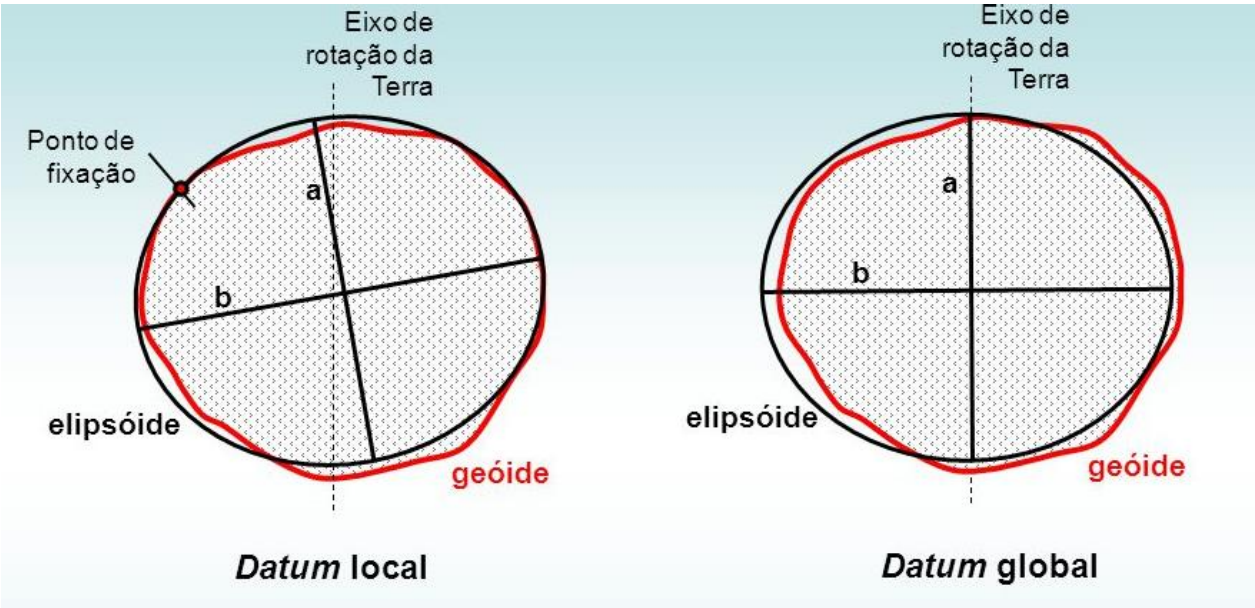
A expressão **datum geodésico** é utilizada para designar o conjunto dos parâmetros que constituem a referência de um determinado sistema de coordenadas geográficas, designadamente o **elipsóide de referência**, definido através das medidas do semi-eixo maior e do semi-eixo menor, e a sua **posição relativamente ao globo terrestre**.



1. Fundamentos

Datum local

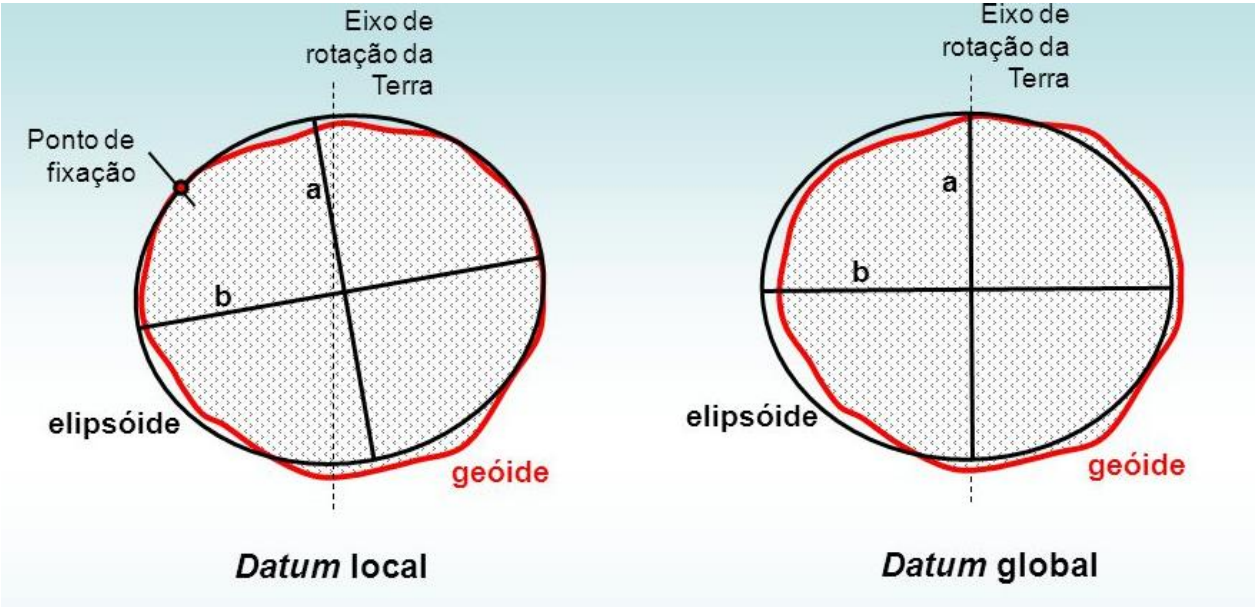
A posição do elipsóide de referência é estabelecida através da latitude, longitude e altitude de um ponto de fixação, bem como de um azimute medido, a partir deste ponto, para uma outra posição.



1. Fundamentos

Datum global

A posição é escolhida de modo a, tanto quanto possível, fazer coincidir o centro de massa da Terra com o centro geométrico do elipsóide e o eixo de rotação da Terra com o eixo menor do elipsóide.



1. Fundamentos

↘ Os ***data*** **locais** são utilizados para a cobertura geodésica de países ou regiões, minimizando localmente as distâncias entre o elipsóide e o geóide

(adopta-se um elipsóide cujas dimensões se aproximem o melhor possível da forma de um dado país ou região e cujo eixo de revolução seja paralelo ao do geóide)

↘ Os ***data*** **globais** destinam-se a servir de suporte a sistemas geodésicos, cartográficos ou de posicionamento globais e procuram minimizar as diferenças entre o elipsóide de referência e o geóide, em todo o globo

(adota-se um elipsóide cujas dimensões se aproximem o melhor possível a toda a superfície terrestre, coincidindo o eixo de revolução e o centro geométrico deste elipsóide respetivamente com o eixo de rotação e com o centro de gravidade do geoíde)

1. Fundamentos

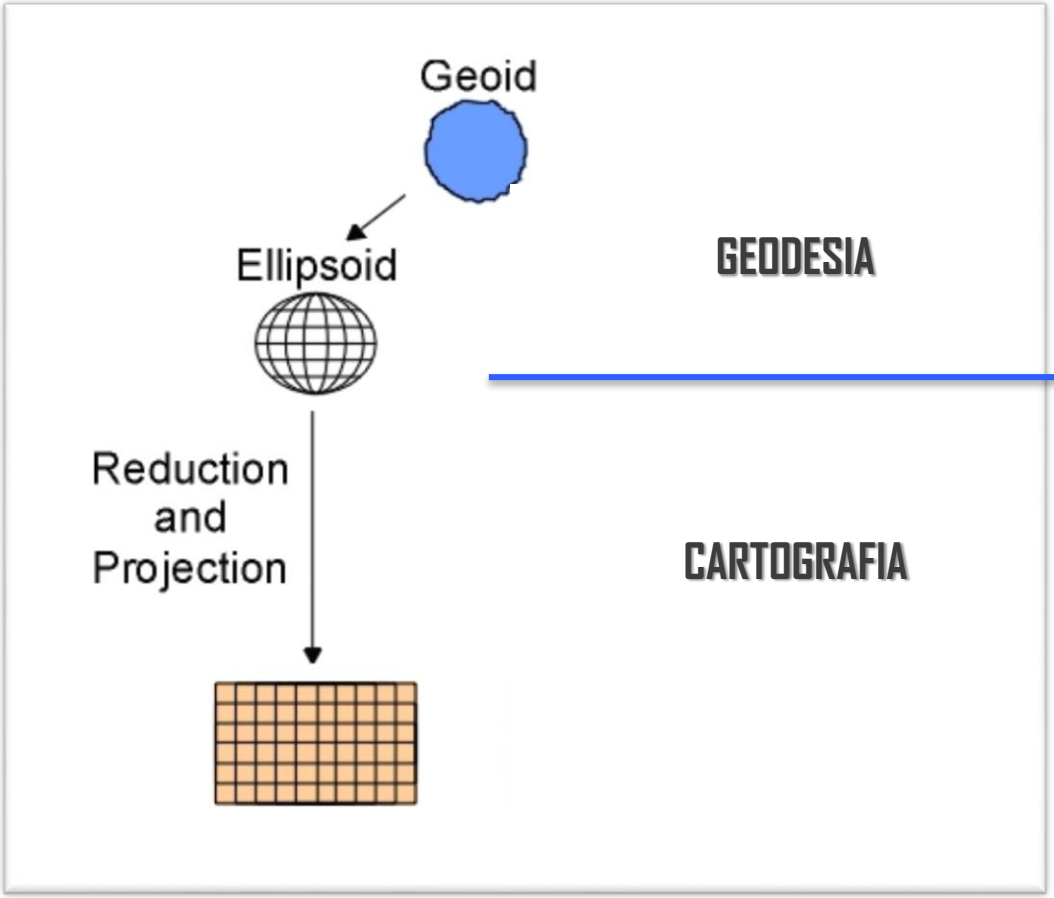
Data geodésicos utilizados em Portugal			
Designação comum	Elipsóide	Ponto de fixação	Observações
Datum Lisboa	Hayford	Castelo de S. Jorge	Obsoleto
Datum 73	Hayford	Melriça	Obsoleto
Datum Porto Santo	Hayford	Porto Santo	Obsoleto
Datum S. Braz	Hayford	S. Braz (Ilha de S. Miguel)	Obsoleto
Datum Base SW	Hayford	Base SW (Ilha Graciosa)	Obsoleto
Datum Observatório	Hayford	Observatório (Ilha das Flores)	Obsoleto
Datum Selvagens	Clarke	Marco astronómico (Selvagem Grande)	Obsoleto
Datum Europeu (ED50)	Hayford	Potsdam (Alemanha)	Obsoleto
WGS84	WGS84	-	Geodesia, sistemas de posicionamento globais
ETRS89/ITRF93	GRS80	-	Geodesia, sistemas de posicionamento globais

1. Fundamentos

A transformação da superfície da Terra numa superfície plana é uma operação complexa que pressupõe:

- a projeção da superfície física da Terra sobre um elipsóide de referência por meio de projetantes normais ao elipsóide em cada um dos seus pontos (método de projeção de Helmert) - **GEODESIA**;
- a projeção dos pontos sobre o elipsóide num plano obedecendo a uma determinada lei (sistema de projeção ou representação), geométrica ou analítica, que traduza a posição de cada um dos pontos na carta, em função da correspondente posição sobre essa superfície - **CARTOGRAFIA**.

1. Fundamentos



GEODESIA

Coordenadas Geodésicas:

Latitude (ϕ)

Longitude (λ)

Altitude elipsoidal (h)

CARTOGRAFIA

Coordenadas Planas

ou Cartográficas:

Distância à Meridiana (M)

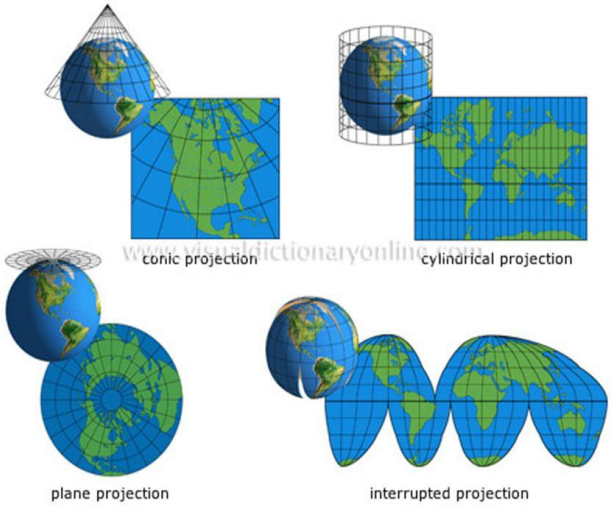
Distância à Perpendicular (P)

Altitude ortométrica ou cota (H)

1. Fundamentos

A construção de uma projeção cartográfica pode considerar-se como o conjunto de duas operações independentes:

- a **redução da superfíce de referência** cartográfica a dimensões apropriadas, através da aplicação de um fator de redução constante (escala natural ou principal da projeção);
- a **planificação desse modelo reduzido** através do processo geométrico ou das fórmulas de transformação características da projeção utilizada.



1. Fundamentos

O **primeiro passo do processo de transformação não envolve qualquer deformação**, as posições relativas de todos os pontos são preservadas e a escala natural constitui uma relação constante entre os comprimentos medidos na superfície de referência e na sua versão reduzida.

O **segundo passo do processo de transformação já implica deformações**, uma vez que nem a esfera nem o elipsóide são planificáveis. Estas deformações vão afetar as propriedades geométricas da superfície de referência, ***alterando a forma e as dimensões dos objetos*** que nela estão projetados, bem como **as posições relativas entre eles.**

1. Fundamentos

O caminho mais curto entre dois pontos sobre uma superfície esférica é um **arco de circunferência** e o caminho mais curto entre dois pontos sobre um plano é um **segmento de reta**.

Seria então desejável que:

- toda a projeção representasse os arcos de círculo máximo como segmentos de reta;
- os seus comprimentos fossem iguais às correspondentes distâncias sobre o modelo reduzido;
- os ângulos de cada um desses segmentos, com os diferentes meridianos, fossem conservados.

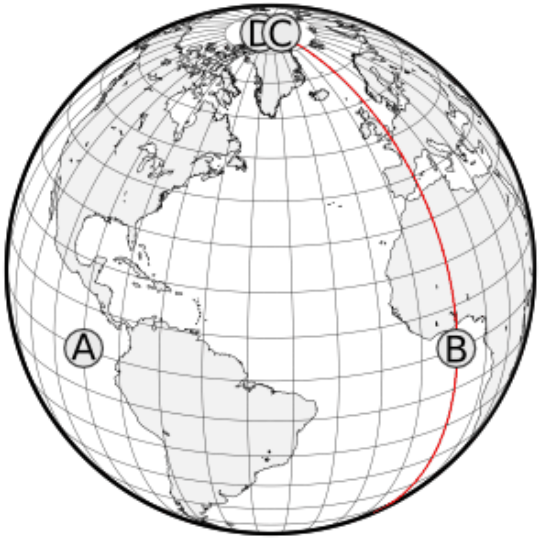
1. Fundamentos

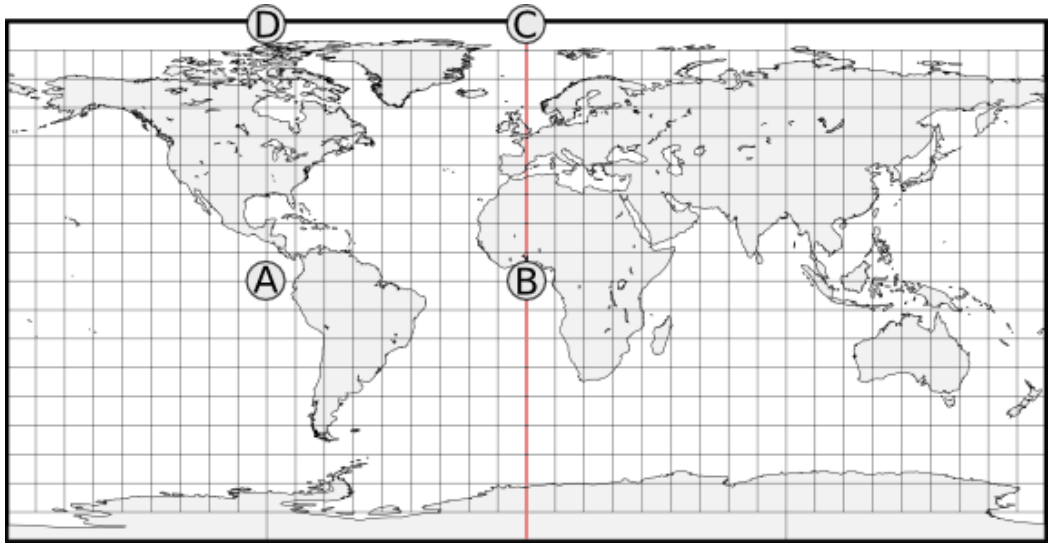
No entanto, **tal projeção não existe**, uma vez que nem a superfície esférica nem a superfície elipsoidal são planificáveis.

Na realidade, dos três requisitos atrás formulados **apenas o primeiro pode ser observado em algumas projeções** e, mesmo assim, com enormes sacrifícios no que diz respeito à observância dos outros dois.

Dado isto, **toda a projeção cartográfica envolve deformações**.

1. Fundamentos





Projeção cilíndrica equidistante que mostra a distorção nas distâncias: as distâncias AB, BC e AC são iguais na superfície terrestre, e a distância DC = 0 uma vez que ambos os pontos se localizam no polo.

1. Fundamentos

A "propriedade" de uma projeção não é mais do que a manutenção de um determinado atributo (ângulos, distâncias, áreas ou direções), dado que não é possível conservá-los a todos.

Projeções conformes

Quando a forma dos pequenos objetos é preservada, ou seja, quando a escala da projeção em qualquer ponto é a mesma em todas as direções. Neste caso, os paralelos e os meridianos são representados como linhas perpendiculares entre si e os **ângulos em torno de qualquer ponto são mantidos**.

Exemplos: a projeção de Mercator, a projeção transversa de Mercator (Gauss e UTM), a projeção cónica conforme de Lambert e a projeção estereográfica.

1. Fundamentos

O facto de a escala ser igual em todas as direções não implica que:

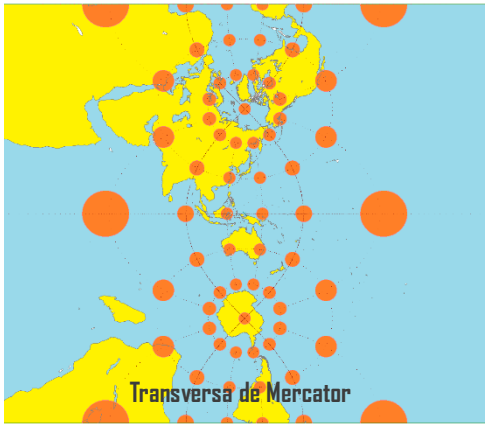
- **ela não possa variar de ponto para ponto**, o que acontece em todas as projeções cartográficas, e em particular nas que são conformes;

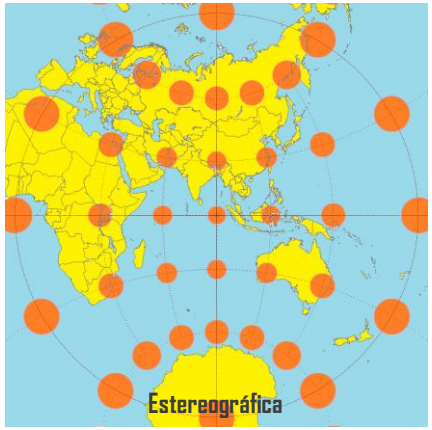
- **a forma dos objetos com dimensões apreciáveis**, tais como os continentes, não seja afetada pelo facto de a escala variar com a posição (apenas a forma de objetos com dimensões infinitesimais é preservada).

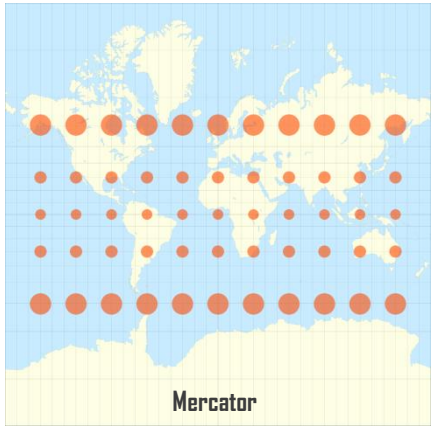
1. Fundamentos

Projeções conformes

Exemplos: a projeção de Mercator, a projeção transversa de Mercator (Gauss e UTM), a projeção cónica conforme de Lambert e a projeção estereográfica.







1. Fundamentos

Projeções equivalentes

Quando as proporções entre áreas são preservadas.

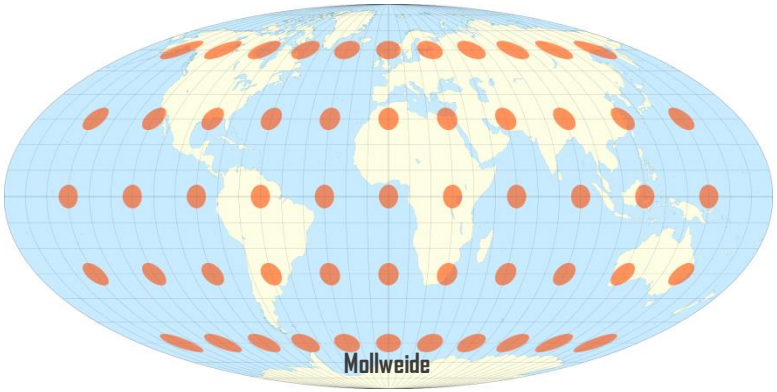
Como não é possível uma projeção cartográfica ser, simultaneamente, conforme e equivalente, **a equivalência é sempre acompanhada de uma maior ou menor deformação angular**, em resultado de a escala variar com a direção.

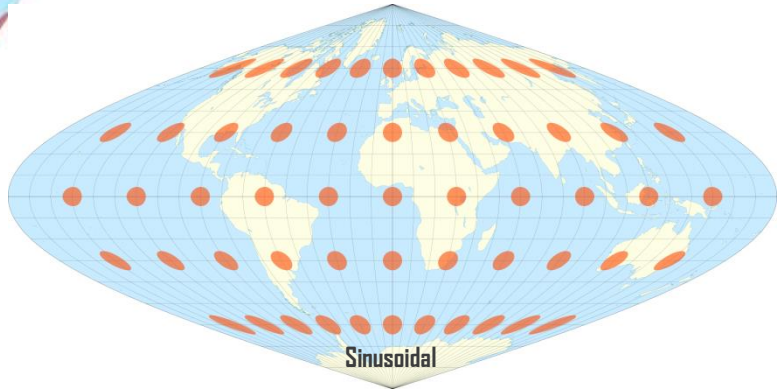
Exemplos: as projeções cónicas e azimutais equivalentes, a projeção de Bonne, a projeção de Mollweide, a projeção sinusoidal e a projeção de Eckert IV.

1. Fundamentos

Projeções equivalentes

Exemplos: as projeções cónicas e azimutais equivalentes, a projeção de Bonne, a projeção de Mollweide, a projeção sinusoidal e a projeção de Eckert IV.





1. Fundamentos

Projeções equidistantes

Quando a escala natural da projeção é mantida ao longo de uma determinada direção: este-oeste, norte-sul ou qualquer outra.

Projeções equidistantes meridianas: quando a escala é conservada ao longo dos meridianos.

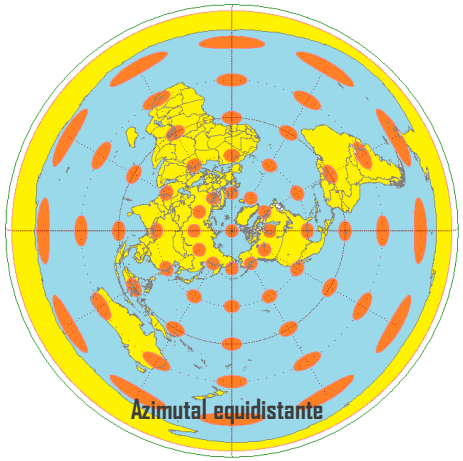
Projeções equidistantes transversais: quando a escala é conservada ao longo dos paralelos.

Exemplos: projeção azimutal equidistante e a projeção cónica equidistante meridiana, ou a projeção cónica simples.

1. Fundamentos

Projeções equidistantes

Exemplos: projeção azimutal equidistante e a projeção cónica equidistante meridiana, ou a projeção cónica simples.



Todos os pontos no mapa estão a distâncias proporcionais a partir do ponto central e, ainda, todos os pontos no mapa têm um azimute (direção) correto a partir do ponto central.

1. Fundamentos

Projeções azimutais

Quando as direções (azimutes) à superfície da Terra são conservadas a partir de determinados pontos.

Este tipo de projeção é particularmente conveniente quando interessa representar ou medir rumos e azimutes a partir de uma certa posição.

É também possível, manipulando a lei de variação da escala a partir do centro, construir projeções azimutais com propriedades adicionais, como a equidistância, a equivalência ou a conformidade, **dando origem às projeções azimutais equidistantes, equivalentes e conformes**, respetivamente.

https://www.youtube.com/watch?v=wIfLW1j05Dg

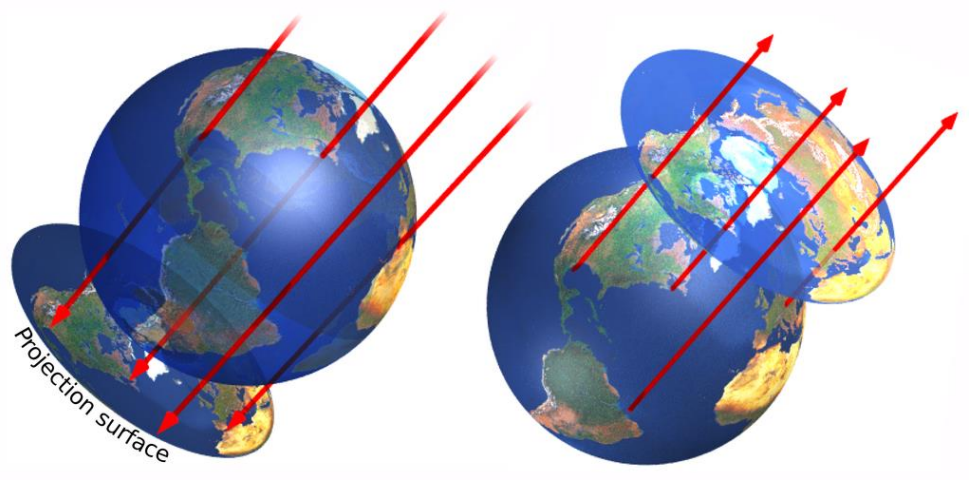
https://www.youtube.com/watch?v=kIID5FDi2JQ

1. Fundamentos

Quanto às propriedades das projeções	
Conformes	Quando a escala local é independente da direção
Equivalentes	Quando as proporções entre as áreas dos objetos são conservadas
Afiláticas	Quando não são conformes nem equivalentes
Equidistantes	Quando a escala linear é conservada ao longo de determinadas linhas
Azimutais	Quando os azimutes são conservados a partir de determinados pontos

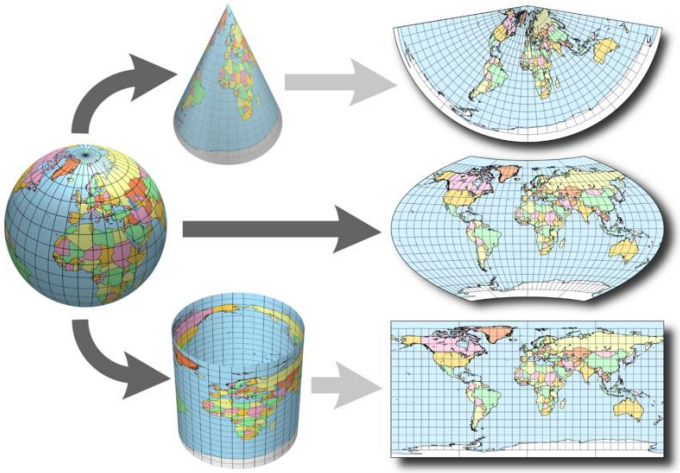
1. Fundamentos

Quanto à forma de construção das projeções	
Geométricas	Quando se baseiam no conceito de superfície de projeção, sobre a qual os pontos do modelo da Terra são projetados, segundo processos que podem (projeções perspetivas) ou não (analíticas) ser puramente geométricos
Geométricas modificadas	Quando, embora utilizando o mesmo conceito básico das projeções geométricas, lhe introduzem alterações que modificam a geometria e as propriedades caraterísticas de cada classe
Convencionais	Quando a sua construção é inteiramente baseada em critérios formulados matematicamente



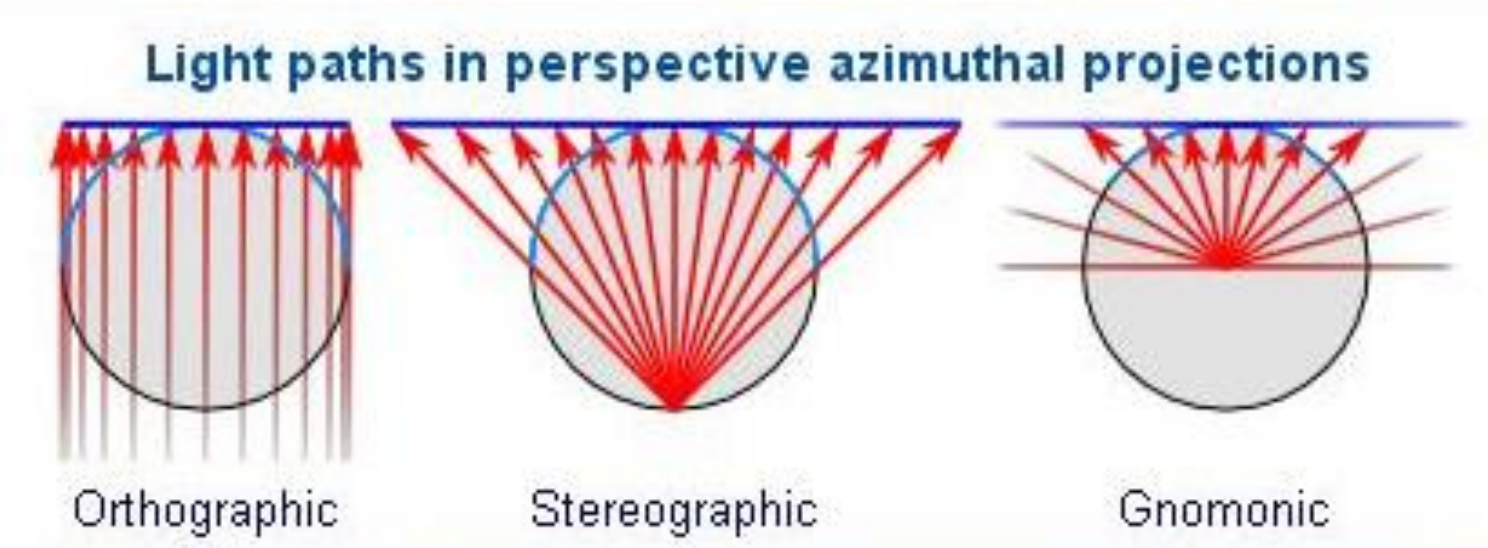
1. Fundamentos

Quanto à superfície de projeção	
Azimutais ou planas	Quando a superfície de projeção é um plano
Cónicas	Quando a superfície de projeção é um cone
Cilíndricas	Quando a superfície de projeção é um cilindro



1. Fundamentos

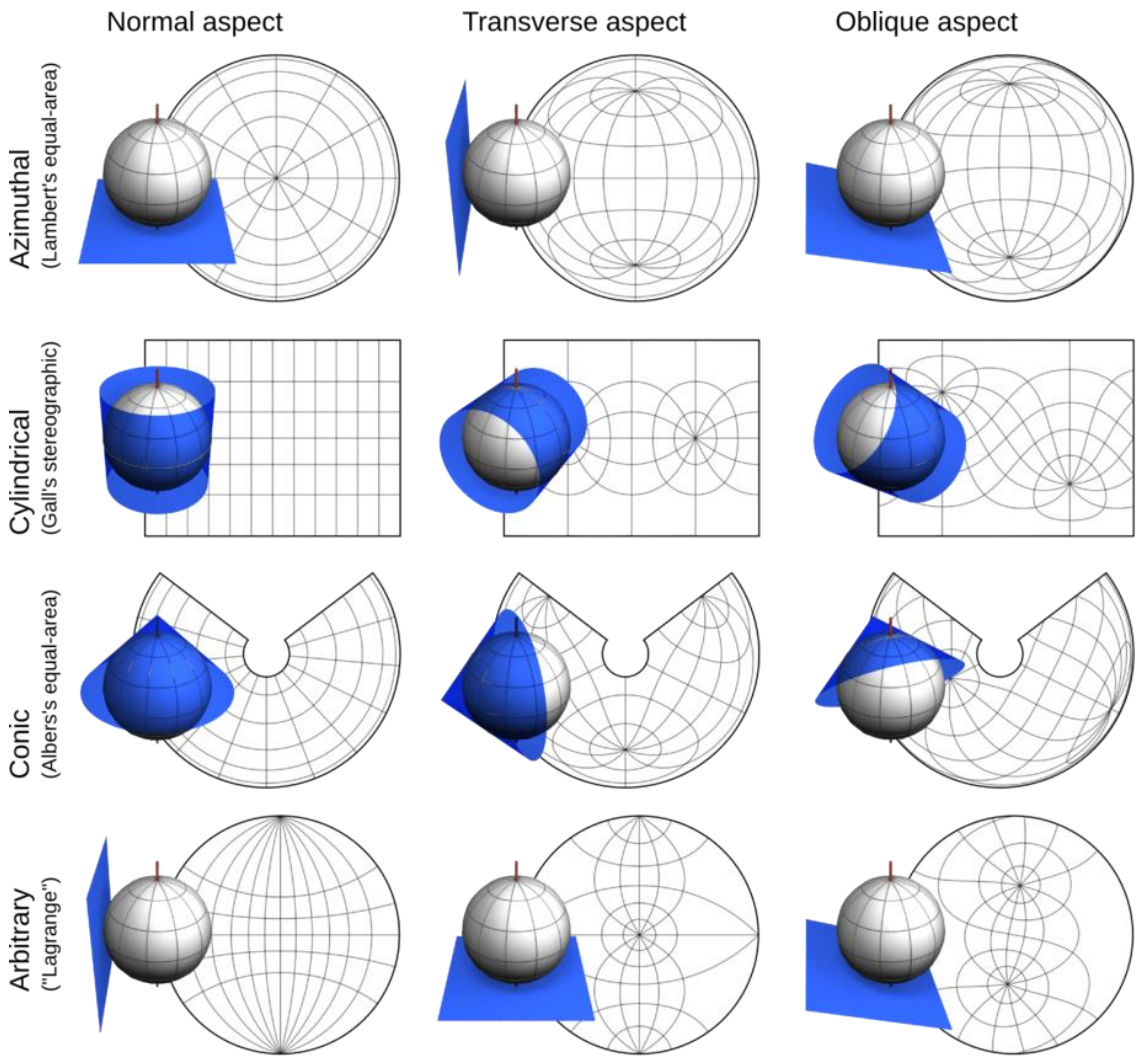
Quanto ao tipo de perspetiva das projeções	
Centrográficas ou gnomónicas	Quando o centro da perspetiva é o centro do modelo
Estereográficas	Quando o centro da perspetiva se situa sobre a superfície do modelo
Ortográficas	Quando o centro da perspetiva se situa no infinito



1. Fundamentos

Quanto à orientação da superfície de projeção	
Normais	Quando o eixo da superfície de projeção coincide com o eixo da Terra
Polares	Nas projeções cónicas e azimutais, o mesmo que normais
Equatoriais	Nas projeções azimutais e cilíndricas, o mesmo que normais
Transversas	Quando o eixo da superfície de projeção é perpendicular ao eixo da Terra
Meridianas	Nas projeções azimutais e cilíndricas, o mesmo que transversais
Oblíquas	Quando o eixo da superfície de projeção é oblíquo em relação ao eixo da Terra

1. Fundamentos



1. Fundamentos

Quanto à geometria da rede de meridianos e paralelos grupos e classes segundo Maling (1992)		
Grupo A	Meridianos e paralelos curvilíneos	Projeções policónicas
Grupo B	Meridianos retilíneos, paralelos curvilíneos	
Grupo C	Meridianos curvilíneos, paralelos retilíneos (coordenadas retangulares) ou circulares (coordenadas polares)	Projeções pseudocilíndricas Projeções pseudoazimutais Projeções pseudocónicas
Grupo D	Meridianos retilíneos, paralelos retilíneos (coordenadas retangulares) ou circulares (coordenadas polares)	Projeções cilíndricas Projeções azimutais Projeções cónicas

1. Fundamentos

Para facilitar o estabelecimento de um esquema de classificação para as projeções cartográficas devem considerar-se os seguintes aspetos:

- o objeto projetado ou **superfície datum**;
- a superfície de projeção na qual a superfície datum é projetada - **problema extrínseco**;
- a projeção ou representação *per si* - **problema intrínseco**.

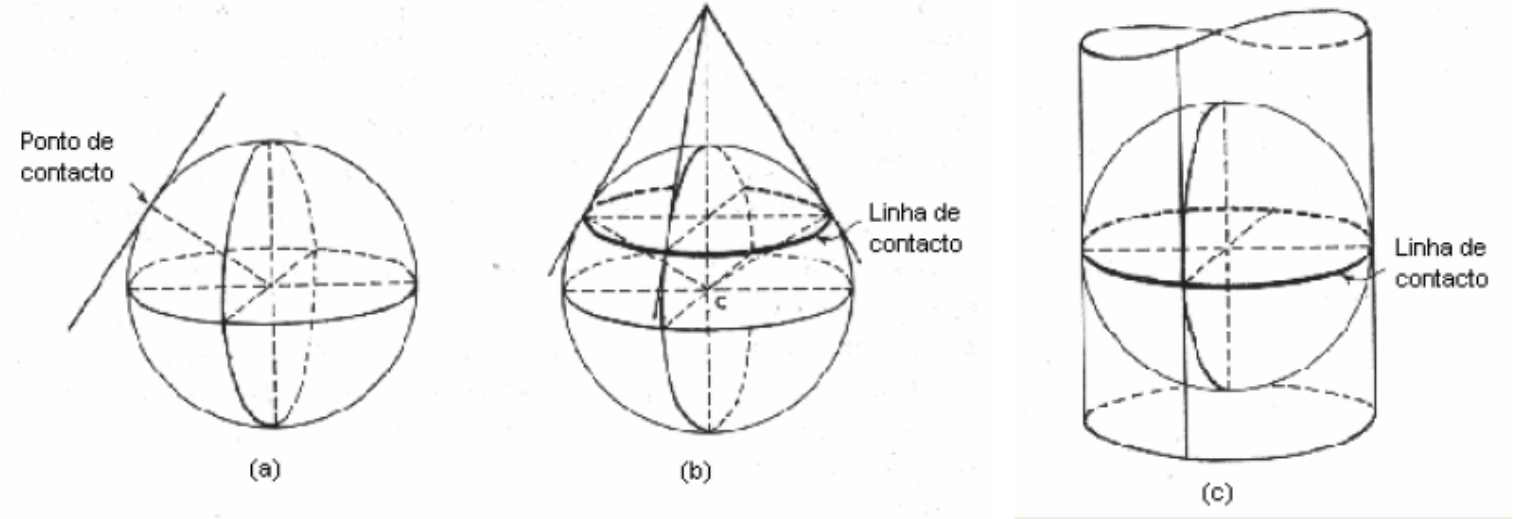
1. Fundamentos

Problema extrínseco	
Natureza	Natureza da superfície de projeção definida como figura geométrica
Coincidência	Contato da superfície de projeção com a superfície datum
Posição	Alinhamento da superfície de projeção relativamente à superfície datum

1. Fundamentos

Natureza

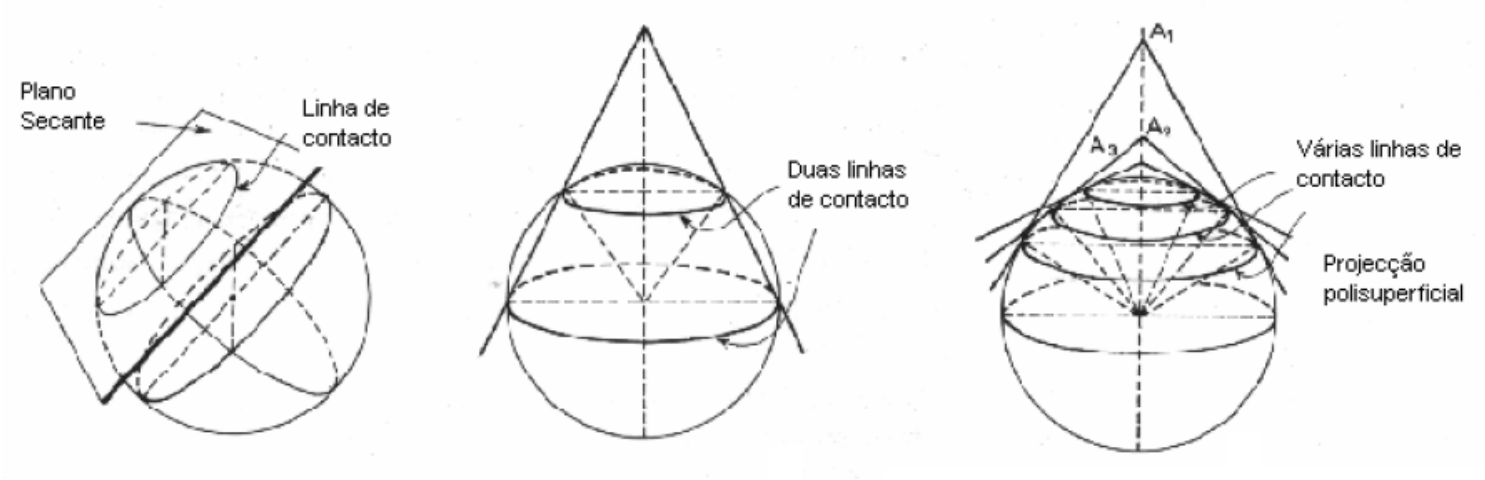
Plano	Superfície mais simples, que quando tangente à superfície datum tem apenas um ponto de contato ao qual corresponde o centro da área de mínima distorção
Cone	O cone e o cilindro, que são ambos planificáveis, aumentam a extensão de contato e, consequentemente, a área de distorção mínima
Cilindro	



1. Fundamentos

Coincidência

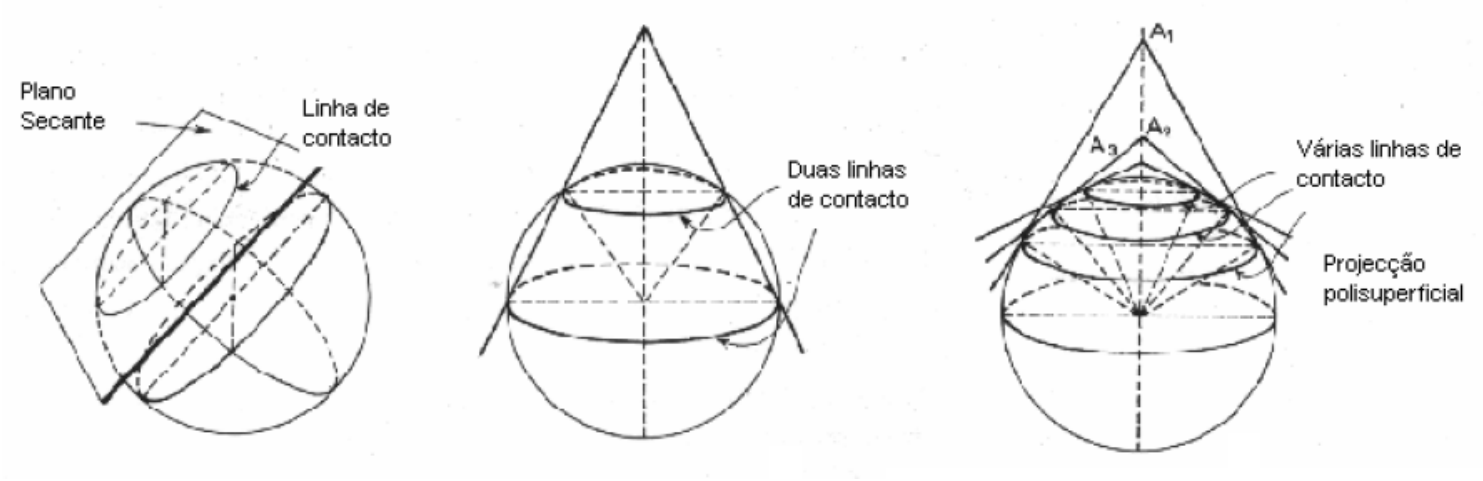
Tangente	A tangência entre a superfície datum e a superfície de projeção resulta num ponto, no caso do plano, ou numa linha de contato, no caso do cone e do cilindro
Secante	A secante aumenta a área de contato entre as duas superfícies e consequentemente a área de distorção mínima, resultando numa linha de contato (em vez de um ponto), no caso do plano, e em duas linhas de contato, no caso do cone e do cilindro



1. Fundamentos

Coincidência

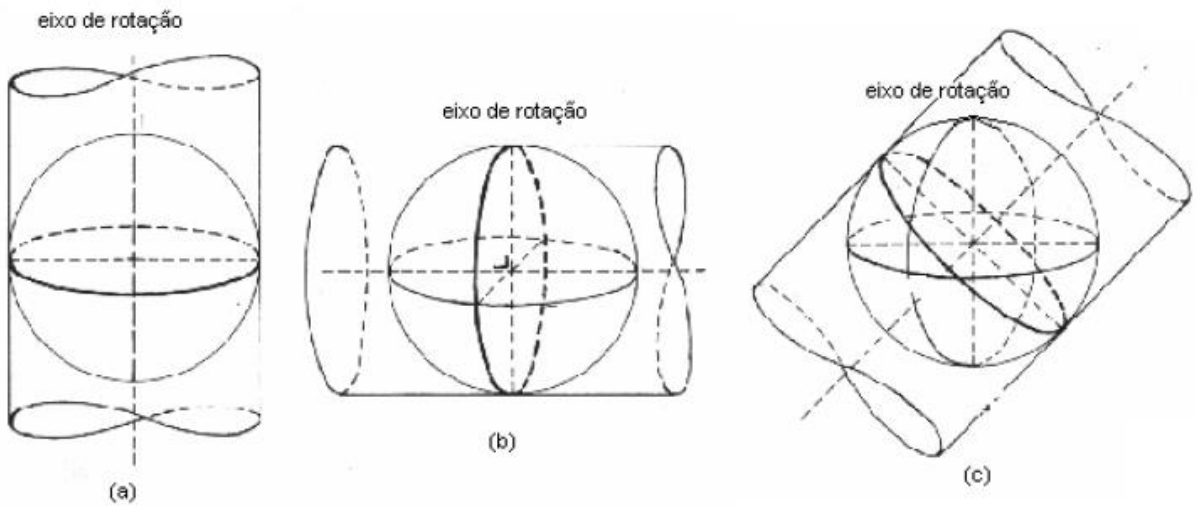
Polisuperficial	Para uma ainda maior área de contato e área de distorção mínima é utilizado o contato múltiplo, isto é uma série de sucessivas superfícies de projeção; uma série de sucessivos planos produz uma **projeção poliédrica**, uma série de cones uma **projeção policónica** e uma série de cilindros uma **projeção policilíndrica**



1. Fundamentos

Posição

Normal	Quando o eixo de simetria da superfície de projeção coincide com o eixo de rotação do elipsóide ou da esfera
Transversa	Quando o eixo de simetria da superfície de projeção é perpendicular ao eixo de rotação do elipsóide ou da esfera
Oblíqua	Todas as outras atitudes do eixo de simetria são consideradas oblíquas



1. Fundamentos

Problema intrínseco	
Propriedades cartográficas	Representa os três critérios cartográficos básicos para a caraterização das projeções (equidistância, conformidade ou equivalência)
Tipo de construção	Representa os três principais modos de construção das projeções (geométricas, geométricas modificadas ou convencionais)

1. Fundamentos

Esquema de Classificação				
	Classes	**Variedades**		
Superfície de projeção (problema extrínseco)	**Natureza**	Plana ou azimutal	Cónica	Cilíndrica
	Coincidência	Tangente	Secante	Polisuperficial
	Posição	Normal	Transversa	Oblíqua
Projeção (problema intrínseco)	**Propriedades**	Equidistante	Equivalente	Conforme
	Tipo de construção	Geométrica	Semi-geométrica	Convencional

1. Fundamentos

	Projeção de Bonne	Projeção de Mercator	Projeção de Gauss (Transversa de Mercator)	Projeção UTM (Universal Tranversa de Mercator)
Natureza	Cónica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica
Coincidência	Tangente	Tangente	Tangente	Secante
Posição	Normal	Normal	Tranversa	Tranversa
Propriedades	Equivalente	Conforme	Conforme	Conforme
Tipo de construção	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional

2. Sistemas de coordenadas

2.1. Coordenadas planas

2.2. A geometria do elipsóide - coordenadas geográficas

2.3. Sistemas de projeção utilizados na cartografia nacional

2. Sistemas de coordenadas

Os sistemas de coordenadas são necessários para **expressar a posição de pontos sobre uma qualquer superfície**, seja ela o elipsóide, a esfera ou o plano.

Sistemas de coordenadas planas

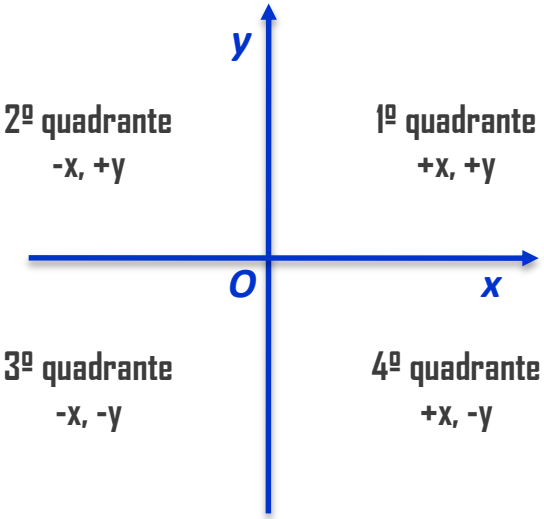
Os sistemas de coordenadas planas aplicam-se às representações planas da superfície da Terra.

De entre estes, destacam-se os sistemas de **coordenadas retangulares** e os sistemas de **coordenadas polares**.

2. Sistemas de coordenadas

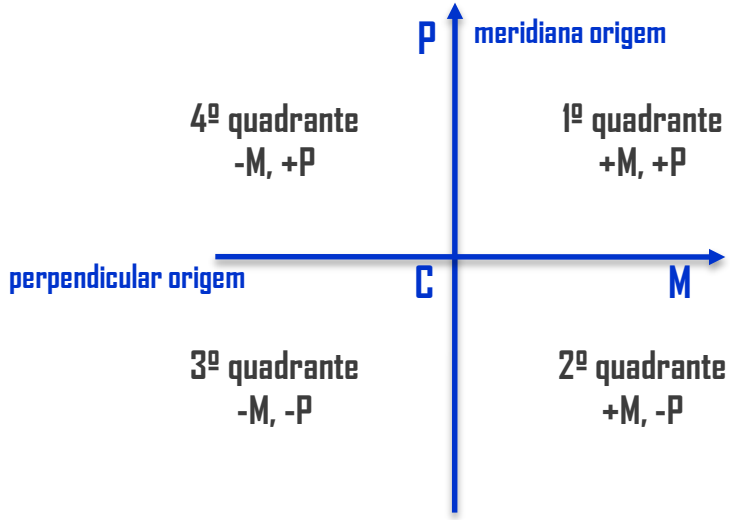
Sistema de coordenadas retangulares

Um sistema de coordenadas cartesianas retangulares planas ou, mais simplesmente, um **sistema de coordenadas retangulares**, é todo aquele que utiliza duas medidas de distância retilínea (x,y) a dois eixos perpendiculares entre si, chamados eixos coordenados, para referenciar a posição de um ponto.



2. Sistemas de coordenadas

- O eixo das ordenadas (meridiana origem) deve coincidir com o meridiano central da projeção;
- O eixo das abcissas (perpendicular origem) é normal à meridiana origem num ponto C designado por ponto central.



M (distância à meridiana)

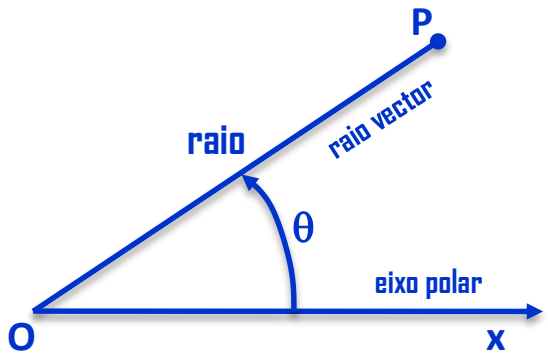
P (distância à perpendicular)

expressas em unidades métricas

2. Sistemas de coordenadas

Sistema de coordenadas polares

As coordenadas polares são uma forma alternativa de referenciar posições no plano, através de uma distância (raio) e de um ângulo (θ). Neste sistema utiliza-se um único eixo coordenado, designado por eixo polar.



raio (distância à origem do eixo polar)

expressa em unidades métricas

θ (ângulo entre o eixo polar e o raio vetor)

expresso em unidades angulares

2. Sistemas de coordenadas

Coordenadas retangulares *versus* coordenadas polares

- as coordenadas retangulares são mais apropriadas para a construção de projeções cilíndricas, em que os meridianos e os paralelos são retilíneos e perpendiculares entre si;
- as coordenadas polares são mais apropriadas para a construção de projeções cónicas a azimutais, em que os meridianos são retilíneos e concorrentes num ponto, e os paralelos são circunferências concêntricas nesse mesmo ponto.

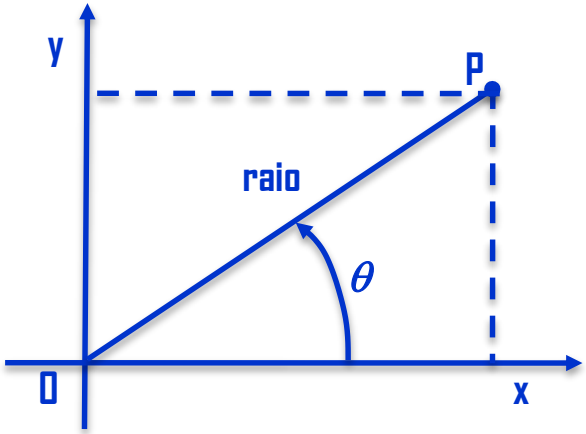
2. Sistemas de coordenadas

Transformação de coordenadas retangulares em coordenadas polares

As seguintes expressões permitem converter um par de coordenadas polares (raio, θ) num par de coordenadas retangulares (x, y), em que a origem é comum e o eixo polar coincide com o eixo das abcissas.

$$x = raio \cdot \cos\theta$$

$$y = raio \cdot \sin\theta$$

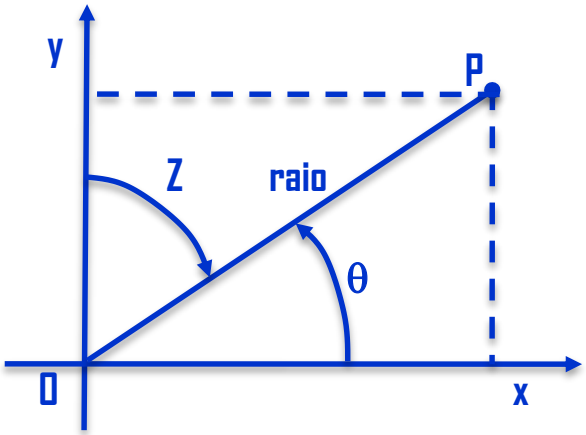


2. Sistemas de coordenadas

A conversão entre o sistema de coordenadas polares (raio, θ), utilizado em trigonometria, e o sistema (raio, Z), utilizado em cartografia e navegação, consiste simplesmente em substituir o ângulo θ, entre o eixo das abcissas e o raio vetor, medido no sentido contrário aos ponteiros do relógio, por um ângulo Z= 90° - θ, entre o eixo das ordenadas e o raio vetor, medido no sentido dos ponteiros do relógio.

$$x = raio \cdot \cos\theta = raio \cdot \cos(90° - Z) = raio \cdot \sin Z$$

$$y = raio \cdot \sin\theta = raio \cdot \sin(90° - Z) = raio \cdot \cos Z$$

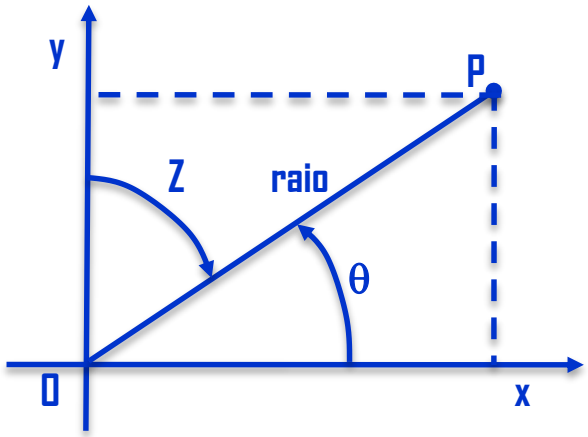


2. Sistemas de coordenadas

Alternativamente, um par de coordenadas rectangulares (x, y) pode ser convertido num par de coordenadas polares (raio, θ), ou num par de coordenadas polares (raio, Z), através das expressões.

$$\tan\theta = \frac{y}{x} \qquad \tan Z = \frac{x}{y}$$

$$\text{raio} = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{x}{\cos\theta} = \frac{x}{\sin Z}$$



2. Sistemas de coordenadas

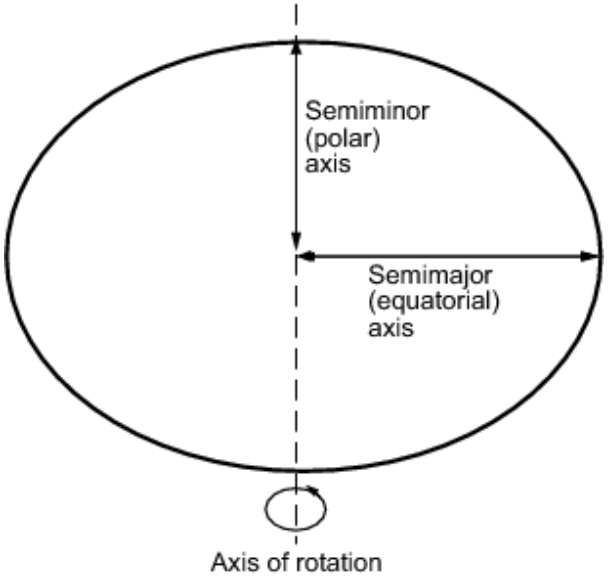
O **elipsóide de revolução** é a figura resultante da rotação de uma elipse em torno de um dos seus eixos.

Os elipsóides utilizados como modelos da Terra resultam da rotação de uma elipse, dita elipse meridiana, em torno do seu eixo menor, o qual representa o eixo de rotação da Terra.

Um elipsóide pode ser definido de forma inequívoca através de 2 parâmetros:

- **semieixo maior** (a);
- **semieixo menor** (b);

da elipse meridiana.



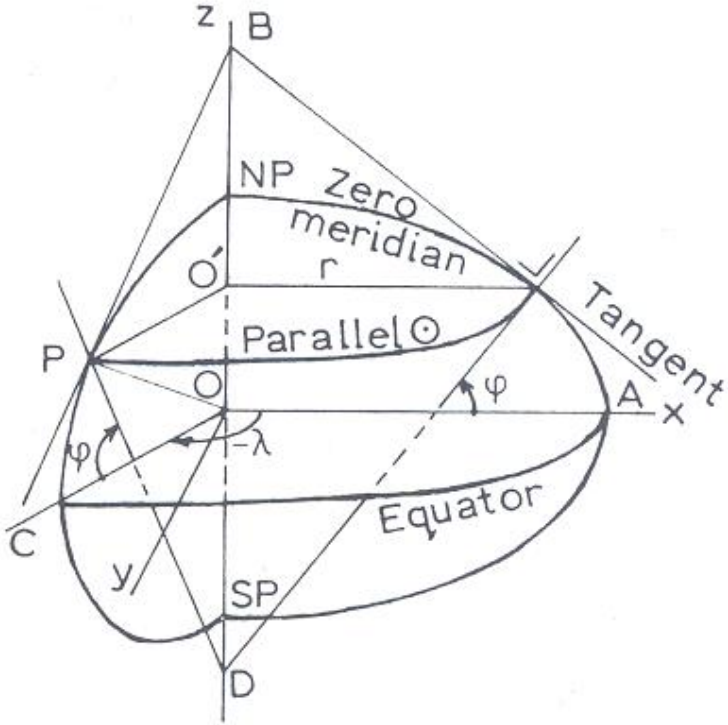
2. Sistemas de coordenadas

Outros parâmetros de utilização comum são o **achatamento** (f) e a **excentricidade** (e) do elipsóide, os quais são definidos pelas seguintes expressões:

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

$$e = \sqrt{\frac{a^2-b^2}{a^2}}$$

$$e^2 = 1-(1-f)^2 = f\cdot(2-f)$$



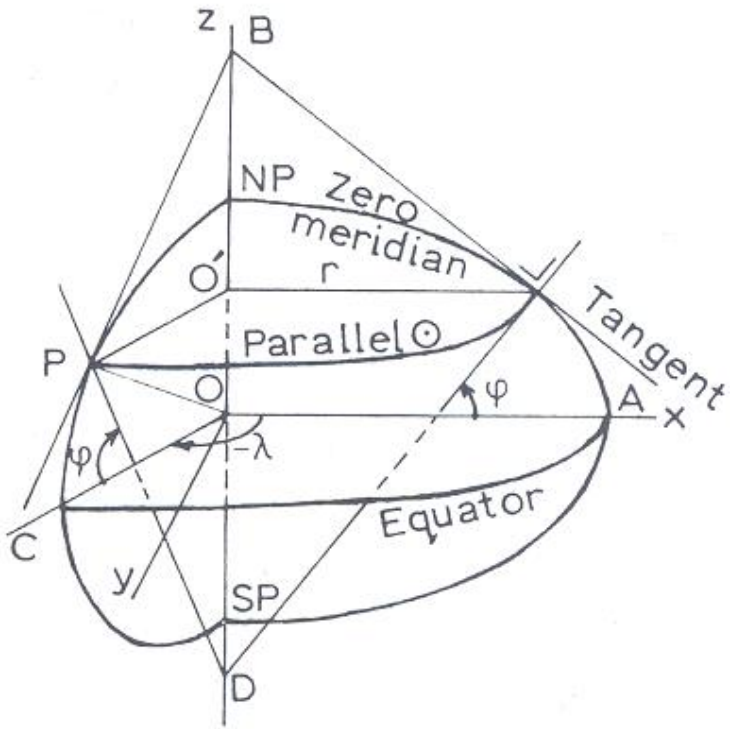
2. Sistemas de coordenadas

A equação do elipsóide num sistema de coordenadas cartesianas tridimensional é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{X^2+Y^2}{a^2}+\frac{Z^2}{b^2}=1$$

em coordenadas polares por:

$$X = N\cos\varphi\cos\lambda$$
$$Y = N\cos\varphi\sin\lambda$$
$$Z = N\left(1-e^2\right)\sin\varphi$$



2. Sistemas de coordenadas

O elipsóide de revolução tem graus de curvatura variáveis, quer com a posição, quer com a direção considerada:

- o **raio de curvatura do meridiano** (ρ), definido no plano do meridiano, e;

$$\rho = \frac{a\left(1-e^2\right)}{\left(1-e^2\sin^2\varphi\right)^{3/2}}$$

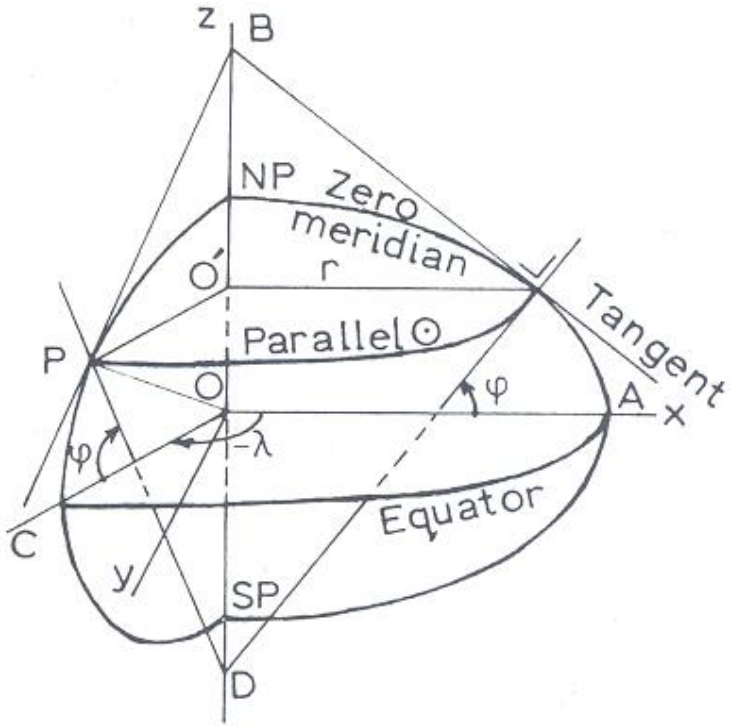
- o **raio de curvatura segundo a primeira vertical** (N), definido num plano que é perpendicular ao plano do meridiano.

$$N = \frac{a}{\left(1-e^2\sin^2\varphi\right)^{1/2}}$$

2. Sistemas de coordenadas

O raio do círculo paralelo que passa por P (r) com φ constante é dado pela seguinte expressão:

$$PO' = N\cos\varphi = r$$



2. Sistemas de coordenadas

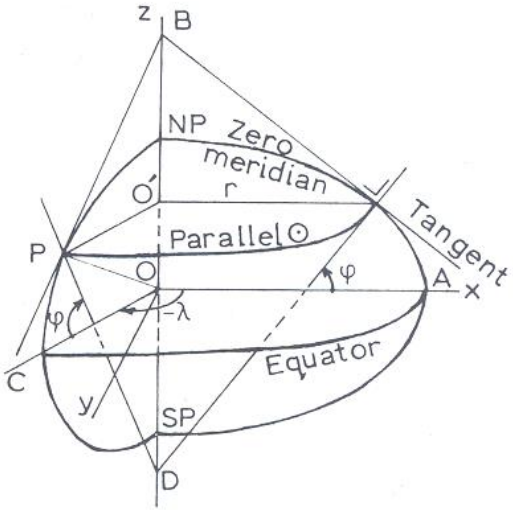
Coordenadas geográficas no elipsóide

Os sistemas de coordenadas geográficas aplicam-se a modelos tridimensionais, tais como a esfera e o elipsóide de revolução.

As coordenadas geográficas no elipsóide designam-se por:

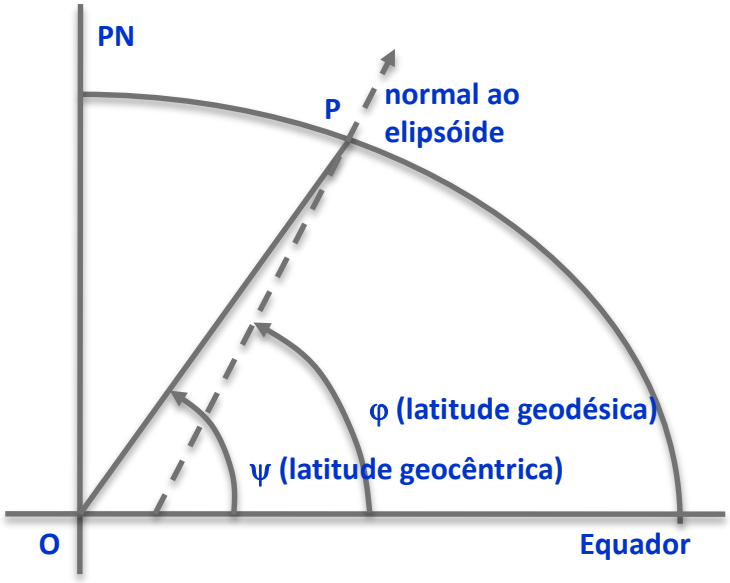
- **latitude geodésica** (φ): ângulo entre a normal ao elipsóide PD em P e o eixo equatorial CO;
- **longitude geodésica** (λ): ângulo contado no plano do equador desde o meridiano de referência e o meridiano que passa por P;

sendo expressas em graus, minutos e segundos de arco.



2. Sistemas de coordenadas

Um outro parâmetro por vezes utilizado é a **latitude geocêntrica** (ψ), definida como o ângulo entre o plano do equador e a linha que une o centro do elipsóide com a posição à superfície.



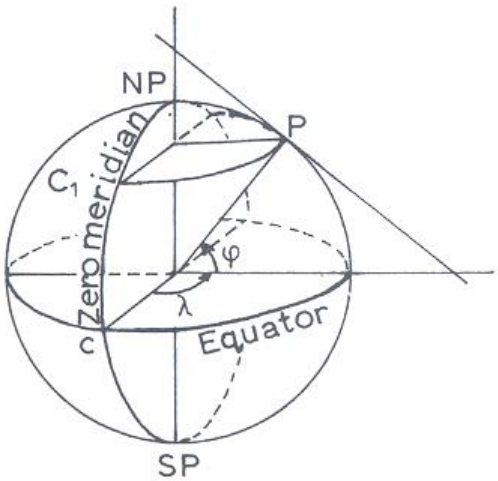
2. Sistemas de coordenadas

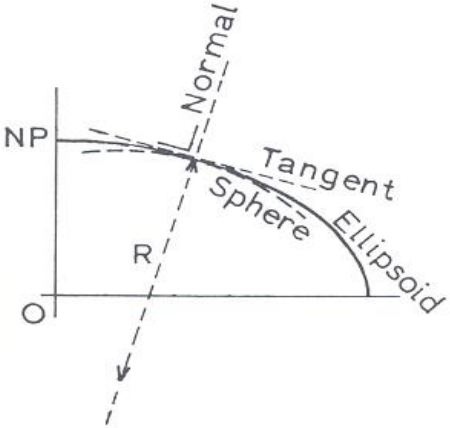
Todas as expressões anteriores são válidas para a esfera. Considerando e = 0, existe um único raio de curvatura

$$\rho = N = R$$

e a **latitude geodésica** (φ) coincide

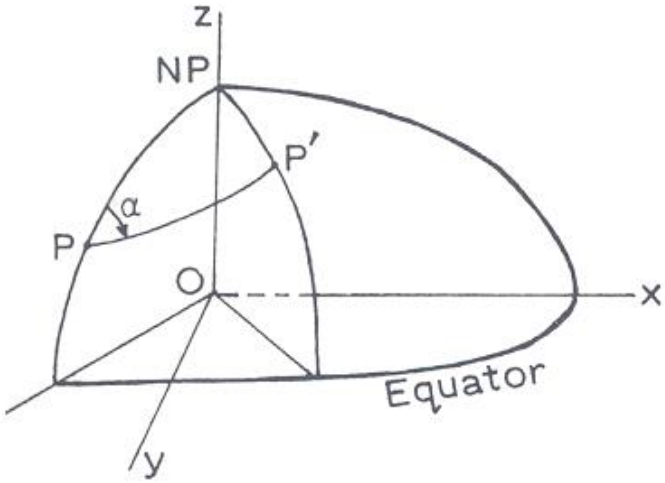
com a **latitude geocêntrica** (ψ).





2. Sistemas de coordenadas

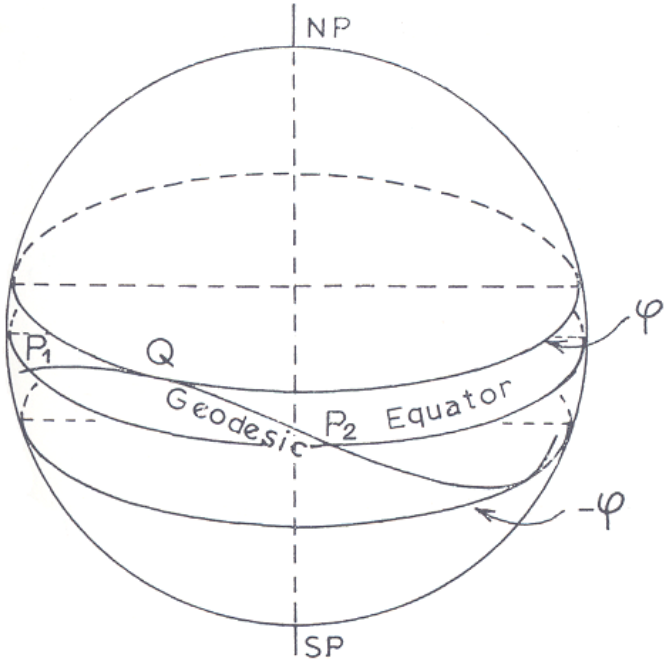
O **azimute** de um dado arco PP′ sobre uma superfície corresponde ao ângulo α contado no sentido dos ponteiros do relógio a partir da direção Norte.



2. Sistemas de coordenadas

Linhas com propriedades especiais - a geodésica, o círculo máximo e a ortodrómica

A **geodésica** corresponde ao caminho mais curto entre dois pontos P_1 e P_2 sobre a superfície do elipsóide; progredindo ao longo desta linha curva, o azimute (α) da tangente a cada ponto muda continuamente.

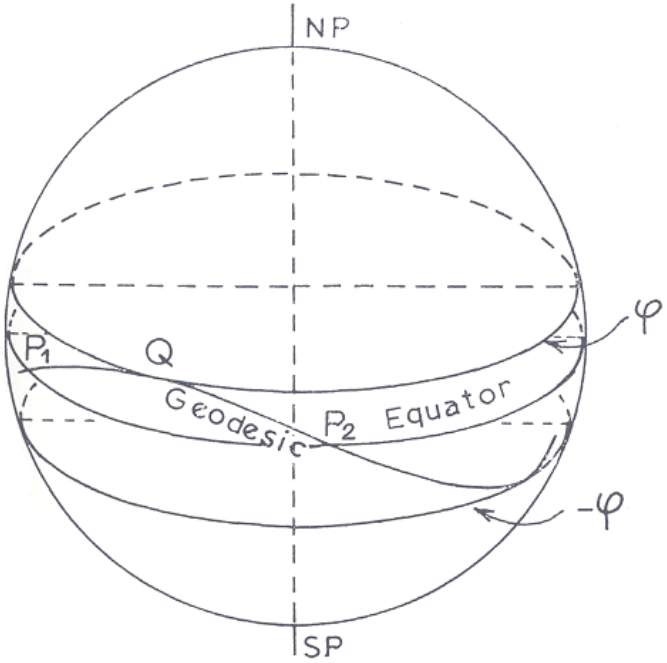


2. Sistemas de coordenadas

Em cada ponto P da **geodésica** existe a seguinte relação de acordo com o **teorema de Clairaut**:

$$r \sin\alpha = N \cos\varphi \sin\alpha = c \text{ (constante)}$$

(o produto do raio do círculo paralelo de P pelo seno do azimute de uma geodésica é uma constante)



2. Sistemas de coordenadas

- Para $\varphi = 0$, $N = a$ (a geodésica interseta o equador)

$$\alpha = \arcsin\frac{c}{a}$$

- Para $\alpha = 90°$ (existem 2 valores para φ simétricos em relação ao equador)

$$N\cos\varphi = c$$
$$N\cos(-\varphi) = c$$

- Para $\alpha = 0$ (φ é indeterminado, o meridiano é uma geodésica)

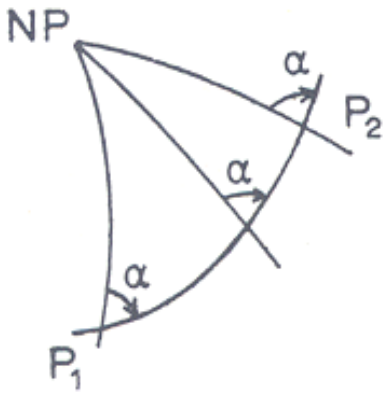
2. Sistemas de coordenadas

- Caso P_1 e P_2 tenham uma diferença em longitude de 180° ($\lambda_2 - \lambda_1 = 180°$), o caminho mais curto entre esses 2 pontos é ao longo de uma secção meridional que passe por um dos polos;
- Os círculos paralelos não são geodésicas, embora o teorema de Clairaut seja satisfeito;
- No caso da esfera, o caminho mais curto entre 2 pontos é parte de um círculo máximo;
- A geodésica só é projetada como uma linha reta nas projeções gnomónicas (à projeção da geodésica é dado o nome de ortodrómica).

2. Sistemas de coordenadas

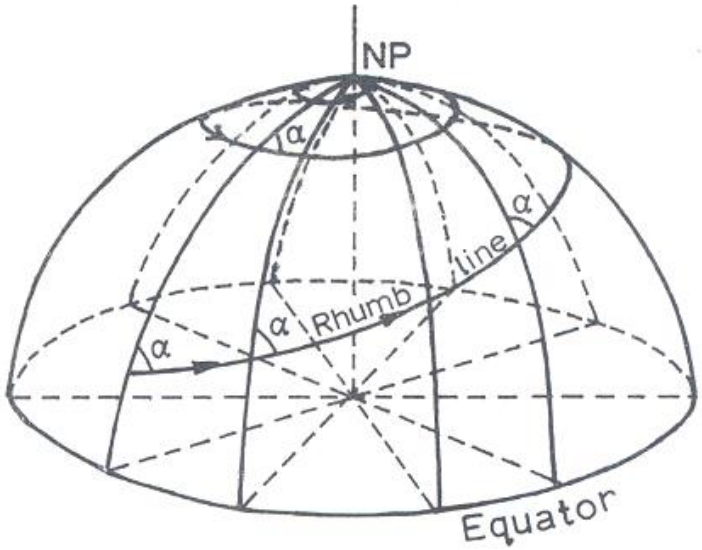
A **loxodrómica** entre dois pontos P_1 e P_2 é uma curva que interseta os meridianos com um azimute (α) constante.

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\log \mathrm{tg}(45° + \frac{1}{2}\varphi_2) - \log \mathrm{tg}(45° + \frac{1}{2}\varphi_1)}$$



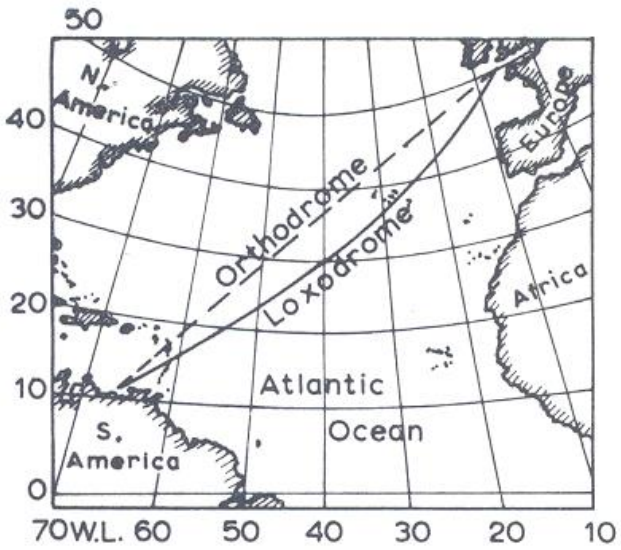
2. Sistemas de coordenadas

- Se $\varphi_1 = \varphi_2$, tg $\alpha=\infty$ ou $\alpha= 90°$, resultando num círculo paralelo;
- Se $\lambda_1 = \lambda_2$, $\alpha= 0$, resultando num meridiano;
- Se $\varphi = 90°$, $\lambda_2 - \lambda_1$ tende para infinito, resultando numa espiral na direção do polo.

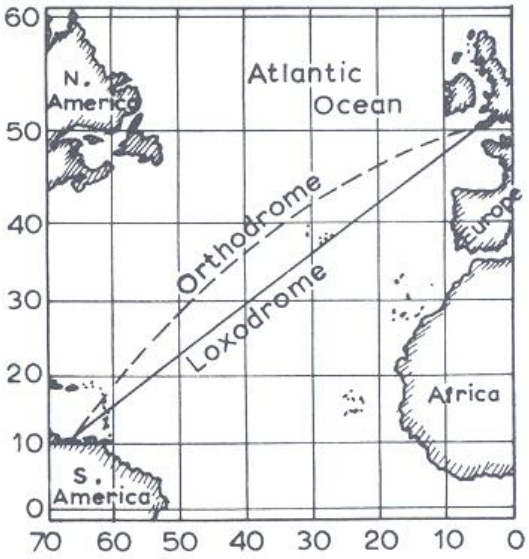


2. Sistemas de coordenadas

A **loxodrómica** é de especial importância na navegação dado que é projetada como uma linha reta entre pontos na projeção **cilíndrica conforme de Mercator**.



Projecção gnomónica



Projecção de Mercator

2. Sistemas de coordenadas

Um sistema de representação plana é definido por:

- um datum geodésico (elipsoidal ou esférico);
- uma projeção;
- uma origem para a projeção;
- uma origem para as coordenadas retangulares;
- outros parâmetros, tais como a indicação das linhas onde se conserva a escala ou de um fator de escala.

2. Sistemas de coordenadas

Hayford-Gauss/ Datum Lisboa	*Hayford-Gauss/ Datum 73*	*PT-TM06/ETRS89*
Hayford ou Internacional	Hayford ou Internacional	GRS80
Antigo V.G. do Castelo de São Jorge em Lisboa	V.G. Melriça	-
Gauss (Transversa de Mercator)	Gauss (Transversa de Mercator)	Gauss (Transversa de Mercator)
Ponto Central – origem da projecção φ= 39° 40′ 00″ N λ= 08° 07′ 54″.863 W	Ponto Central– origem da projecção φ= 39° 40′ 00″ N λ= 08° 07′ 54″.863 W	Origem da projecção φ= 39° 40′ 05″.73 N λ= 08° 07′ 59″.19 W
Origem das coordenadas rectangulares igual à origem da projecção	Falsa origem M= + 180.598 m P= - 86.990 m	Origem das coordenadas rectangulares igual à origem da projecção
ko= 1	ko= 1	ko= 1

Portugal Continental - DGT

PTRA08-UTM/ITRF93
GRS80
-
UTM (Universal Transversa de Mercator)
Origem da projecção φ= 0° Fuso 25 (λ= 33° W, Açores – grupo ocidental) Fuso 26 (λ= 27° W, Açores – grupo central e oriental) Fuso 28 (λ= 15° W, Madeira)
Falsa origem M= + 500 000 m
ko= 0.9996

Regiões Autónomas- DGT

2. Sistemas de coordenadas

Hayford-Gauss/ Datum Lisboa Militares	*TM/WGS84*
Hayford ou Internacional	WGS84
Antigo V.G. do Castelo de São Jorge em Lisboa	-
Gauss (Transversa de Mercator)	Gauss (Transversa de Mercator)
Ponto Central – origem da projecção φ= 39° 40' 00'' N λ= 08° 07' 54''.862 W	Origem da projecção φ= 39° 40' 05''.73 N λ= 08° 07' 59''.19 W
Falsa origem M= + 200 000 m P= + 300 000 m	Falsa origem M= + 200 000 m P= + 300 000 m
ko= 1	ko= 1

Portugal Continental - CIGeoE

UTM/WGS84
WGS84
-
UTM (Universal Transversa de Mercator)
Origem da projecção φ= 0° Fuso 25 (λ= 33° W, Açores – grupo ocidental) Fuso 26 (λ= 27° W, Açores – grupo central e oriental) Fuso 28 (λ= 15° W, Madeira)
Falsa origem M= + 500 000 m W
ko= 0.9996

Regiões Autónomas- CIGeoE

Bibliografia

Catalão, J. (2007). Projecções cartográficas, FCUL-DEGGE, 76 pp.

Gaspar, J. A. (2000). Cartas e projecções cartográficas, 2ª edição, Lidel-Edições Técnicas, Lda., 292 pp.

Instituto Geográfico e Cadastral (1972). Cartografia Matemática, Cadernos Técnicos e de Informação, nº 31, 135 pp.

Maling, D. H. (1992). Coordinate systems and map projections, 2nd edition, Pergamon Press, Oxford.

Richardus, P. and R. K. Adler (1972). Map projections, North-Holland Publishing Company, Amesterdam, 174 pp.