

Aula 3

A verdadeira forma da Terra

*Vinicius da Silva Seabra
Otavio Rocha Leão*

Meta da aula

Apresentar os conceitos de superfície topográfica, geoide e elipsoide.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever a evolução dos conceitos relativos à forma da Terra;
2. aplicar o conceito de geoide e as principais características do Sistema Geodésico Brasileiro.

INTRODUÇÃO

Antes de seguirmos, aprendendo técnicas e conceitos relacionados à representação do planeta Terra, devemos compreender um pouco melhor alguns aspectos relacionados à verdadeira forma do nosso planeta. Podemos considerar a abordagem de assuntos relacionados a esse tema como uma temática-chave para a compreensão da Cartografia, tendo sido muito discutidos ao longo de centenas (e até milhares) de anos.

A preocupação em explicarmos a forma da Terra vem antes mesmo do nascimento de Cristo, já que importantes filósofos e matemáticos, tais como: Pitágoras (580 a.C.), Aristóteles (384 a.C.), Eratóstenes (22 a.C.), dedicaram muito tempo de suas vidas, tentando compreender e explicar a verdadeira forma do nosso planeta.



Figura 3.1: Eratóstenes.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Erat%C3%B3stenes>.

Mas o que pode existir de tão especial na forma da Terra que a torna alvo de tantos estudos e discussões? Hoje em dia, com toda a tecnologia que dispomos, ficou mais simples fazermos afirmações

precisas sobre a forma exata do nosso planeta. No entanto, estes estudos realizados no passado não possuíam à sua disposição as mesmas tecnologias que dispomos hoje, o que suscitou uma série de dúvidas e discussões sobre o assunto.

Plana, redonda ou esférica? Qual será a verdadeira forma da Terra? Vamos responder a todas estas perguntas nas páginas a seguir!

Considerações sobre a forma da Terra

Na Antiguidade, entender a verdadeira forma da Terra significava compreender o funcionamento de muitos fenômenos terrestres e até mesmo a existência da vida. Por isso, pensar sobre a forma da Terra foi uma preocupação nascida em um período em que questionar e refletir sobre a existência e funcionamento das coisas era algo muito relevante para sociedade.

Foi em função disto que desde a Grécia antiga, alguns pensadores buscavam elementos que comprovassem as teorias, baseadas na hipótese de que a Terra possuía uma forma esférica, que muitos já acreditavam ser verdadeiras. Sendo assim, alguns destes pensadores dedicavam boa parte do seu tempo buscando formas de calcular a sua circunferência.

Um passo importante para encontrarmos as respostas para estas questões foi dado por Pitágoras, que em 528 a.C. classificou a forma do nosso planeta como esférica. E foi a partir daí que sucessivas teorias foram desenvolvidas até alcançarmos o conceito que é hoje bem aceito no meio científico internacional.

A comprovação de que a Terra realmente possuía uma superfície esférica veio somente por volta do ano 200 a.C., com um experimento realizado por Eratóstenes. Este grande pensador Grego descobriu que no dia do **solstício** de verão, para o hemisfério Norte, justamente ao meio-dia, na cidade de Siena (nas proximidades do rio Nilo), os raios do Sol iluminavam todo o fundo

Solstício

O solstício representa o momento em que o Sol atinge a maior declinação em latitude em relação à linha do Equador, ou seja, é o momento em que a Terra está mais “inclinada” em relação ao Sol.

de um poço vertical. No entanto, no mesmo dia em Alexandria, que estava localizada mais ao norte, ele verificou que os raios solares estavam inclinados, não iluminando diretamente o fundo do poço, como ocorrera em Siena.

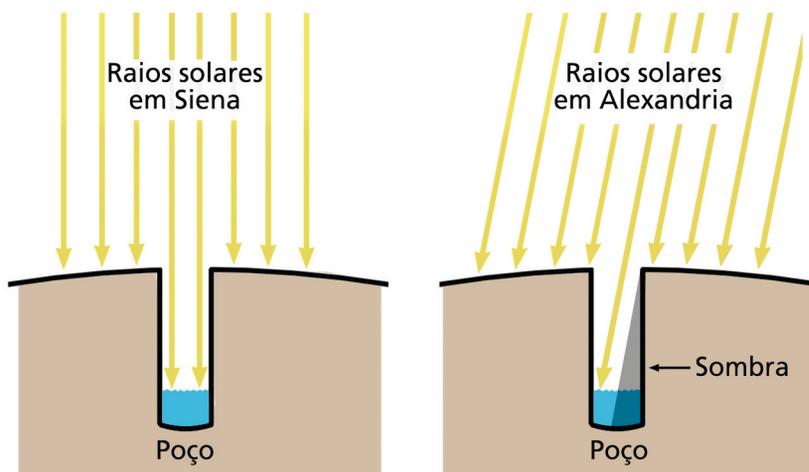
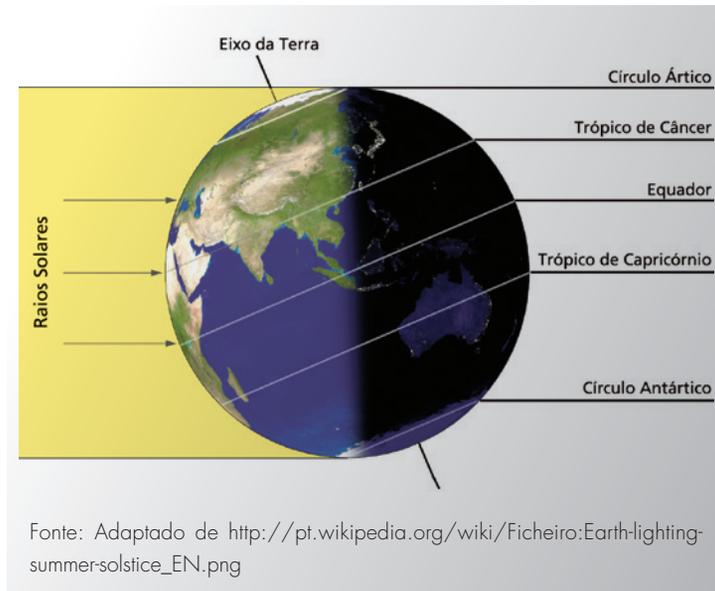


Figura 3.2: Observações feitas por Eratóstenes nos poços de Siena e Alexandria.



O planeta Terra possui uma inclinação de aproximadamente $23^{\circ} 27'$, em relação ao seu próprio eixo de rotação. Esta inclinação faz com que ocorra uma distribuição desigual dos raios solares entre os hemisférios Norte e Sul do planeta, o que inclusive faz com que enquanto no hemisfério Norte é verão, no Sul estamos no inverno e vice-versa. Os solstícios ocorrem entre os dias 21 e 22 de dezembro, sendo verão no hemisfério Sul e inverno no hemisfério Norte, e ainda entre 21 e 22 de junho, resultando em inverno no hemisfério Sul e verão no hemisfério Norte.



Estas informações fizeram Eratóstenes realizar um importante experimento. Este pensador grego colocou uma estaca vertical em Siena e outra em Alexandria, e observou que ao meio-dia de 21 de junho, enquanto a estaca colocada em Siena não apresentava sombra, a de Alexandria apresentava sombra no terreno. Com esta experiência, ele ainda verificou que em Alexandria a sombra da estaca projetada no terreno comprovava que os raios solares estavam inclinados cerca de $7^{\circ}12'$ em relação à superfície do terreno.

Tendo estas informações em mão, Eratóstenes estimou a distância entre as duas cidades em 5.000 estádios, que equivalem a aproximadamente 925 km, e foi possível aplicar o cálculo para descobrir a circunferência da Terra, pois:

- se a distância entre as duas cidades é de 5.000 estádios (925 km);
- e se entre elas a diferença de inclinação entre os raios solares é de $7^{\circ}12'$, então:

$$7^{\circ}12' - 5.000 \text{ estádios}$$

$$360^{\circ} - x, \text{ sendo } x = 250.000 \text{ estádios ou } 46.250 \text{ km.}$$

As dificuldades encontradas para fazer corretamente as medidas de distância (a distância real entre as duas cidades é de cerca de 4.500 estádios) e de localização entre as duas cidades (Siena não estava no mesmo meridiano que Alexandria) fizeram com que Erastóstenes cometesse pequenos erros, já que a circunferência real da Terra é de 41.761.478,94 metros.

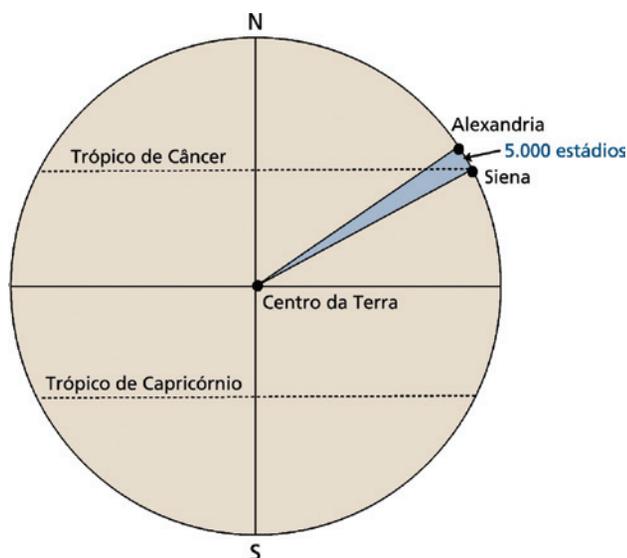


Figura 3.3: Modelo utilizado por Erastóstenes para o cálculo da circunferência da Terra.

Uma das atividades possíveis e interessantes para serem trabalhadas em sala de aula é a simulação do experimento de Erastóstenes. Para melhor explicar sua constatação, podemos adaptar seu experimento para a América do Sul. Podemos separar um globo terrestre e nele fixar dois bastões. Colocaremos o primeiro na linha do Equador (bastão 1) e o segundo colocaremos próximo ao trópico de Capricórnio (bastão 2).

Em seguida, iluminaremos o globo terrestre com uma lanterna, apontando-a para a linha do equador, simulando então a iluminação solar no período do **equinócio**. Nesta situação, perceberemos que o bastão fixado na Linha do Equador não formará sombra, enquanto o outro bastão, próximo ao trópico de Capricórnio formará um sombreamento sobre o globo (**Figura 3.4**).

Equinócio

No equinócio, ao contrário do solstício, temos o momento em que o Sol atinge a menor declinação em latitude em relação à linha do Equador, ou seja, é o momento em que a Terra está menos “inclinada” em relação ao Sol.

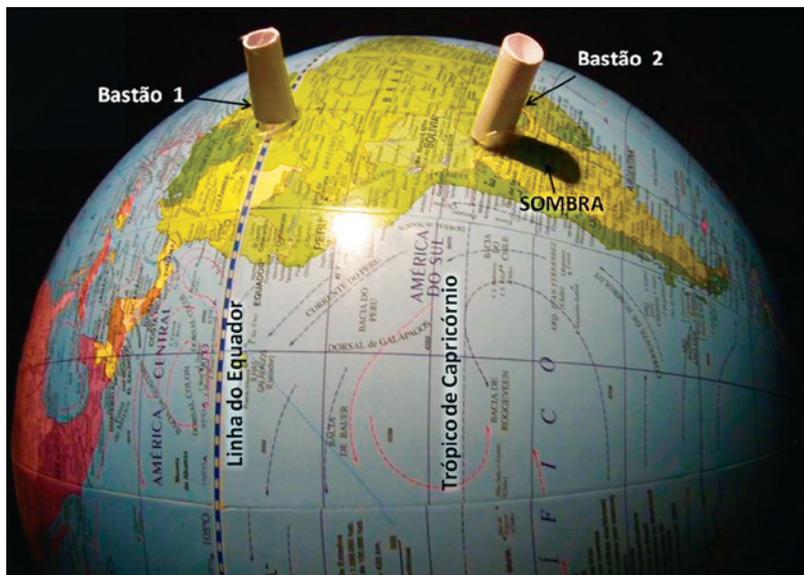


Figura 3.4: Experimento de Eratóstenes.



Os equinócios ocorrem nos dias 20 ou 21 de março, marcando o outono no hemisfério Sul e primavera no hemisfério Norte, e ainda nos dias 22 ou 23 de setembro, iniciando a primavera no hemisfério Sul e o outono no hemisfério Norte.



Fonte: Wikipédia <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Equin%C3%B3cioPT.jpg>.

Todos os levantamentos feitos na Grécia antiga foram importantíssimos para o desenrolar dos estudos que ocorreram a seguir. No entanto, a Idade Média marcou um período de imenso retrocesso para a Cartografia. Neste período, imaginava-se que a Terra tinha a forma de um disco plano, com abismos e monstros marinhos ao seu final.

Mas as grandes navegações fizeram com que as reflexões e questões apontadas pelos gregos voltassem a ser consideradas, e a esfericidade terrestre voltou a ser pauta importante nas discussões científicas. A percepção de que os barcos vão sumindo lentamente ao afastar-se no horizonte, a projeção da sombra da Terra na Lua, durante os eclipses, e outros eventos importantes estimularam ainda mais estas discussões.

E foi no século XVII que o inglês Newton e o holandês Huygens afirmaram que a Terra não era uma esfera perfeita, já que possuía um sutil achatamento nos polos. Estes cientistas descobriram que esse achatamento ocorre devido à combinação da força da gravidade e ao movimento de rotação da Terra (**força centrífuga**). Desde então, passou-se a considerar a Terra não mais uma esfera perfeita, assumindo desde então que a figura geométrica mais semelhante ao nosso planeta seria o elipsoide.

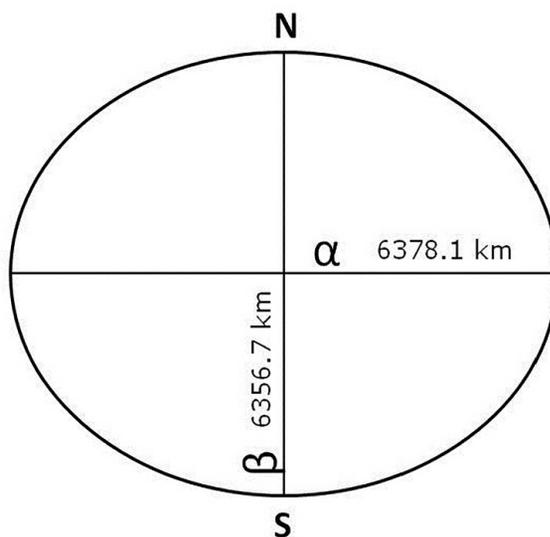


Figura 3.5: Figura de um elipsoide, com raio maior no sentido leste-oeste em relação ao raio norte-sul.

Força centrífuga

A força centrífuga atua nos corpos em rotação e seu efeito é o afastamento destes corpos em relação ao centro de rotação. É esta força a responsável, por exemplo, em fazer com que as roupas em uma lavadora sejam empurradas para os cantos do seu tambor, enquanto a máquina executa seu movimento circular.

Se estivéssemos observando a Terra da Lua ou de qualquer outro ponto do espaço, dificilmente conseguiríamos perceber o seu achatamento. Isto acontece porque a diferença entre o semieixo maior (α) e o seu semieixo menor (β) é de pouco mais que 21 km, ou seja, um valor muito pequeno, se comparado às dimensões do nosso planeta.

É importante destacarmos que o diâmetro equatorial da Terra é de 12.756 km e o seu eixo de rotação é de 12.714 km, já que os semieixos representam apenas a metade de seus valores.

Mas foi no século XIX que um matemático alemão, chamado Carl Friedrich Gauss, introduziu a figura do geoide como a verdadeira forma da Terra, ou seja, a partir de então a Terra não seria definida como uma esfera e nem mesmo como um elipsoide, e sim como um geoide.

O geoide é uma superfície irregular, definida pelo prolongamento da superfície do nível médio dos mares sobre os continentes. O estudo do geoide e suas características é destinado à uma área específica da Cartografia, chamada de geodésia.

O conceito de geoide e o Sistema Geodésico Brasileiro serão apresentados e discutidos mais profundamente na próxima parte desta aula. Vamos agora exercitar o que você já aprendeu sobre a forma da Terra.



Atende ao Objetivo 1

1. Podemos considerar que historicamente a Terra já foi considerada plana, esférica e elíptica. Comente estas diferentes concepções, associando-as com os seus respectivos momentos históricos.

O conceito de geoide e o Sistema Geodésico Brasileiro

A superfície terrestre sofre constantemente alterações de ordem natural ou por ação do homem. Movimentos tectônicos, vulcanismos, processos erosivos, aterramentos etc. são exemplos que fenômenos ou processos que recorrentemente modificam a superfície do nosso planeta. Sendo assim, podemos considerar esta superfície como irregular, dinâmica, visível e material. A partir de agora, vamos chamar esta superfície de superfície topográfica.

Devido à sua dinâmica e irregularidade, a superfície topográfica não pode ser utilizada como referência para as representações cartográficas. Na verdade, a superfície topográfica deve ser representada a partir de uma outra referência. Para esclarecer um pouco mais esta necessidade, vamos tomar o seguinte exemplo.

Suponhamos que seja necessário medirmos a altitude de uma montanha ou de um grande edifício. Qual seria a origem, ou seja, o marco zero desta medição? Qual seria a nossa referência para o início das medições de altitude?

Para tal, foi confeccionado o conceito de geoide, definido pelo prolongamento da superfície do nível médio dos mares sobre os continentes. É por esta razão que a medida de altitude é sempre referenciada pelo termo "acima do nível médio dos mares". Quando dizemos que o pico Everest tem 8.848,43 m de altitude, afirmamos que ele está a 8.848,43 m acima do nível médio dos mares.

Porém, o nível médio dos mares é influenciado pela ação da força gravitacional e da força centrífuga (gerada pela rotação) da Terra. E esta questão é fundamental para a compreensão do geoide. Pois os diferentes materiais que compõem a superfície terrestre possuem diferentes densidades, fazendo com que a força gravitacional atue com maior ou menor intensidade nas mais diferentes localidades.

O geoide é definido pela ação gravitacional e, se a gravidade atua com diferentes intensidades em áreas distintas, significa dizer

que o geoide possui uma superfície muito irregular. E ainda é importante considerar que, para a definição correta do geoide são necessárias medições gravimétricas a partir de estações e a realização de cálculos, e estudos de alta precisão.

As medições de altimetria estão vinculadas ao geoide, que é definido pelo prolongamento do nível médio e inalterado dos mares. Mas o referencial de planimetria, ou seja, o que define a origem e orientação do sistema de coordenadas não pode fazer uso do geoide para suas representações, uma vez que o mesmo apresentasse de forma irregular.

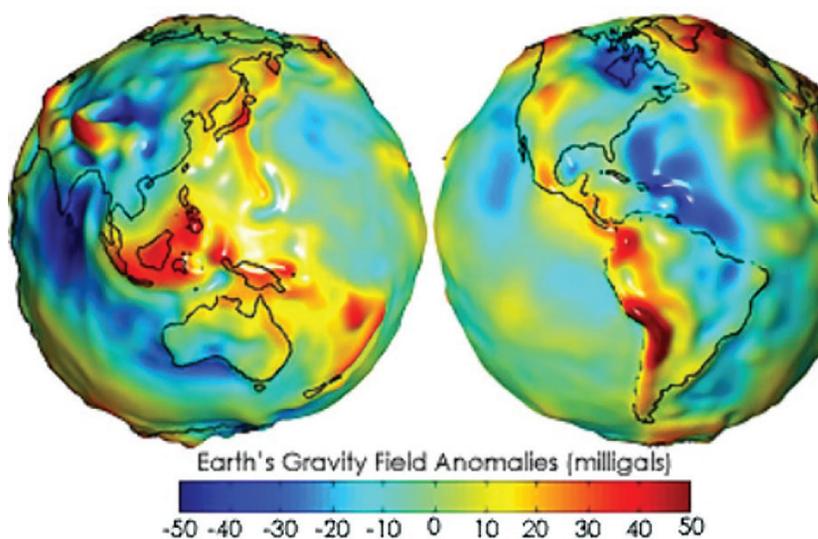


Figura 3.6: Representação esquemática do geoide.
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Geoids_sm.jpg.

Sendo assim, para os cálculos planimétricos a Cartografia buscou outra figura geométrica para representação do nosso planeta. Esta figura deveria ser regular e ter uma forma bem parecida com o geoide. Adotou-se então o **elipsoide**, que é, portanto, a superfície de referência utilizada nos cálculos planimétricos. Desta maneira, é correto afirmar que o elipsoide é o modelo matemático (geométrico) adotado para substituir o geoide, na elaboração das representações cartográficas.

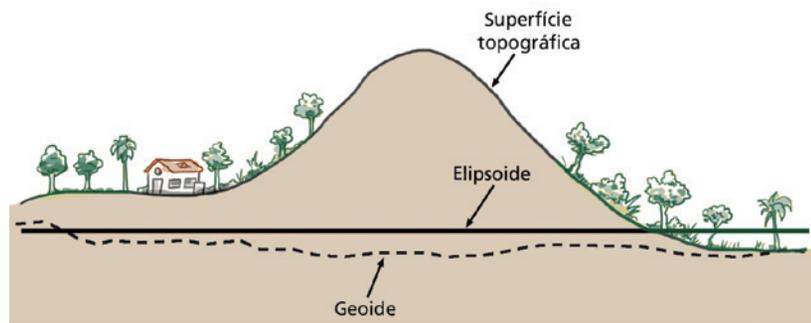


Figura 3.7: As diferenças entre superfície topográfica, geoide e elipsoide.



É importante termos bastante atenção com os conceitos de superfície topográfica, geoide e elipsoide. A superfície topográfica é a superfície que vemos e sobre a qual habitamos e desenvolvemos nossas atividades. O geoide é definido pelo prolongamento do nível médio e inalterado dos mares. É o referencial para as nossas medições altimétricas. É importante ainda destacar que o geoide é considerado a forma real do planeta Terra. Já o elipsoide é a figura geométrica adotada para substituir o geoide nas medições planimétricas. Esta figura é matematicamente elaborada, criada pelo homem para viabilizar a representação do nosso planeta. Quando mencionamos o termo «planimetria», estamos nos referindo à representação de elementos da realidade terrestre em um plano, sem considerarmos as variações que ocorrem por conta do relevo. Já a altimetria fundamenta-se na representação das formas do relevo. Estes assuntos serão abordados com maior profundidade na Aula 8 desta disciplina.

Como já afirmamos aqui, a superfície do geóide é irregular e não coincidente com a superfície do elipsoide. Em praticamente todo planeta, existirão diferenças, ainda que mínimas, entre estas duas superfícies. As diferenças são usualmente chamadas de ondulações geoidais, alturas geoidais ou separações geoidais. Seu valor máximo chega a aproximadamente 100 m acima ou abaixo dos elipsoides de referência.

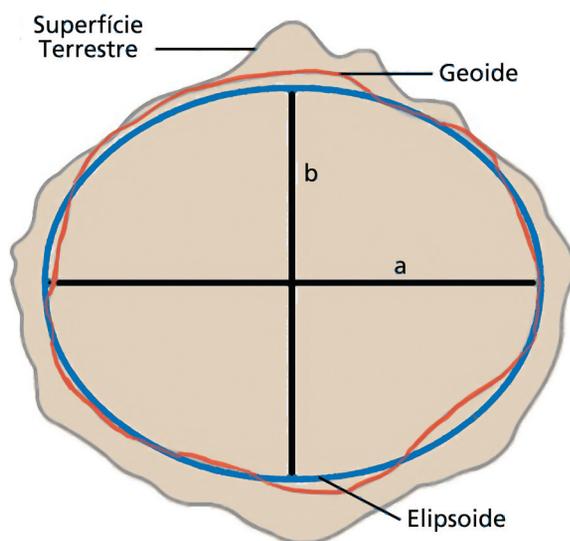


Figura 3.8: Relação entre a superfície topográfica, geóide e elipsoide.

No Brasil, as ondulações ou alturas geoidais, em relação ao nosso elipsoide de referência oficial, giram em torno de 35 m acima e abaixo do geóide. O conhecimento disto é muito importante, uma vez que grande parte dos instrumentos de medição da Cartografia, como, por exemplo, os **GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite)**, fazem uso do elipsoide para suas medições no terreno.

GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite)

São compostos por antenas de controle, satélites e aparelhos receptores, e têm a finalidade de possibilitar a localização ou navegação na superfície terrestre, a partir do uso de sistemas de coordenadas. O principal exemplo destes sistemas é o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que nada mais é do que o sistema de navegação GNSS americano.

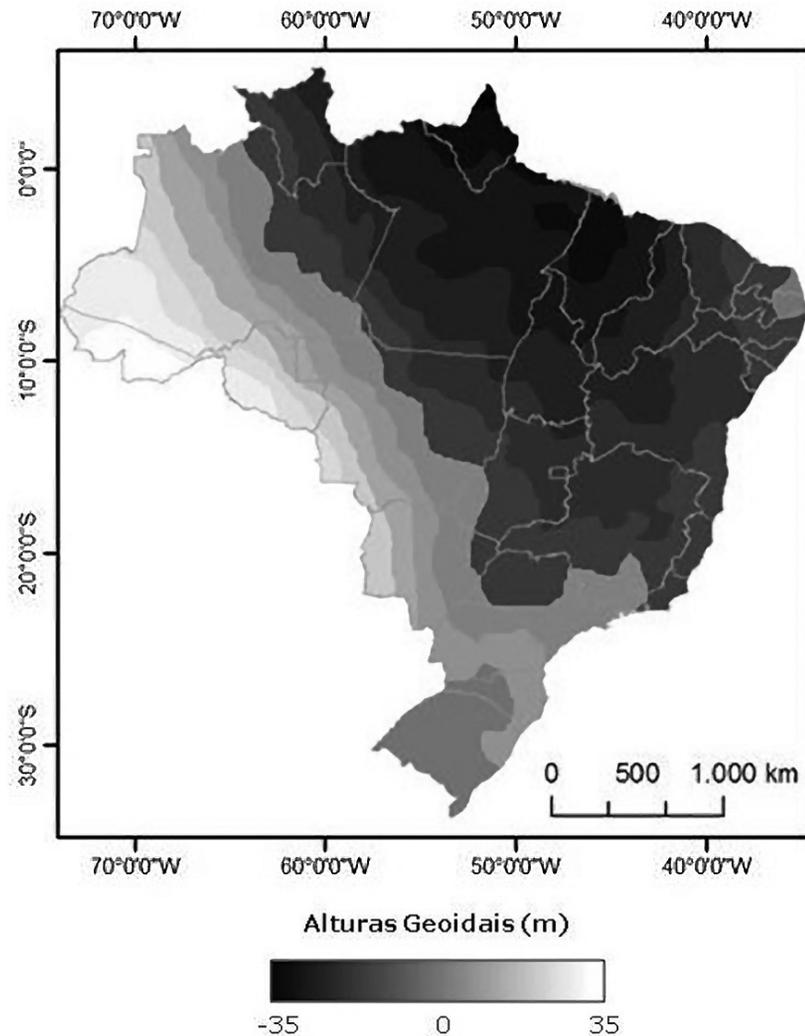


Figura 3.9: Alturas geoidais no Brasil.

Fonte: Mapa dos autores. Dados Extraídos do IBGE.

Significa dizer que a altitude real de um ponto não pode ser medida somente a partir do uso do GPS, pois o mesmo fornecerá somente a altitude de um ponto em relação ao elipsoide. Ou seja, a altitude real de um ponto será sempre a diferença entre a altitude elipsoidal (obtida através do GPS) e a ondulação (ou altura) geoidal.

Desta forma, temos:

$$H = h - N, \text{ onde:}$$

H = altitude real

h = altitude elipsoidal

N = ondulação geoidal

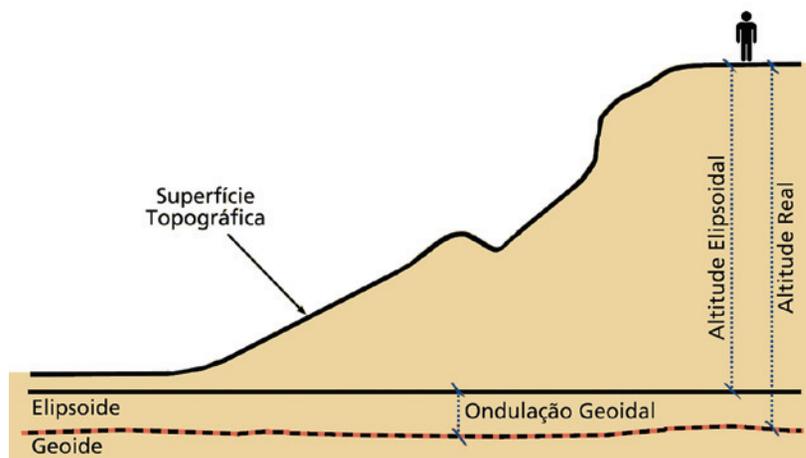


Figura 3.10: Distinção entre altitude real, altitude elipsoidal e ondulação geoidal.

Diferentes institutos científicos e cartográficos do mundo, e instituições afins, realizam muitos estudos para a determinação do melhor elipsoide para representação dos territórios de seus países. Estes estudos definem o sistema geodésico de referência, composto por uma rede de pontos de altimetria, **gravimetria** e planimetria.

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) tem como referencial de altimetria o marco zero do Marégrafo de Imbituba, localizado no estado de Santa Catarina. Este ponto é chamado também de *Datum Vertical* (origem das altitudes). O referencial planimétrico oficial brasileiro é dado pelo Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), que foi adotado depois de ter sido amplamente discutido no meio cartográfico latino americano.

Gravimetria

É a medida do campo gravitacional e por isso é de grande interesse nos estudos relacionados à geodésia. Estas medições servem, por exemplo, para compreender as mudanças do geóide ao longo do tempo.



O SIRGAS 2000 adota os parâmetros do ITRS (Sistema Internacional de Referência Terrestre), adotando como elipsoide de referência o GRS-80 (Sistema Geodésico de Referência de 1980). Este elipsoide adota como raio equatorial da Terra o valor de 6.378.137 m e um raio polar de 6.356.752,3141 m.

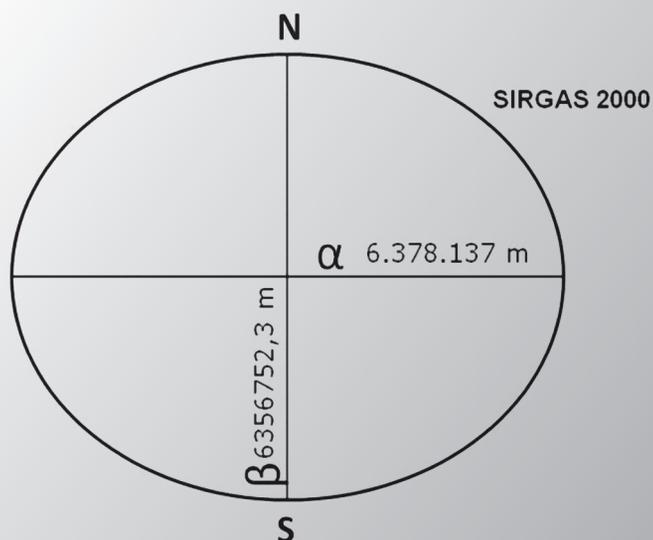


Figura 3.11: Elipsoide de referência, adotado pelo SIRGAS 2000.



Atende ao Objetivo 2

1. Leia atentamente a questão e responda ao que se pede:

João sobe até o ponto mais alto de uma montanha, portando um receptor GPS, e lá faz a medição do valor altimétrico (elipsoidal), fornecido pelo equipamento. Considerando que o

aparelho esteja corretamente calibrado e desprezando os erros inerentes ao mesmo, calcule a altitude real, baseando-se nas seguintes informações:

- a) A altitude medida pelo GPS foi de 900 m.
- b) A ondulação Geoidal é de - 20 m (vinte metros negativos).

Resposta Comentada

Como discutido anteriormente, os receptores GPS informam a altitude de um ponto em relação ao elipsoide. Sendo assim, a altitude real de um ponto será sempre a diferença entre a altitude elipsoidal (obtida através do GPS) e a ondulação (ou altura) geoidal.

Desta forma, temos:

$$H = h - N, \text{ onde: } H = \text{altitude real}$$

$$h = \text{altitude elipsoidal}$$

$$N = \text{ondulação geoidal}$$

João mediu a altitude elipsoidal de 900 m, em um ponto onde a ondulação geoidal foi de - 20m. Sendo assim:

$$H = ?$$

$$h = 900 \text{ m}$$

$$N = - 20 \text{ m} \quad H = 900 - (- 20) = 920 \text{ m}$$

A altitude real do ponto é de 920 m.

CONCLUSÃO

Os estudos relacionados à determinação da forma da Terra, suas medidas e definições são muito importantes para as geociências, sendo por isso alvo de dedicação exclusiva de uma área específica da Cartografia, conhecida como Geodésia. Tal importância deve-

se à necessidade de sabermos corretamente a forma daquilo que estamos representando (neste caso, a superfície do nosso planeta), conhecendo as dificuldades de sua representação e as metodologias, utilizadas para a resolução ou mitigação destes obstáculos.

Atividade Final

Atende aos Objetivos 1 e 2

Observe as figuras a seguir:



Identifique as diferentes concepções da forma da Terra, baseando-se nas figuras deste exercício, explicando ainda a importância de cada uma delas para a representação do nosso planeta.

Resposta Comentada

A figura da esquerda é a representação da Terra, a partir de uma esfera. Nesta representação, o raio equatorial e o raio polar são iguais, ou seja, nesta situação a Terra não é achatada nos polos. A segunda representação é o elipsoide, que serve na Cartografia como o referencial para todos os cálculos planimétricos terrestres. Nesta situação, o eixo polar é ligeiramente menor que o eixo equatorial, fazendo com que a Terra seja levemente achatada nos polos. A figura da direita representa o geóide, que é a forma real do nosso planeta. O geóide é uma superfície irregular e por isso substituído pelo elipsoide para as representações planimétricas. No entanto, o geóide é o nosso referencial altimétrico, sendo a origem (marco zero) de todas as nossas medidas de altitude.

RESUMO

A determinação da forma da Terra é de fundamental importância para os estudos relacionados à representação da superfície do nosso planeta. As tentativas de calcular sua dimensão e circunferência remontam à Grécia antiga, e seguem sendo alvo de estudos e pesquisas até os dias de hoje.

O planeta Terra, que já foi concebido como esférico, plano e elipsoidal, hoje tem a sua forma definida pelo geóide. O geóide pode ser definido pelo prolongamento do nível médio e inalterado dos mares, e é considerado ainda a origem das medidas altimétricas, ou seja, todas as medidas de altitude da superfície topográfica são calculadas, tendo o geóide como referência.

No entanto, o referencial de planimetria, ou seja, o que define a origem e orientação do sistema de coordenadas, não pode fazer uso do geóide como representação da forma da Terra, uma vez que o mesmo apresenta-se de forma irregular. Por isso, para os cálculos

planimétricos, a Cartografia adotou o elipsoide, que é, portanto, a superfície de referência utilizada nos cálculos planimétricos.

Em praticamente todo planeta, existirão diferenças, ainda que mínimas, entre a superfície do geóide e a superfície do elipsoide. As diferenças são usualmente chamadas de ondulações geoidais, alturas geoidais ou separações geoidais. Seu valor máximo chega a aproximadamente 100 m acima ou abaixo dos elipsoides de referência.

Diferentes institutos científicos e cartográficos do mundo e instituições afins realizam muitos estudos para a determinação do melhor elipsoide para representação dos territórios de seus países. Estes estudos definem o Sistema Geodésico de Referência, composto por uma rede de pontos de altimetria, gravimetria e planimetria.

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) tem como referencial de altimetria o marco zero do marégrafo de Imbituba, localizado no estado de Santa Catarina. Este ponto é chamado também de *Datum Vertical* (origem das altitudes). O referencial planimétrico oficial brasileiro é dado pelo Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), que foi adotado depois de ter sido amplamente discutido no meio cartográfico latino-americano.

Informação sobre a próxima aula

Na próxima aula, discutiremos outras questões relacionadas à forma da Terra e a representação cartográfica. Apresentaremos os principais sistemas projetivos, apontando suas vantagens e limitações.