

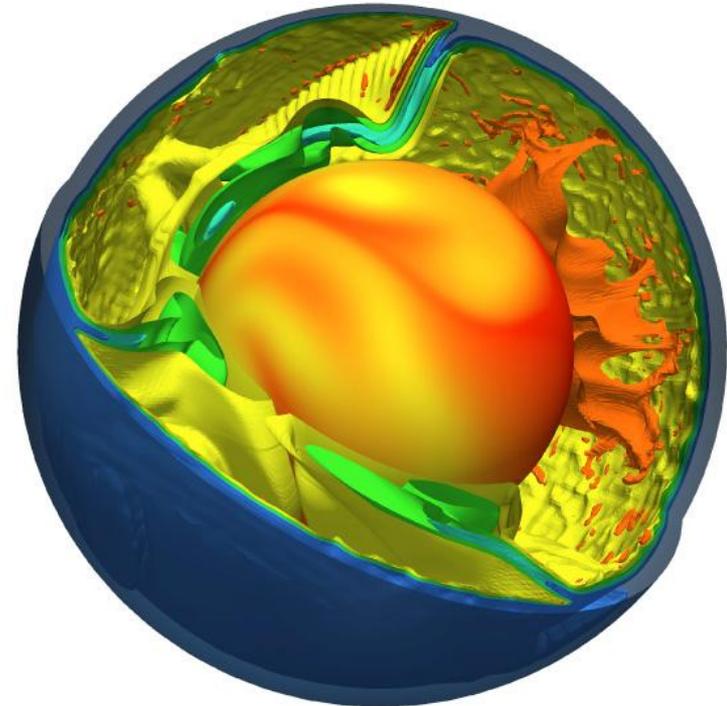
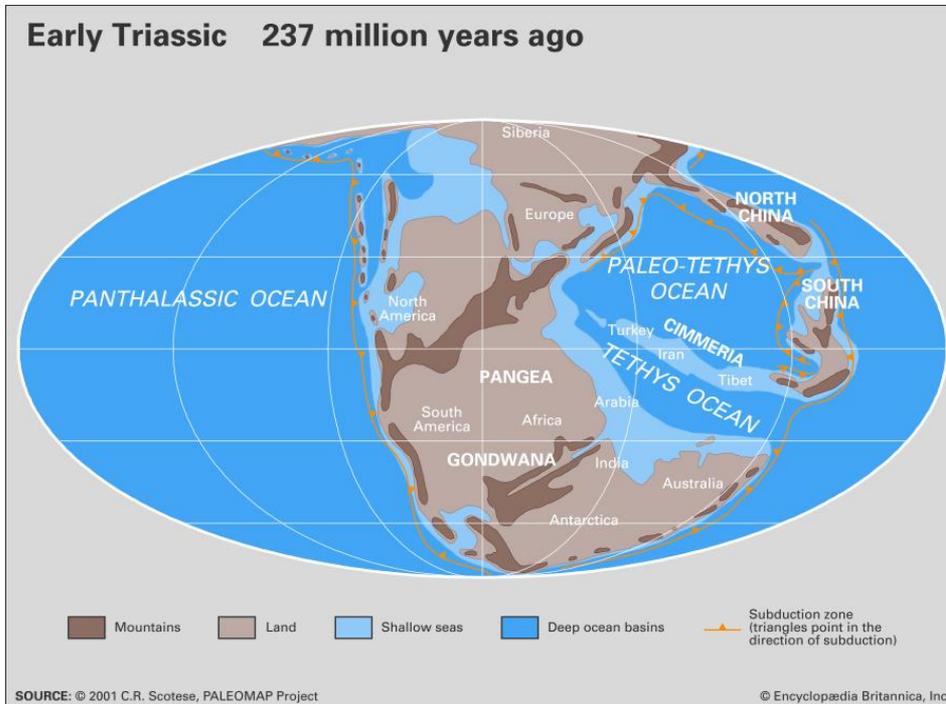
DA DERIVA CONTINENTAL À TECTÔNICA DE PLACAS



Eder Cassola Molina – IAG-USP
eder@iag.usp.br

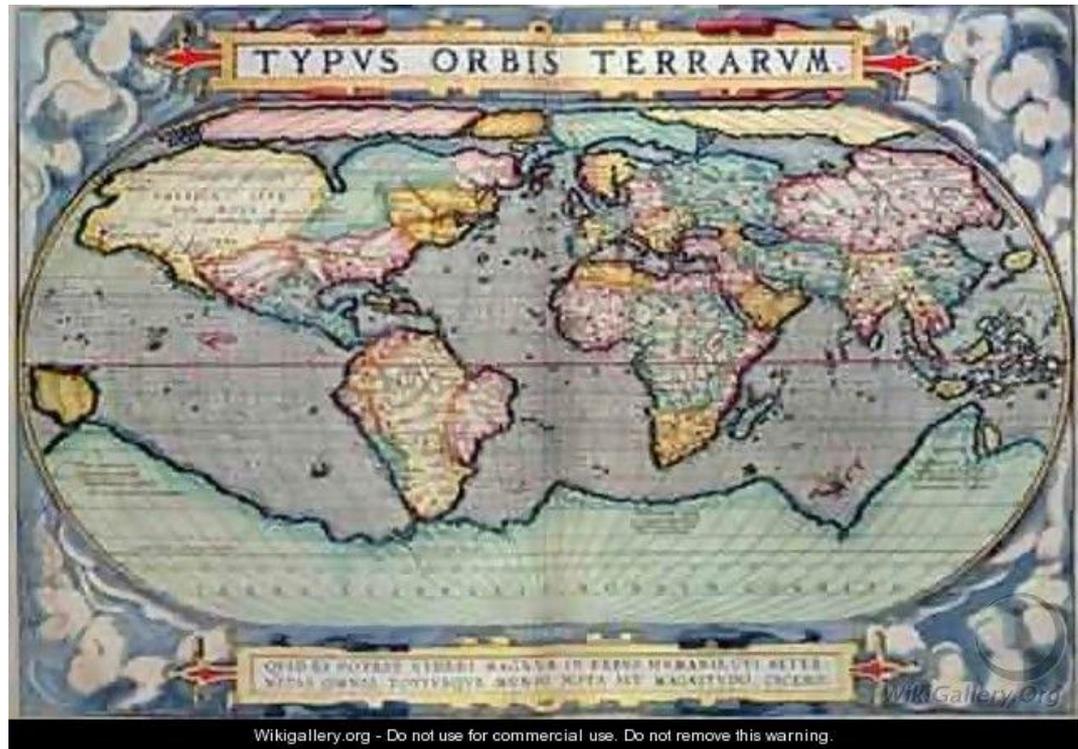
A Tectônica de Placas

A teoria da Tectônica de Placas é muito recente, e tem trazido grande ajuda na compreensão dos fenômenos observados na Terra. Por outro lado, a possibilidade da mobilidade das massas continentais, que é um ponto fundamental da teoria, é uma ideia controversa relativamente antiga, que tem intrigado os geocientistas...



Abraham Ortelius - 1596

Abraham Ortelius, um elaborador de mapas, em 1596, sugeria que as Américas estavam juntas na antiguidade e tinham sido separadas da Europa e da África por terremotos e enchentes.



O ajuste das linhas de costa

Ortelius afirmava que este fato era evidente se fosse elaborado um mapa com a junção destes continentes, verificando-se a coerência entre as linhas de costa.



O ajuste das linhas de costa

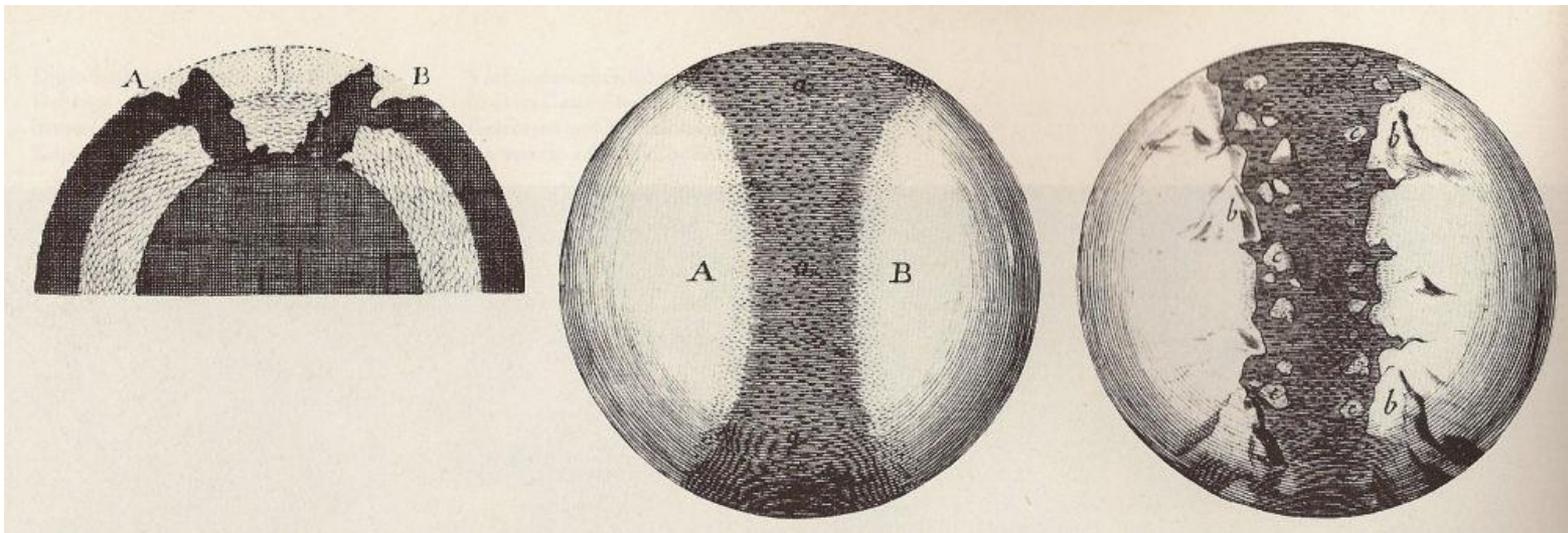
Em algumas situações, o ajuste era impressionante. Ortelius, porém, não evoluiu muito a ideia, sem conseguir propor um mecanismo plausível para a origem desta configuração.

As maiores forças conhecidas que poderiam ser candidatas a causar o deslocamento de massas continentais eram provenientes de terremotos, enchentes e furacões, mas muito aquém do que seria necessário para tal façanha.



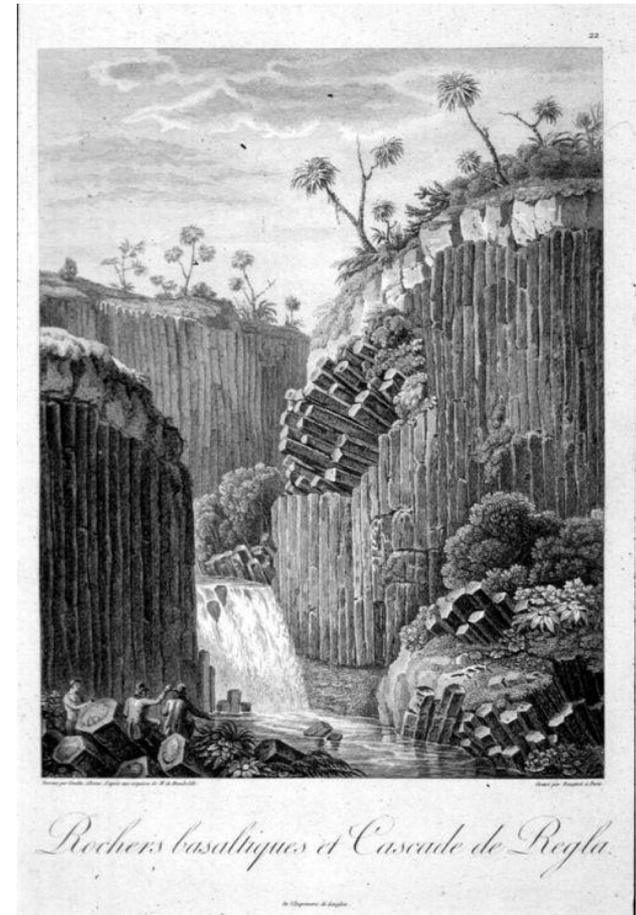
O problema da forma dos continentes

Imagem do livro de Thomas Burnet "*The Sacred Theory of the Earth*", publicado em 1684, no qual ele tenta explicar a forma dos continentes usando o dilúvio bíblico. A crosta terrestre primordial homogênea se partiu, liberando a água de seu interior, que cobriu o planeta todo e por fim infiltrou-se nas fraturas, deixando na superfície fragmentos da crosta original no formato de continentes e ilhas que conhecemos.



O problema da forma dos continentes

O grande naturalista e geógrafo alemão **Alexander von Humboldt** explorou a América do Sul entre 1799-1804 e observou que as semelhanças entre os dois litorais não se restringiam apenas a um padrão morfológico, mas também às feições geológicas: cadeias de montanhas que pareciam terminar em um continente continuando por outro lado; o planalto brasileiro, que é semelhante à paisagem do Congo; a bacia amazônica, que tem sua contrapartida nas terras baixas da Guiné; as cadeias montanhosas da América do Norte, que são geologicamente muito semelhantes às antigas montanhas e rochas europeias.

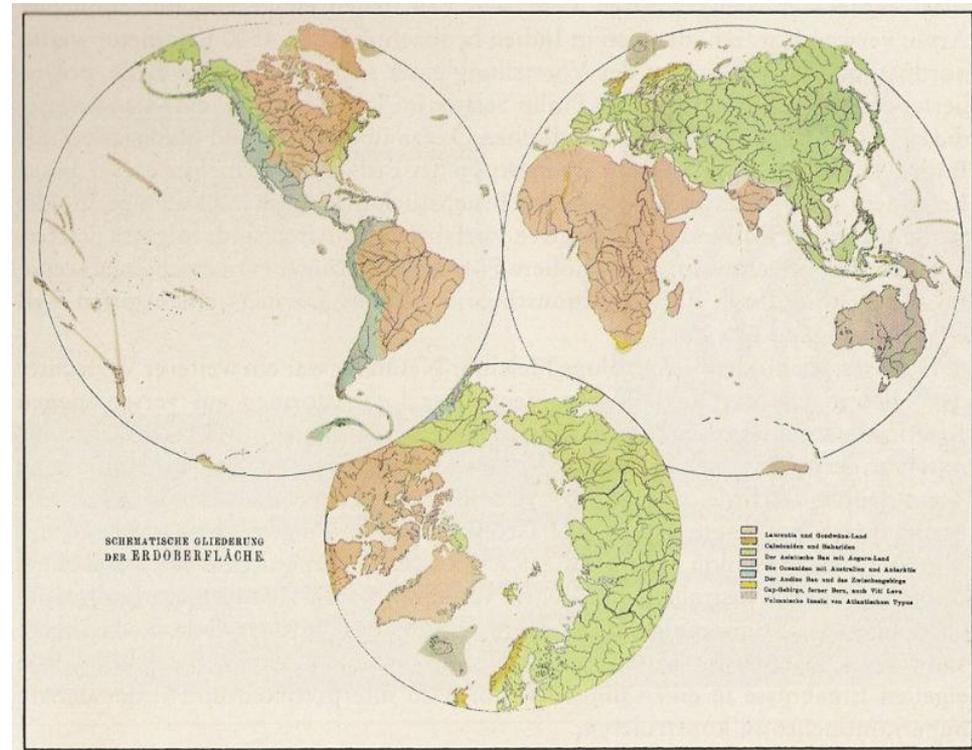


Mas mesmo Humboldt ainda argumentava que o Oceano Atlântico representa um grande e antigo leito de rio, subseqüentemente inundado pela catástrofe bíblica.

O problema da forma dos continentes

O geólogo austríaco **Eduard Suess** publicou uma obra de vários volumes chamada "Das Antlitz der Erde" (1883-1909).

Este mapa colorido à mão mostra os supostos restos dos continentes primordiais, que seriam "núcleos de crosta" preservados, cercados por bacias mais jovens hoje cobertas por oceanos. Curiosamente, ele sugeriu também que as fossas profundas, encontradas ao longo das fronteiras do Pacífico, são zonas onde o fundo do oceano foi empurrado para baixo dos continentes (!!!).



O problema das montanhas

A teoria de Suess foi amplamente discutida e aceita na Europa, mas na América do Norte o geólogo **James Dwight Dana** (1813-1895) desenvolveu uma versão diferente da teoria de Suess, mas também levando em conta o importante evento da contração. Dana sugeriu que os continentes se formaram no início da história da Terra, quando minerais de baixa temperatura, como o quartzo e o feldspato, se solidificaram.

A seguir o globo continuou a se resfriar e contrair, até que os minerais de alta temperatura, como a olivina e o piroxênio, finalmente se solidificaram: na Lua, para formar as crateras lunares; na Terra, para formar as bacias oceânicas. À medida que a contração continuou depois que a Terra ficou sólida, sua superfície começou a se deformar.



James Dwight Dana

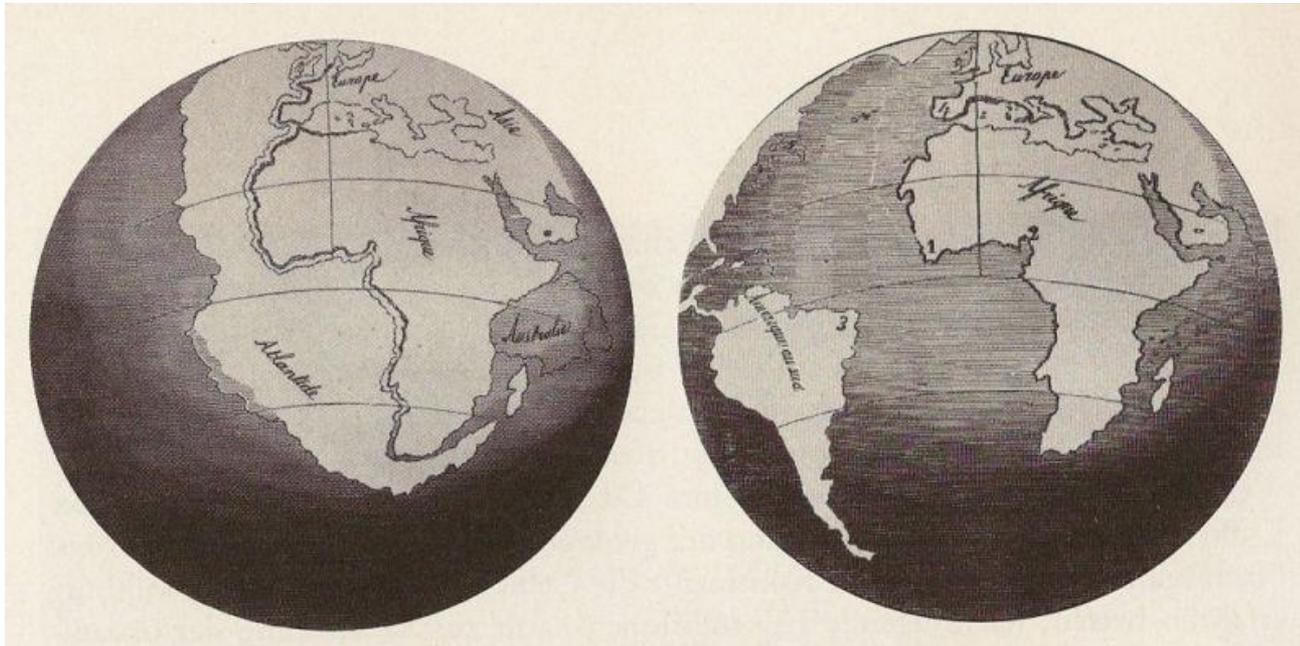
O problema da forma dos continentes

A Teoria da Contração da Terra, formulada pelo geólogo americano **James Dwigth Dana**, explicava montanhas e continentes como produtos de um resfriamento e subsequente encolhimento do planeta. Como uma maçã velha e seca, a superfície cada vez menor da Terra desenvolveria fissuras (bacias) e rugas (montanhas).



O problema das montanhas

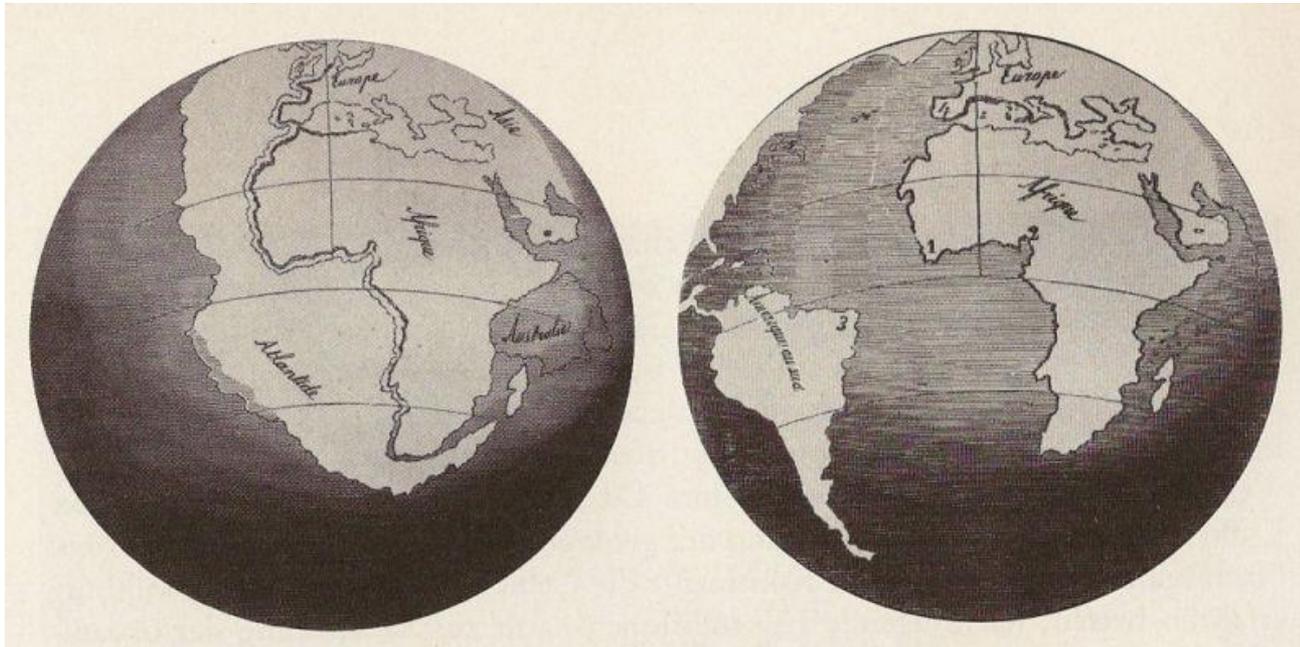
Mas a Teoria da Contração da Terra não conseguia explicar a distribuição irregular das montanhas na Terra e porque existem regiões com fortes movimentos tectônicos e terremotos, e áreas “tranquilas”. De acordo com esta teoria, tais características e eventos deveriam ser distribuídos aleatoriamente na superfície de um planeta homogêneo em resfriamento e encolhimento.



Esta reconstrução de 1858 feita por Antonio Snider-Pellegrini é o primeiro mapa que mostra um antigo supercontinente.

O problema das montanhas

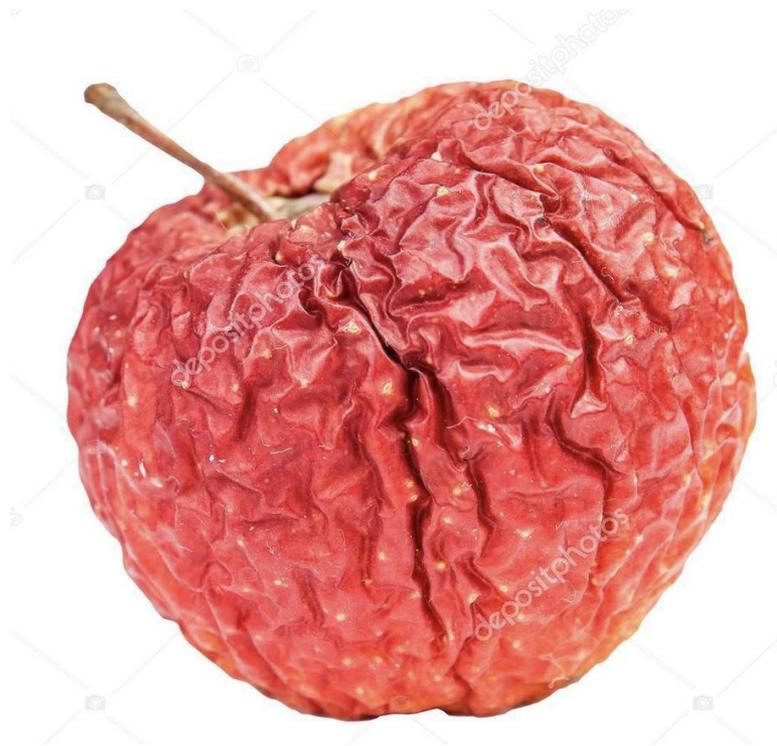
Já em 1858, o naturalista francês **Antonio Snider-Pellegrini** (1802-1885) publicou uma reconstrução da América e da África formando um único continente num planeta com um volume fixo. Mas Snider-Pellegrini não conseguiu propor um mecanismo convincente, a não ser o grande dilúvio descrito na Bíblia, para explicar as forças necessárias para mover continentes inteiros.



Esta reconstrução de 1858 feita por Antonio Snider-Pellegrini é o primeiro mapa que mostra um antigo supercontinente.

O problema das montanhas

Na Europa, a imagem da Terra como uma maçã seca se tornou popular: à medida que o planeta se contraía, a sua superfície enrugava-se para acomodar a área superficial diminuída. Suess presumiu que a crosta inicial da Terra era contínua, mas se desfez à medida que o interior encolheu. As porções colapsadas formaram as bacias oceânicas; as porções elevadas restantes formaram os continentes.



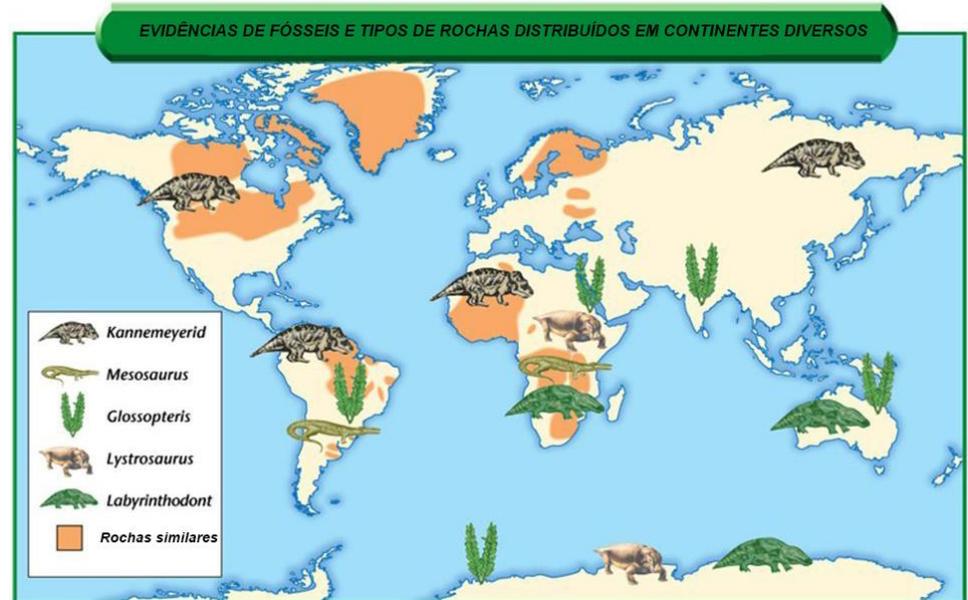
O problema das montanhas

Com o resfriamento contínuo, os continentes originais tornaram-se instáveis e colapsaram para formar a próxima geração de fundo oceânico, e o que anteriormente era oceano tornou-se agora terra seca. Ao longo da história geológica, haveria um intercâmbio contínuo de terra e mar, um rearranjo periódico das massas terrestres.



O problema das montanhas

A intercambialidade de continentes e oceanos explicou uma série de de outras observações geológicas desconcertantes, como a presença de fósseis marinhos em terra (que há muito tempo intrigaram Leonardo Da Vinci) e a extensa intercalação de sedimentos marinhos e terrestres no registro estratigráfico. A teoria da contração de Suess também explicou as impressionantes semelhanças entre fósseis em partes da Índia, África e América do Sul. Na verdade, em alguns casos os fósseis pareciam idênticos, apesar de terem sido encontrados a milhares de quilômetros de distância.



O problema das montanhas

As fronteiras entre continentes e oceanos sofreram a maior parte da pressão - como as costuras de um vestido - e assim montanhas começaram a se formar ao longo das margens continentais. Com a contração contínua veio a continuação da deformação, mas com os continentes e oceanos sempre nas mesmas posições relativas.

Embora a teoria de Dana fosse uma versão da contração, ela passou a ser conhecida como teoria da permanência, porque via os continentes e os oceanos como características globalmente permanentes.

DANA

James Dwight Dana (1813–1895), American geologist, was professor at Yale, first of natural history and later of geology and mineralogy, from 1850 to 1890. His *Manual of Geology* (1863), *Textbook of Geology* (1864), and *System of Mineralogy* (first edition, 1837, fifth edition, 1868) were the most important treatises in this field of science written in America during his lifetime.

ORIGIN OF THE MINERAL CONSTITUTION OF IGNEOUS ROCKS
From *American Journal of Science and Arts*, Second Series, Vol. II, pp. 335–355, 1846.

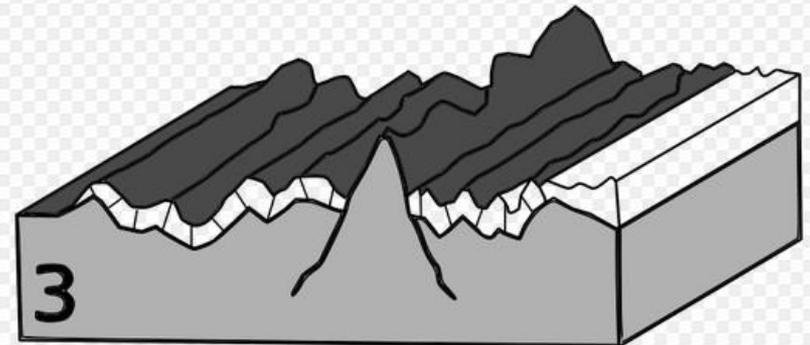
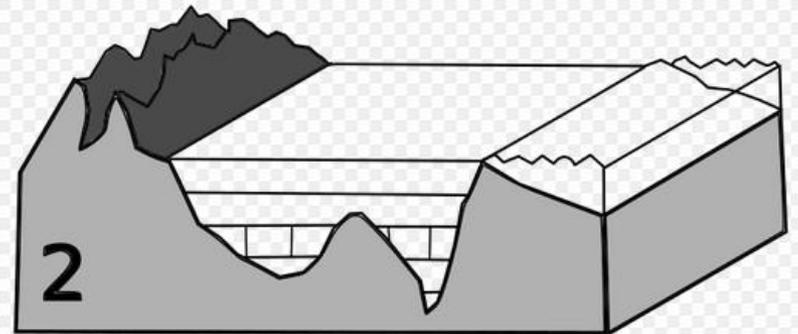
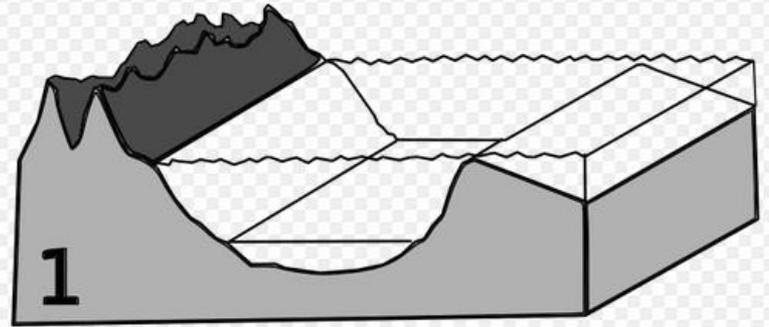
It has been a difficult problem for solution, why volcanic regions should have a centre of solid feldspathic rocks, unstratified and compact, while the exterior consisted mainly of basaltic lavas. Scrope, Von Buch, and other writers on volcanoes, have mentioned instances of this structure; and it seems to characterize generally the large volcanic mountains. It is well exhibited when the elevations are cut through by gorges; and when not, the clinkstone appears often at the summit of the cone or dome. The explanations we here venture, proceed on two principles:

1. *The motion which belongs to a boiling fluid.*
2. *The less fusibility of feldspar than the other ingredients.*

In the great boiling pools, there will necessarily be a rising of the fluid, in the hotter part, and a flow away towards either side, producing a kind of circulation. This is no hypothesis, as the fact may be witnessed in any boiling cauldron; and the lavas of Kilauea are a visible example of it. The ebullition in lavas on the earth, proceeds principally from the vapors of water and sulphur, which are constantly rising through them, inflating them more and more as they ascend, and finally escaping in bubbles at the surface. Now the feldspar being the less fusible part of the lavas, would thicken somewhat, wherever the temperature became too low for complete fusion: the more liquid portion would then ascend most easily, being carried along by the inflating vapors, and much of the feldspar would thus be left behind, and it might be in a nearly pure state. The centre of the volcano under this action, becomes

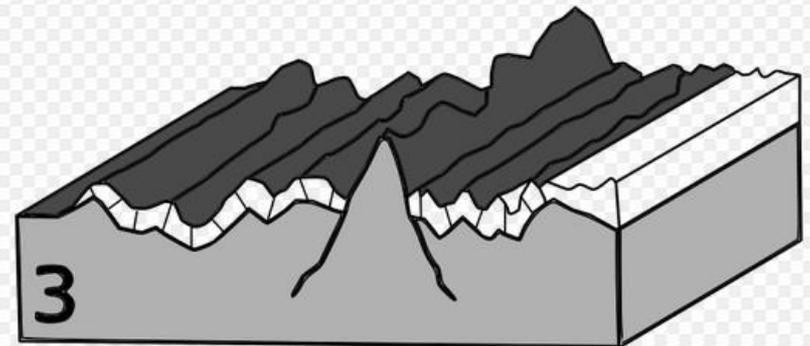
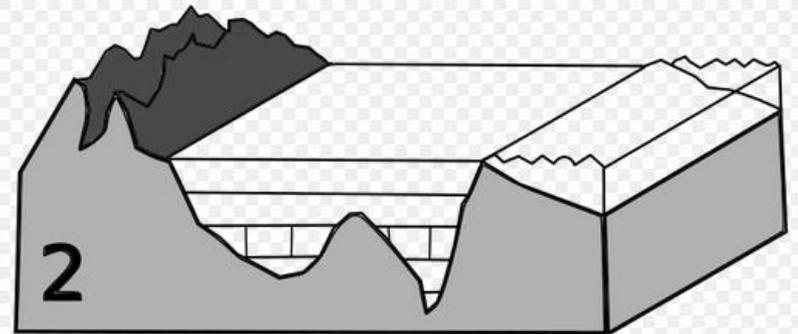
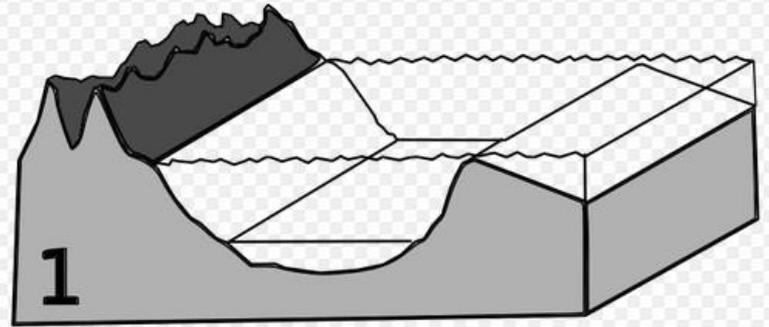
O problema das montanhas

Na América do Norte, a teoria da permanência estava ligada à teoria dos **geossinclinais**: afundamento de bacias sedimentares ao longo das margens continentais. Esta ideia foi desenvolvida principalmente por **James Hall** (1811-1889), paleontólogo de Nova York e primeiro presidente da Geological Society of America (1889). Hall observou que, sob a cobertura florestal, as montanhas Apalaches eram constituídas por camadas dobradas de rochas sedimentares de águas rasas, com milhares de metros de espessura.



O problema das montanhas

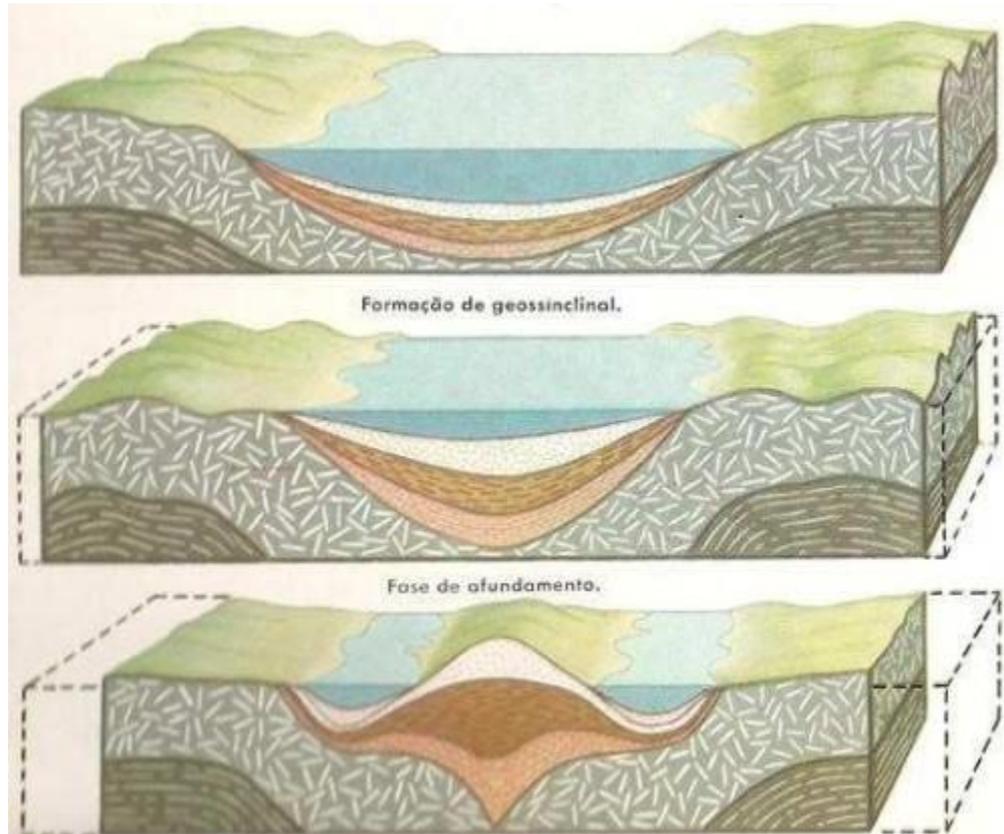
Como se formaram essas sequências de depósitos em águas rasas? Como eles foram dobrados e elevados às montanhas? Hall sugeriu que os materiais erodidos dos continentes se acumularam nas bacias marginais adjacentes, fazendo com que as bacias afundassem. A subsidência permitiu que mais sedimentos se acumulassem, causando mais subsidência, até que finalmente o peso da pilha fez com que os sedimentos fossem aquecidos, convertidos em rocha e depois elevados em montanhas.



O problema das montanhas

Dana modificou a visão de Hall, argumentando que espessas pilhas sedimentares não eram a causa da subsidência, mas o resultado dela.

De qualquer forma, a teoria forneceu uma explicação concisa de como sequências espessas de rochas em águas rasas poderiam se acumular, mas foi vaga na questão de como elas foram transformadas em cinturões de montanhas.



O problema das montanhas

No início do século 20, a teoria da contração foi desafiada por três linhas de evidência independentes. A primeira veio do mapeamento de campo.

Os geólogos do século XIX trabalharam detalhadamente para determinar a estrutura dos cinturões de montanhas, especialmente dos Alpes Suíços e dos Apalaches norte-americanos. Quando mapearam as sequências dobradas de rochas nessas regiões, descobriram que as dobras eram tão extensas que, se alguém pudesse desdobrá-las, as camadas rochosas se estenderiam por centenas de quilômetros.

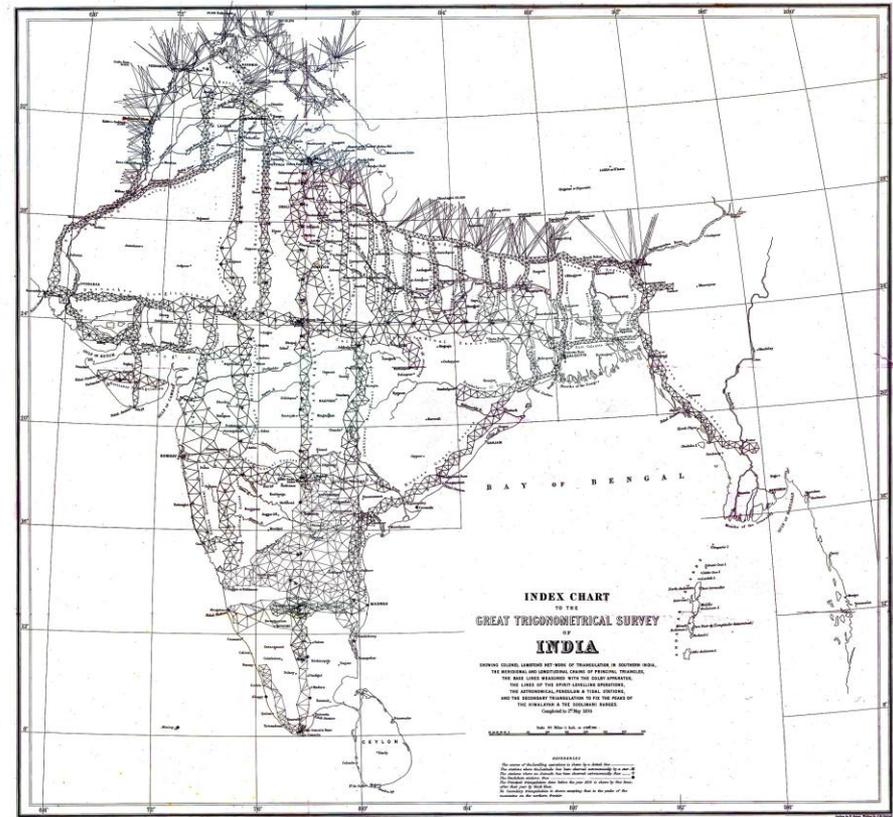
Teriam de estar envolvidas quantidades impossivelmente enormes de contração terrestre. Os geólogos começaram a duvidar da teoria da contração como explicação para a origem das montanhas.



O problema das montanhas

A segunda linha de evidência veio da geodésia – a ciência do estudo da forma da Terra, usando elementos do campo de gravidade.

Enquanto os geólogos de campo desvendavam a estrutura dos Alpes e dos Apalaches, os cartógrafos do Grande Levantamento Trigonométrico da Índia faziam medições geodésicas para produzir mapas precisos das propriedades coloniais britânicas. No início da década de 1850, o coronel (mais tarde *sir*) George Everest, o agrimensor-geral da Índia, descobriu uma discrepância nas coordenadas medidas entre duas estações geodésicas, Kaliana e Kalianpur, separadas por 600 quilômetros.



O problema das montanhas

Quando medida com base nas triangulações do topógrafo, a diferença de latitude foi cinco segundos de arco maior do que quando calculada com base na observação astronômica. Everest pensou que a diferença poderia ser devida à atração gravitacional do Himalaia sobre os prumos dos topógrafos, e convocou John Pratt (1809-1871), um matemático treinado em Cambridge e arqui-diácono de Calcutá, para examinar o problema.



John Henry Pratt

Indian Journal of History of Science, 29(1), 1994

JOHN HENRY PRATT, ARCHDEACON OF CALCUTTA AND HIS THEORY OF ISOSTATIC COMPENSATION

MANIDIPA KAHALI
Research Scholar, Asiatic Society of Bengal, Calcutta

The East India Company encouraged an extensive survey operation, and the works of Major Rennell, Lambton and Col. Everest are well known in this connection. John Henry Pratt, Archdeacon of Calcutta was likewise asked by the then Surveyor-General to give a report on isostatic compensation caused by any superficial masses, such as mountains, oceanic depressions or any other defects. Pratt calculated the actual amount of the attraction of the Himalayan mass and formulated his famous Theory of Isostasy, an account of which is presented in the paper.

The name of John Henry Pratt is related inseparably with the history of the Theory of Isostasy. The principle of Isostatic Compensation was first developed in a scientific sense in Calcutta by Pratt in 1854. At that time, Pratt was the Archdeacon of Calcutta. He studied at Gonville and Caius College and at Christ's and Sidney Sussex Colleges, Cambridge and received his B.A. degree in 1833 and M.A. in 1836. He opted for a missionary career. In 1838, he obtained a chaplaincy under the East India Company and in 1844 became chaplain to the Bishop of Calcutta. He was appointed Archdeacon of Calcutta in 1850, a post he held till his death¹.

According to Pratt's concept, the crust with different densities in different segments of blocks is floating on an effectively liquid substratum; the base of the crust is at a uniform depth and is supporting a uniform weight per unit area. The level to which the crustal blocks sink is the level of compensation.

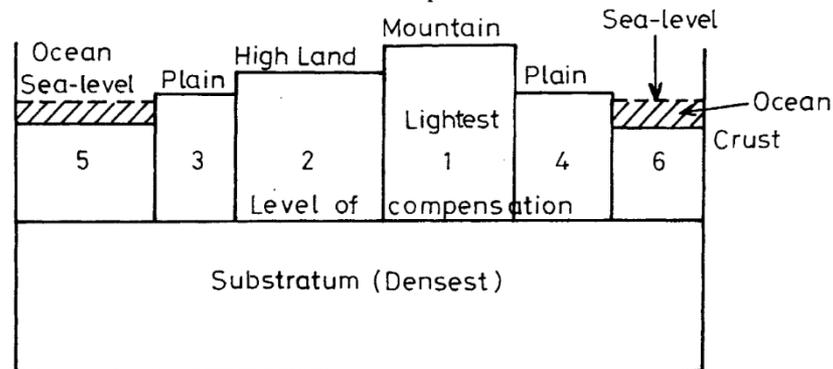


Fig. 1 Concept of Isostasy after Pratt (modified from A. Holmes) Columns 1-6 are made up of successively denser materials

O problema das montanhas

Pratt calculou o efeito gravitacional esperado das montanhas e descobriu que a discrepância era menor do que deveria: era como se faltasse parte das montanhas.

Pratt propôs que os efeitos observados poderiam ser explicados se a topografia da superfície das montanhas fosse de alguma forma compensada por um déficit de massa abaixo delas - uma ideia que veio a ser conhecida como **isostasia**, ou "posição igual".

No início do século 20, a isostasia foi confirmada por medições geodésicas e gravitacionais detalhadas nos Estados Unidos. John Hayford (1868-1925) e William Bowie (1872-1940), trabalhando no US Coast and Geodetic Survey, demonstraram que a distribuição da aceleração da gravidade era mais consistente com a suposição de isostasia, não apenas em cinturões de montanhas, mas em todos os continentes.



John Fillmore Hayford

O problema das montanhas

Sir George Biddell **Airy** (27 de julho de 1801 – 2 de janeiro de 1892) foi um matemático e astrônomo inglês, bem como o Professor Lucasiano de Matemática de 1826 a 1828 e o sétimo Astrônomo Real de 1835 a 1881. Suas muitas realizações incluem trabalho em órbitas planetárias, medição da densidade média da Terra, um método de solução de problemas bidimensionais em mecânica dos sólidos e, em seu papel como Astrônomo Real, estabelecendo Greenwich como a localização do meridiano principal.

A base do modelo de isostasia proposto por Airy é a lei de Pascal, e particularmente sua consequência de que, dentro de um fluido em equilíbrio estático, a pressão hidrostática é a mesma em todos os pontos de mesma elevação (superfície de compensação hidrostática).

Uma analogia pode ser feita com um iceberg, que sempre flutua com uma certa proporção de sua massa abaixo da superfície da água. Se muita neve cair no topo do iceberg, o iceberg afundará mais na água. Se uma camada de gelo derreter do topo do iceberg, o iceberg restante subirá. Da mesma forma, a litosfera da Terra "flutua" na astenosfera.



George Bidell Airy

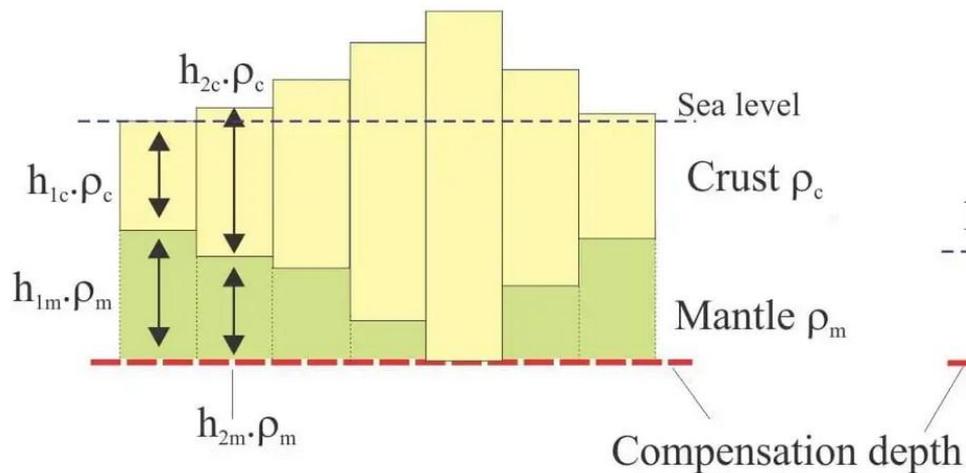
O problema das montanhas

A isostasia poderia ser alcançada de duas formas: se os continentes fossem menos densos do que as camadas de rocha abaixo deles, ou se tivessem raízes profundas, como icebergs.

De qualquer forma, eles “flutuavam” no substrato abaixo deles e, portanto, não podiam afundar para se tornarem bacias oceânicas.

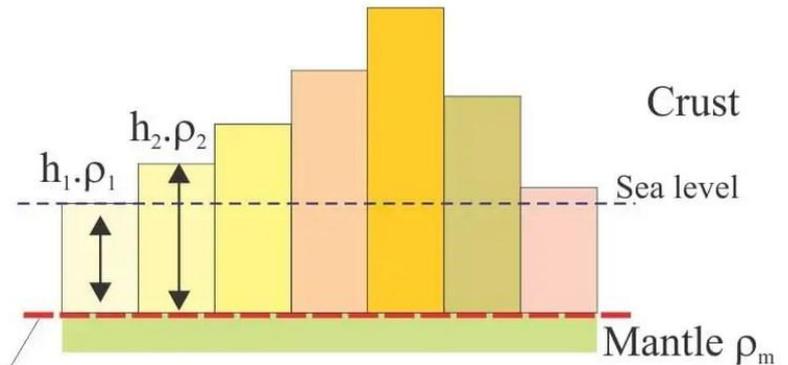
Continentes e oceanos não eram intercambiáveis.

Airy model of local isostasy



$$P = (h_{1c} \cdot \rho_c \cdot g + h_{1m} \cdot \rho_m \cdot g) = (h_{2c} \cdot \rho_c \cdot g + h_{2m} \cdot \rho_m \cdot g) = \dots$$

Pratt model of local isostasy



$$P = (h_1 \cdot \rho_1 \cdot g) = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g = \dots$$

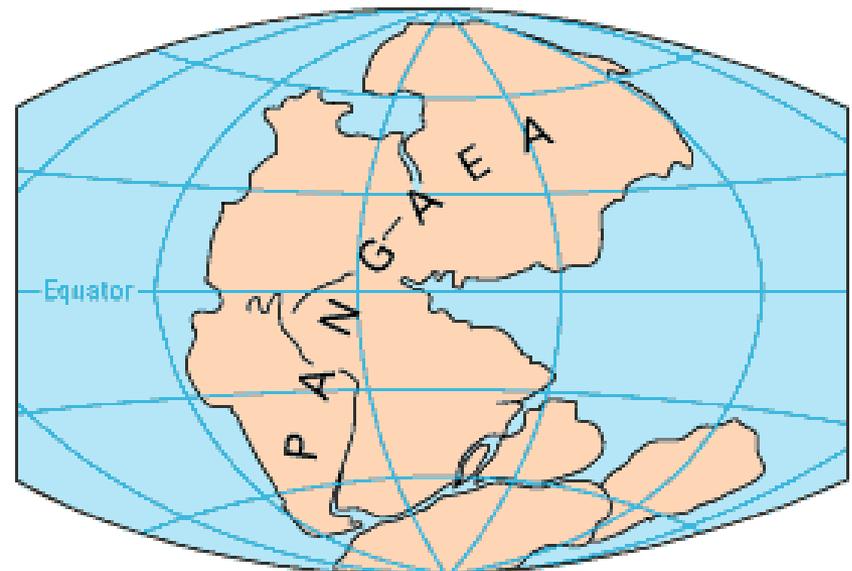
Alfred Wegener

Em 1912, aos 32 anos de idade, Alfred Wegener, um meteorologista alemão, propunha a teoria da DERIVA CONTINENTAL.



O supercontinente PANGEA

A teoria da Deriva Continental estabelecia que, há aproximadamente 200 milhões de anos, todas as massas continentais existentes estavam concentradas em um supercontinente, que ele denominou de PANGEA (“todas as massas”). O único oceano existente, por consequência, foi chamado de PANTALASSA (“todas as águas”).



PERMIAN
225 million years ago

O supercontinente Pangea

Modern reconstruction of Pangaea

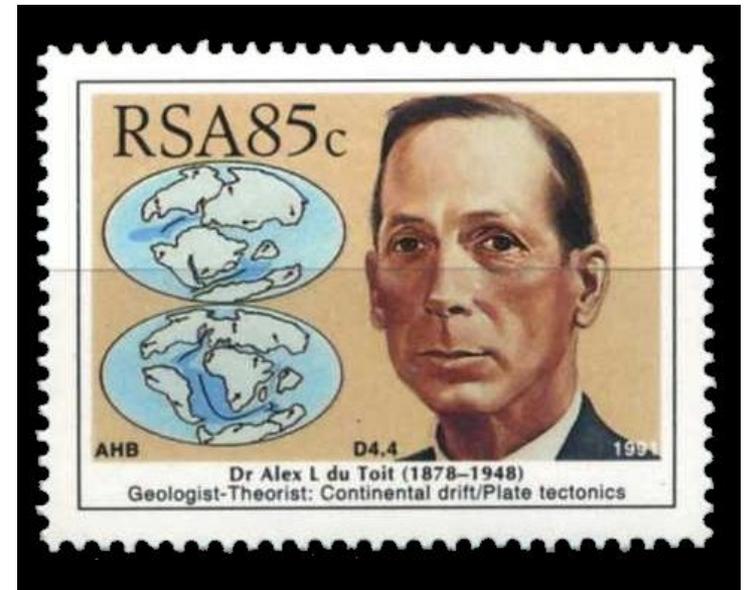
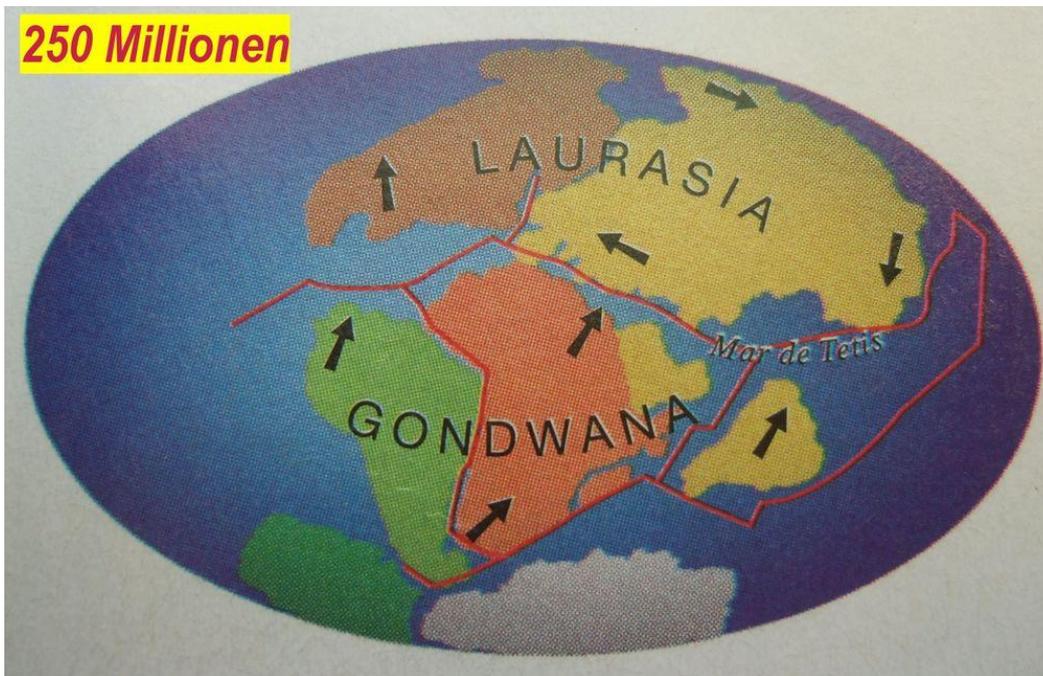


Pangaea,
redrawn from
Wegener's book.



A quebra do PANGEA

A quebra do supercontinente PANGEA originaria, inicialmente, duas grandes massas continentais: a Laurásia no hemisfério Norte, e o Gondwana no Hemisfério Sul, segundo a nomenclatura proposta por Alexander Du Toit, um dos poucos defensores da idéia de Wegener.

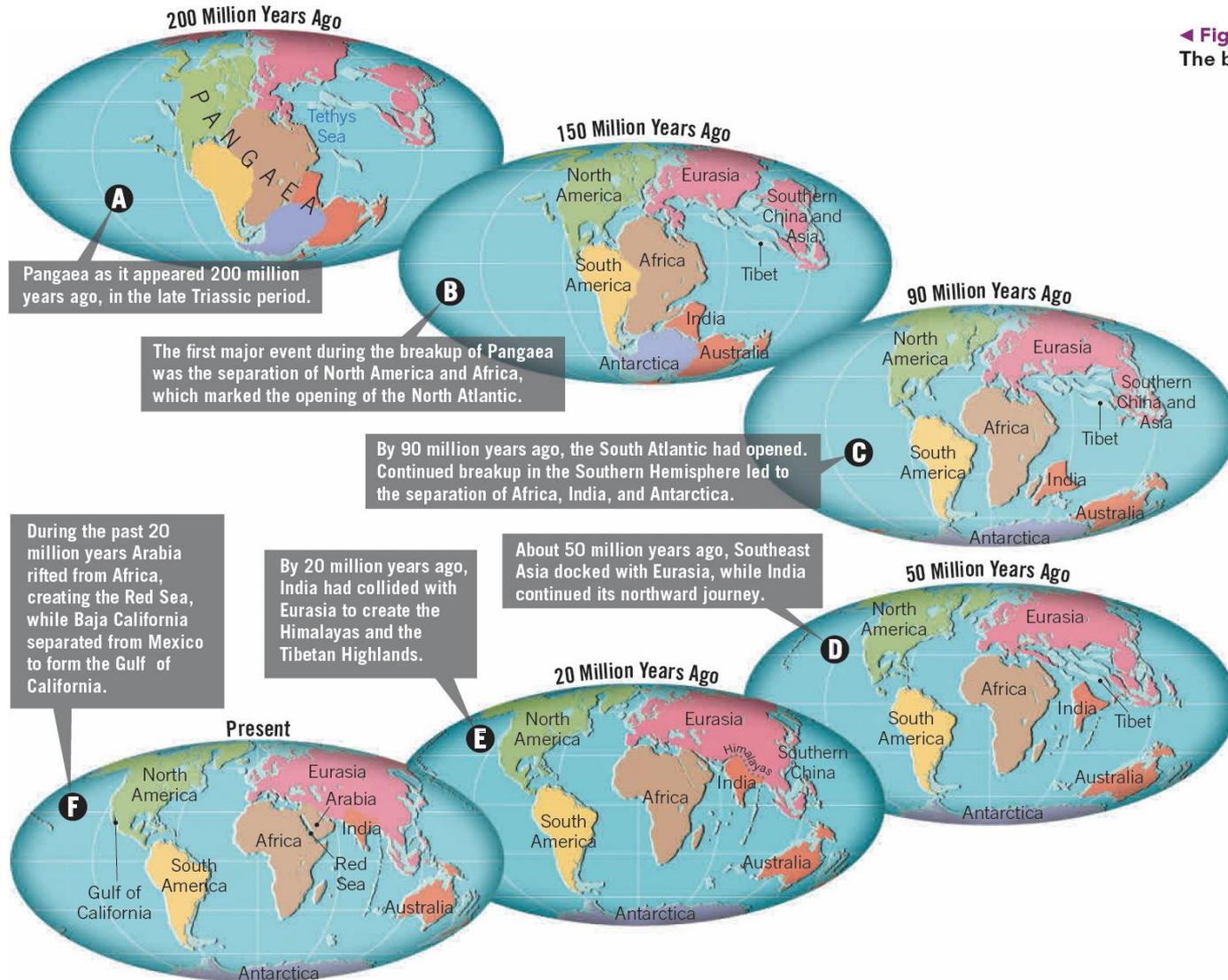


A Laurásia e o Gondwana

A Laurásia e o Gondwana teriam a partir de então continuado o processo de separação, originando os continentes que conhecemos na atualidade.



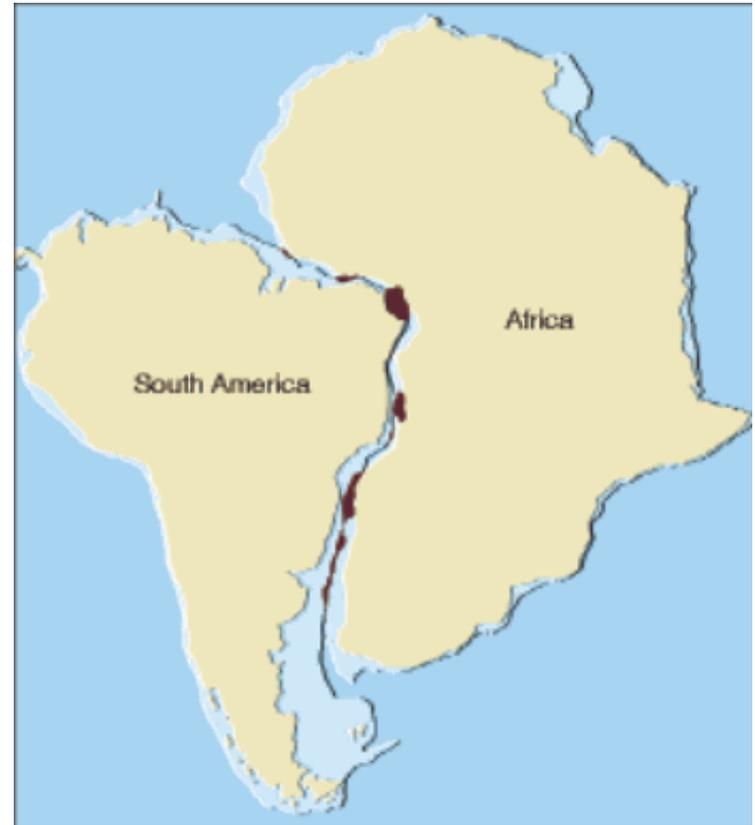
A quebra do Pangea



◀ **Figure 3.22**
The breakup of Pangaea

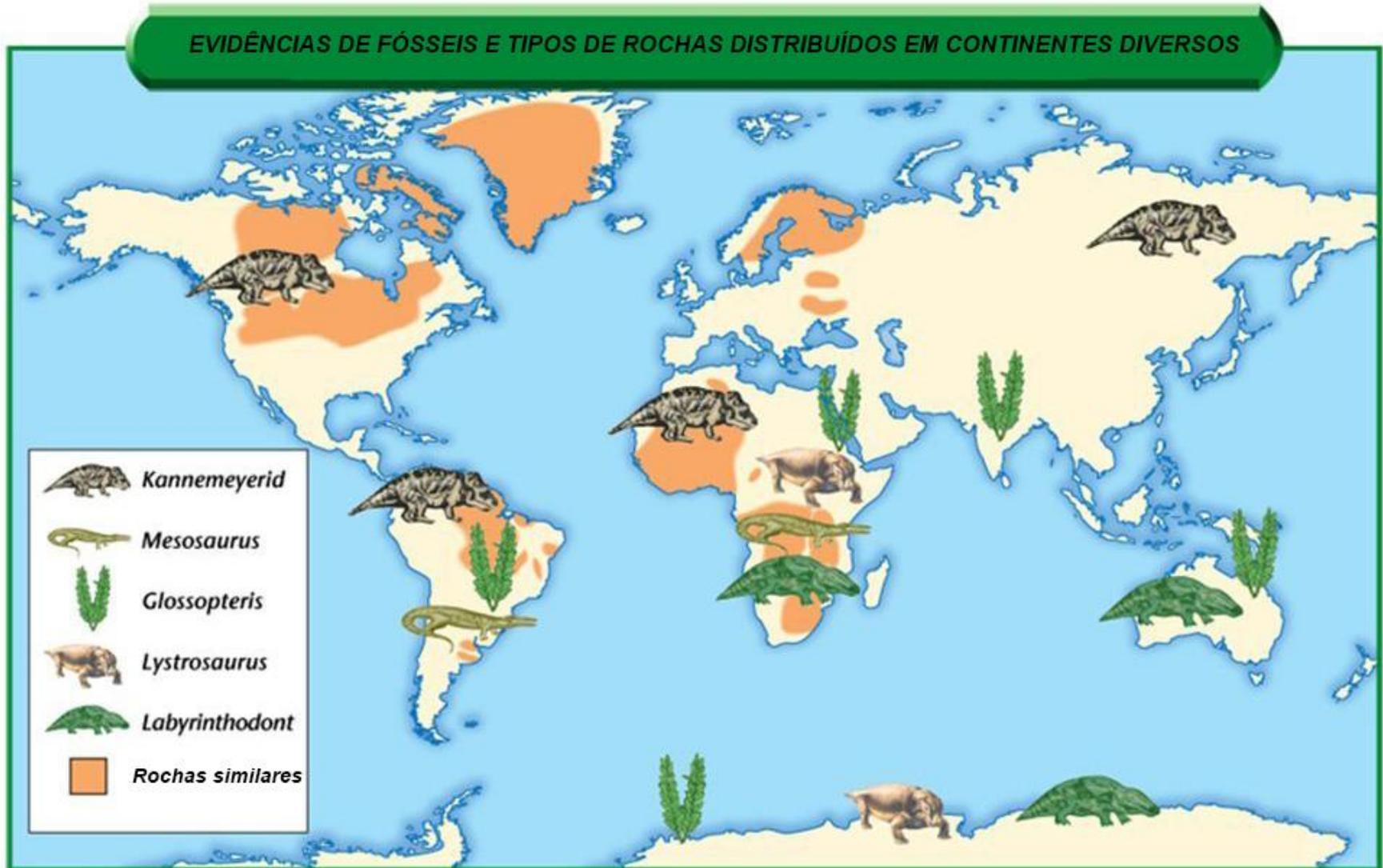
Evidências utilizadas

A teoria de Wegener se apoiava em diversas informações que ele havia conseguido por estudos de trabalhos publicados em diversas áreas de conhecimento, como por exemplo, similaridade entre as linhas de costa da América do Sul e África, já notada por Ortelius.



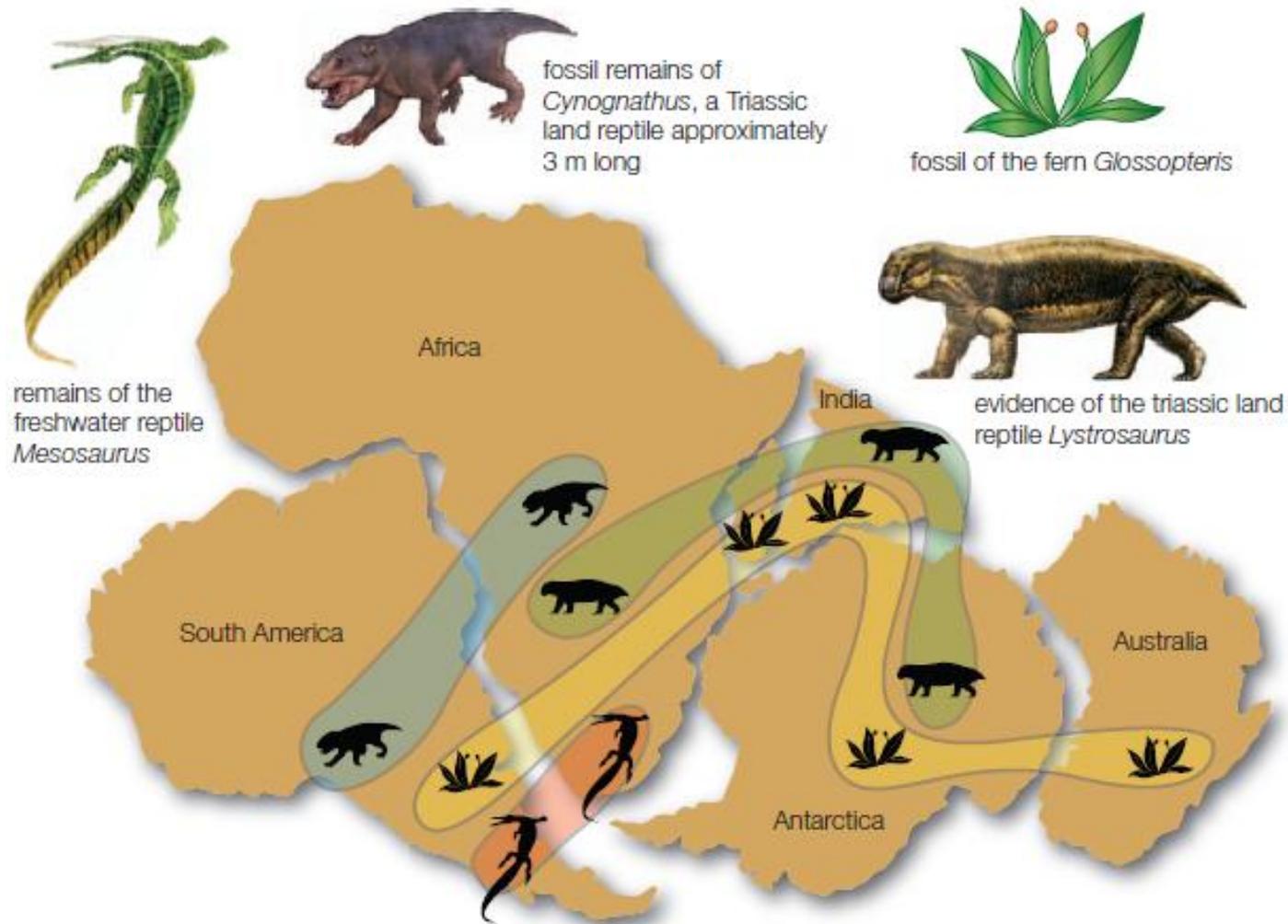
As evidências de Wegener

Outra observação importante era relativa à distribuição de fósseis no continente Africano e Sul-americano.



As evidências de Wegener

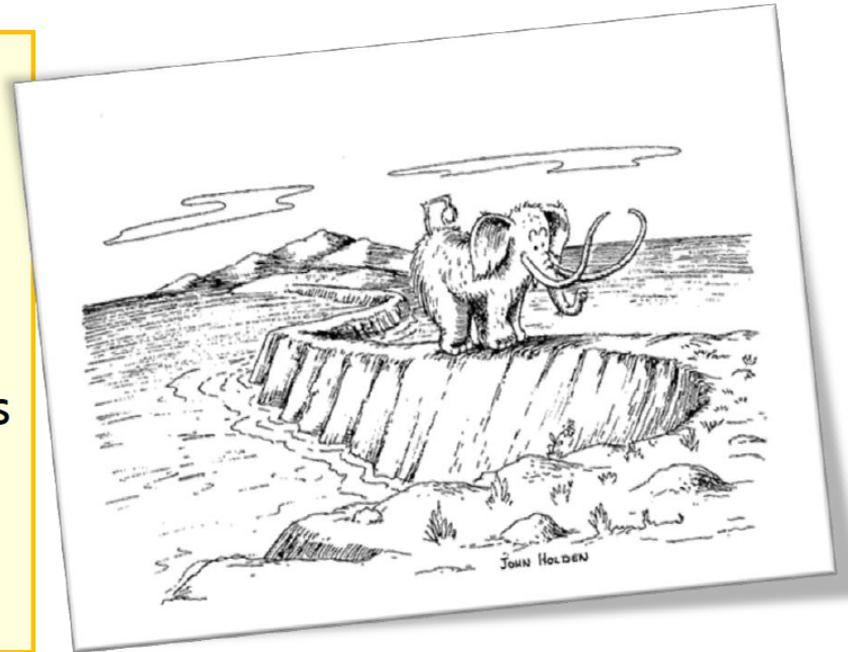
A distribuição de fósseis no continente Africano e Sul-americano fazia sentido com os continentes dispostos adequadamente, numa configuração diferente da atual.



As evidências de Wegener

A distribuição de fósseis no continente Africano e Sul-americano fazia sentido com os continentes dispostos adequadamente, numa configuração diferente da atual.

Os geólogos que não aceitavam a hipótese da deriva dos continentes explicavam a existência do mesmo tipo de fósseis em continentes separados pelo oceano Atlântico, afirmando a possibilidade de terem existido “pontes intercontinentais”, através das quais os seres vivos poderiam ter migrado de um continente para outro.



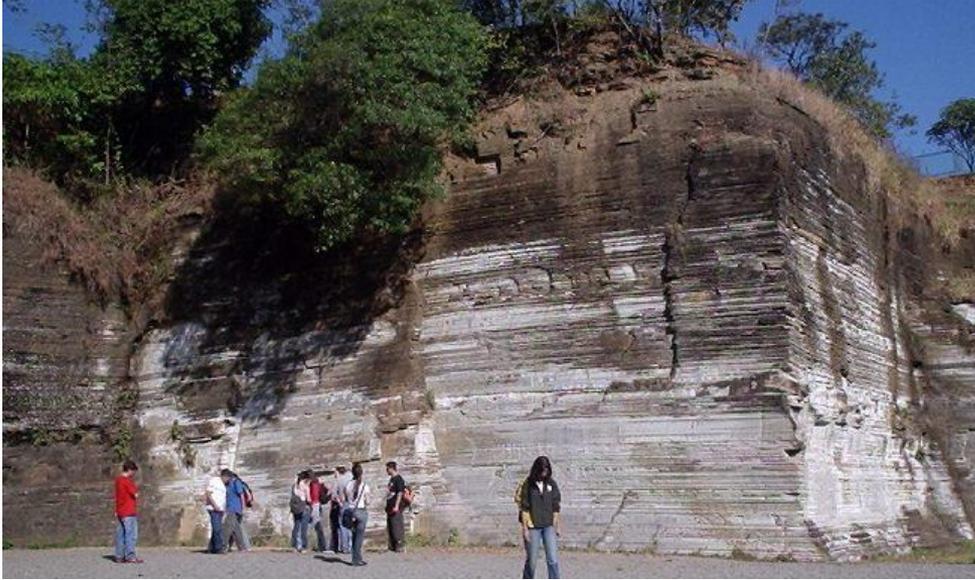
As evidências de Wegener

Dramáticas mudanças nos climas observadas em todos os continentes, como a presença de sedimentos de origem glacial em locais onde hoje temos desertos, no caso da África, ou em ambientes tropicais, como São Paulo, não podiam ser explicadas para os continentes na posição atual.



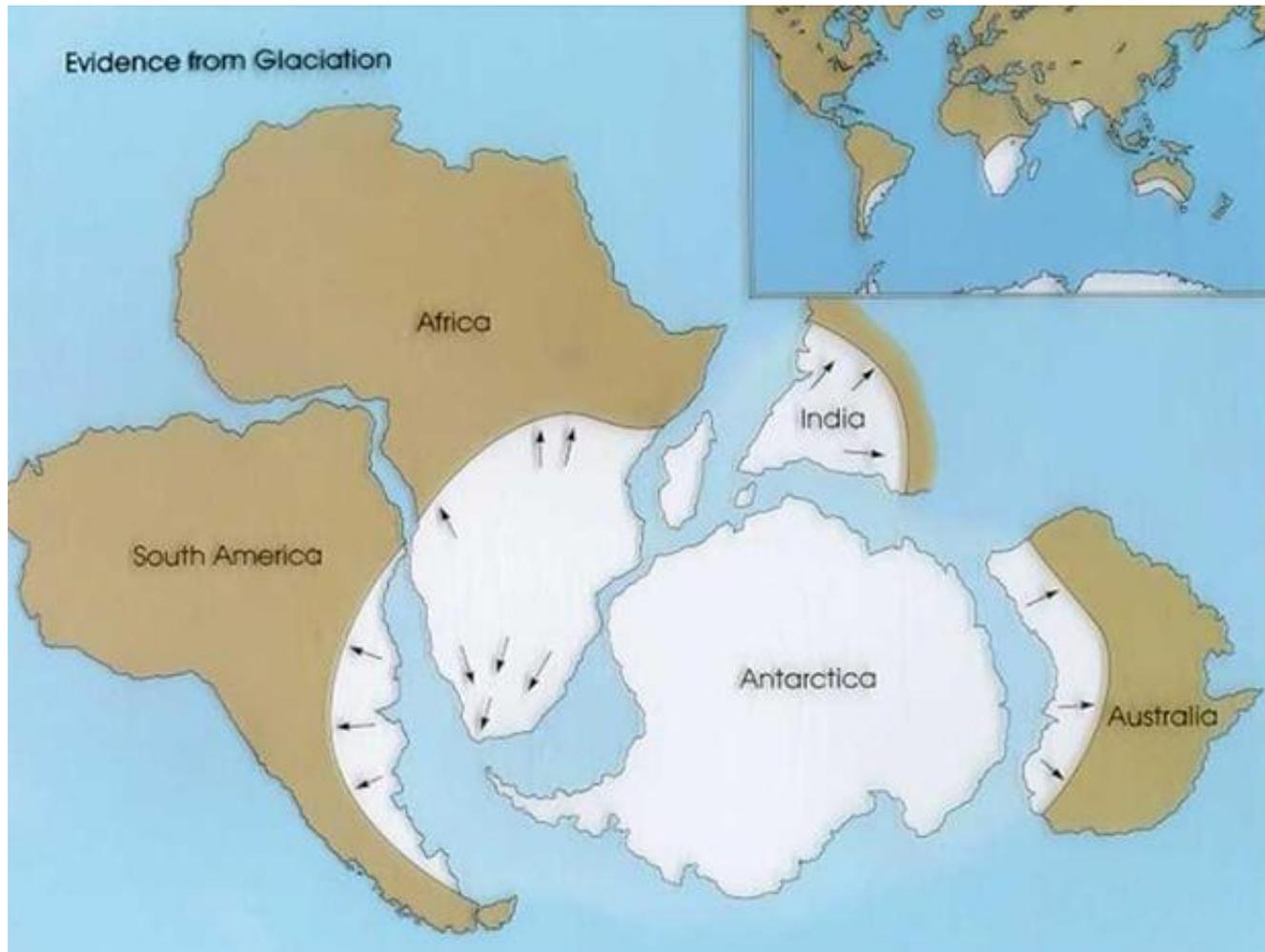
As evidências de Wegener

Parque do Varvito – Itu – São Paulo



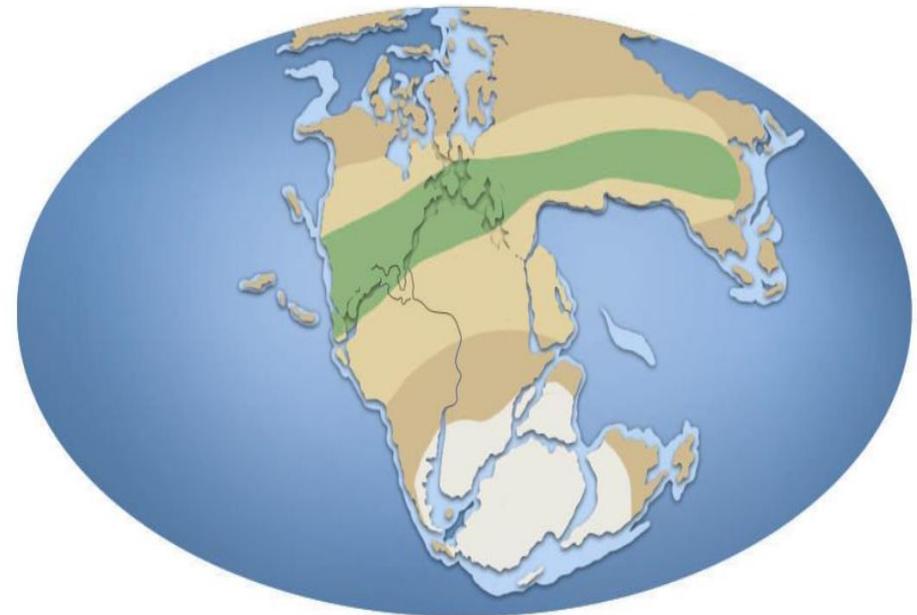
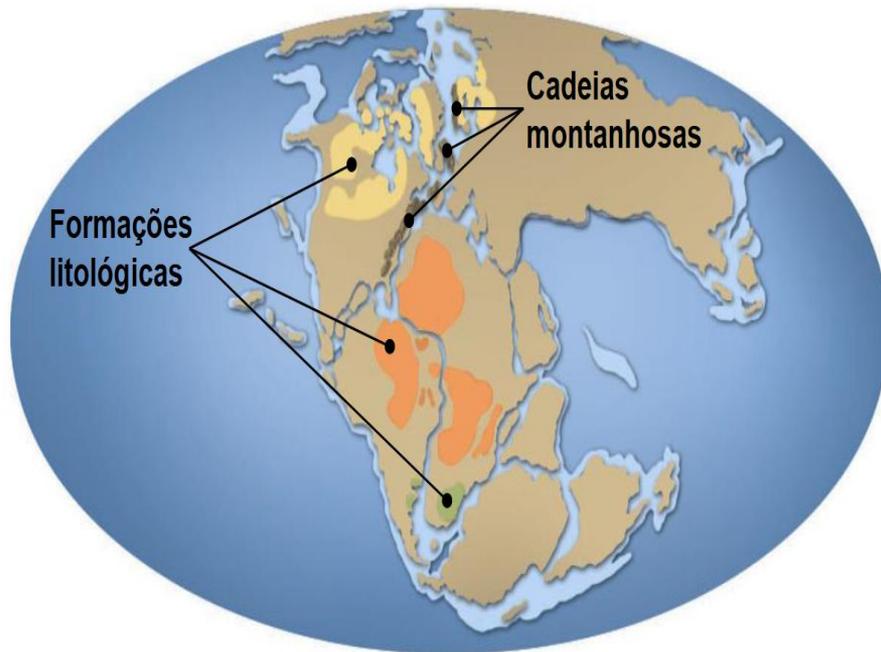
As evidências de Wegener

Com os continentes na configuração proposta por Wegener, as regiões com rochas de origem glacial apresentavam uma distribuição contínua e coerente.



As evidências de Wegener

Com os continentes na configuração proposta por Wegener, as regiões com rochas de origem glacial, desértica, e de ambientes de pântano apresentavam uma distribuição contínua e coerente.



- Clima tropical
- Clima desértico
- Glaciares

As evidências de Wegener

Algumas estruturas geológicas e fisiográficas que apresentavam continuidade além dos oceanos também não eram bem explicadas se os continentes sempre estiveram na posição que ocupam hoje na superfície terrestre.



A.

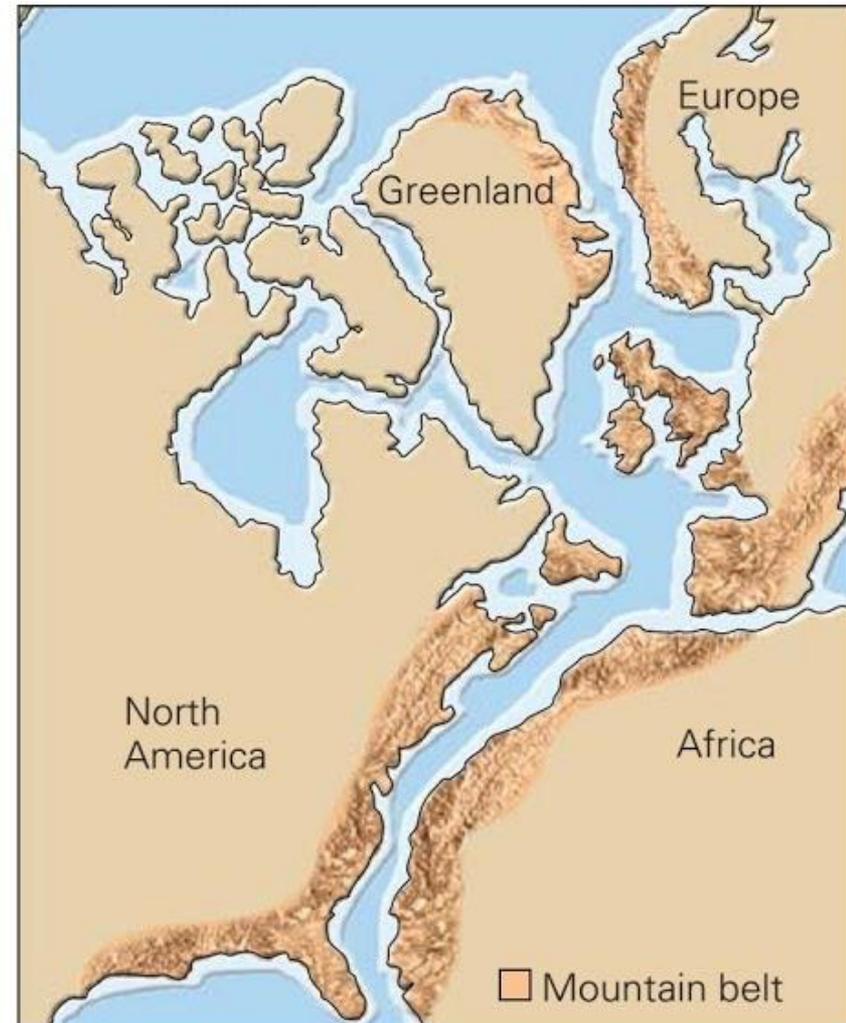
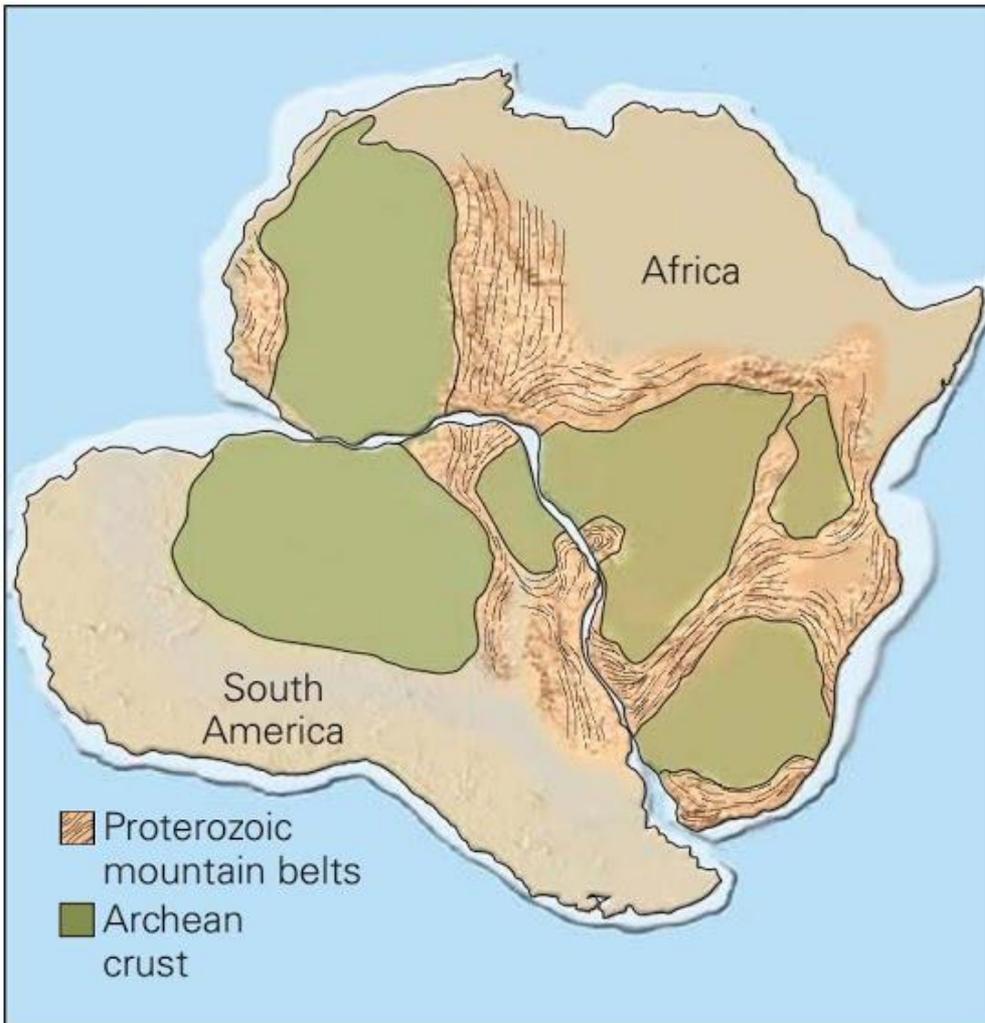


B.

Matching mountain ranges across the North Atlantic A. The current locations of the continents surrounding the Atlantic. B. The configuration of the continents about 200 million years ago.

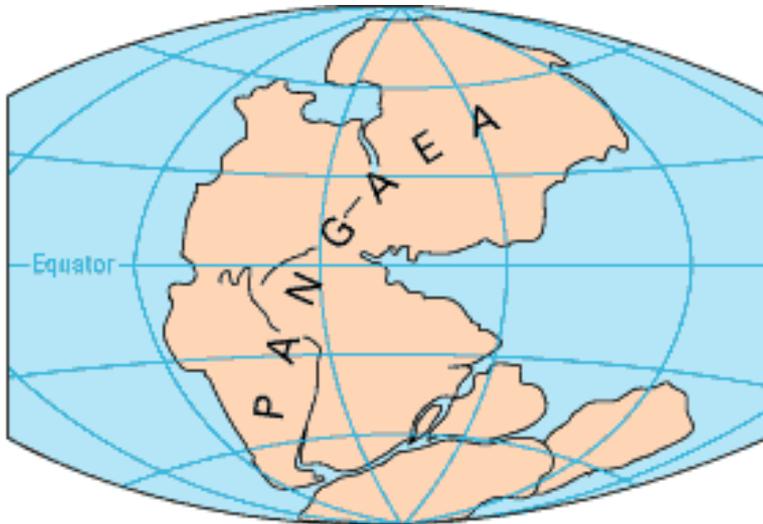
As evidências de Wegener

Na configuração pré-separação, grandes estruturas hoje separados por oceanos apresentam-se contínuas.

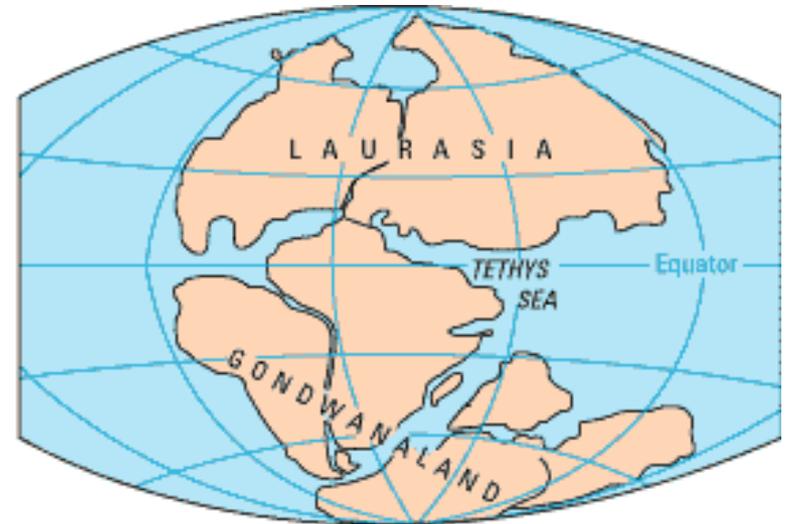


A teoria de Wegener

A teoria de mobilidade continental proposta por Wegener explicava bem a distribuição dos fósseis, o ajuste das linhas de costa, e as dramáticas mudanças nos climas observadas em ambos os continentes, bem como a continuidade de grandes feições fisiográficas cruzando oceanos.



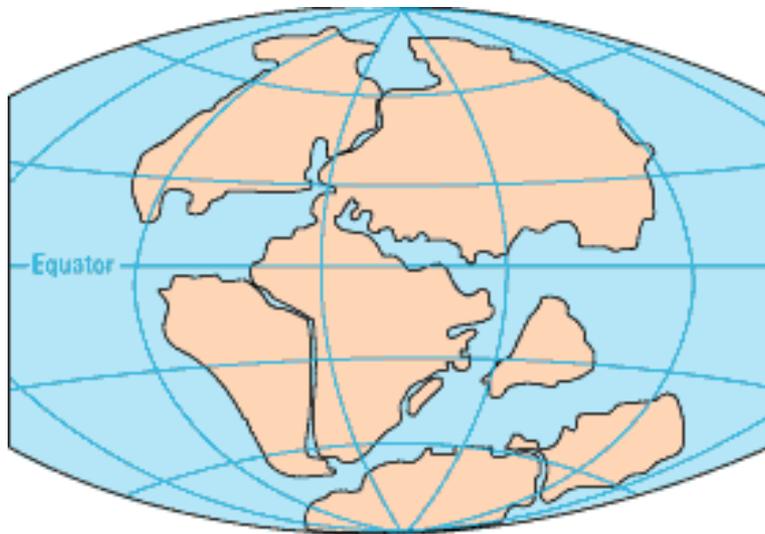
PERMIAN
225 million years ago



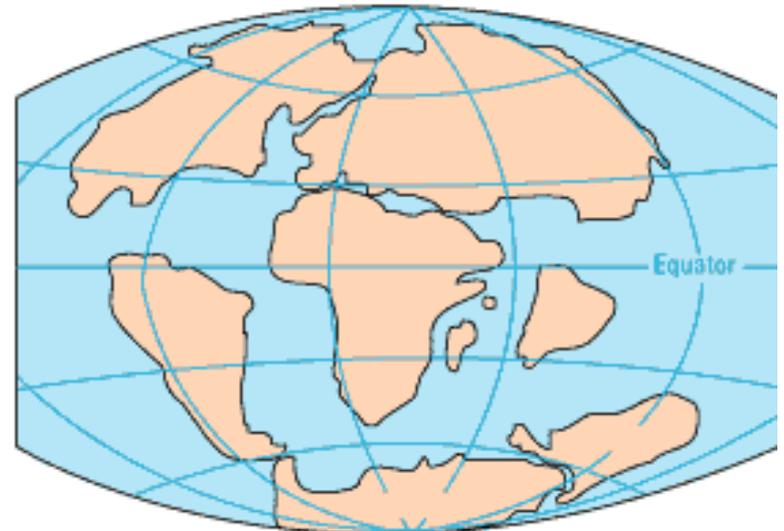
TRIASSIC
200 million years ago

A teoria de Wegener

A teoria de mobilidade continental proposta por Wegener explicava bem a distribuição dos fósseis, o ajuste das linhas de costa, e as dramáticas mudanças nos climas observadas em ambos os continentes, bem como a continuidade de grandes feições fisiográficas cruzando oceanos.



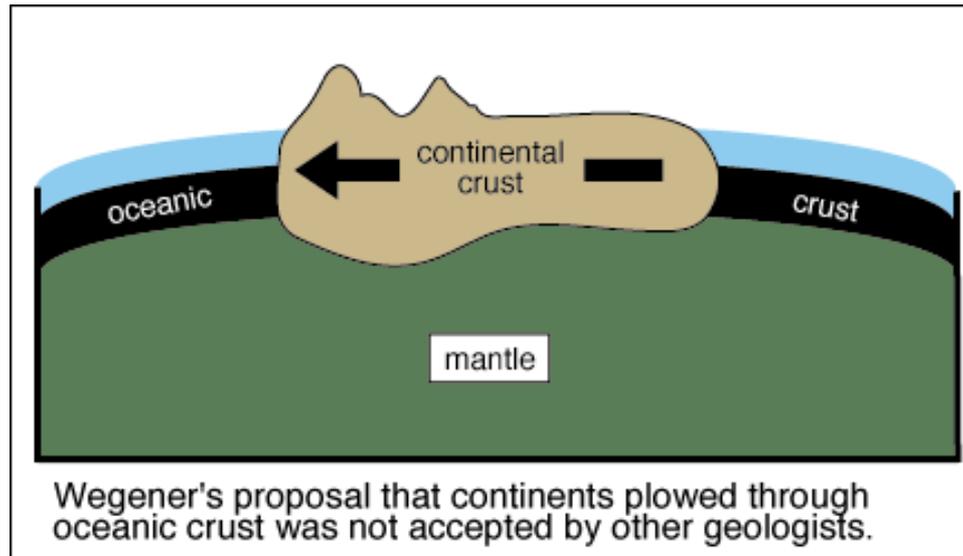
JURASSIC
135 million years ago



CRETACEOUS
65 million years ago

O maior problema de Wegener

A pergunta fundamental que Wegener não conseguia responder era: ***"que tipo de força conseguiria mover tamanhas massas a tão grandes distâncias?"***



**Você já
parou para
pensar que...**



Ele segurou um helicóptero



Ele segurou um trem



Ele segurou dois continentes

A morte de Wegener

Alfred Wegener morreu durante uma expedição meteorológica à Groenlândia, em 1930. A idéia de comprovar a teoria da deriva continental ocupou toda a sua vida.



Uma das últimas fotos de Wegener, em novembro de 1930, pouco antes de partir para a sua derradeira busca de alimentos para o acampamento na Groenlândia.

A morte de Wegener

A última expedição de Wegener à Groenlândia foi em 1930. Os 14 participantes sob sua liderança deveriam estabelecer três estações permanentes das quais a espessura da camada de gelo da Groenlândia poderia ser medida e observações climáticas do Ártico feitas durante todo o ano.

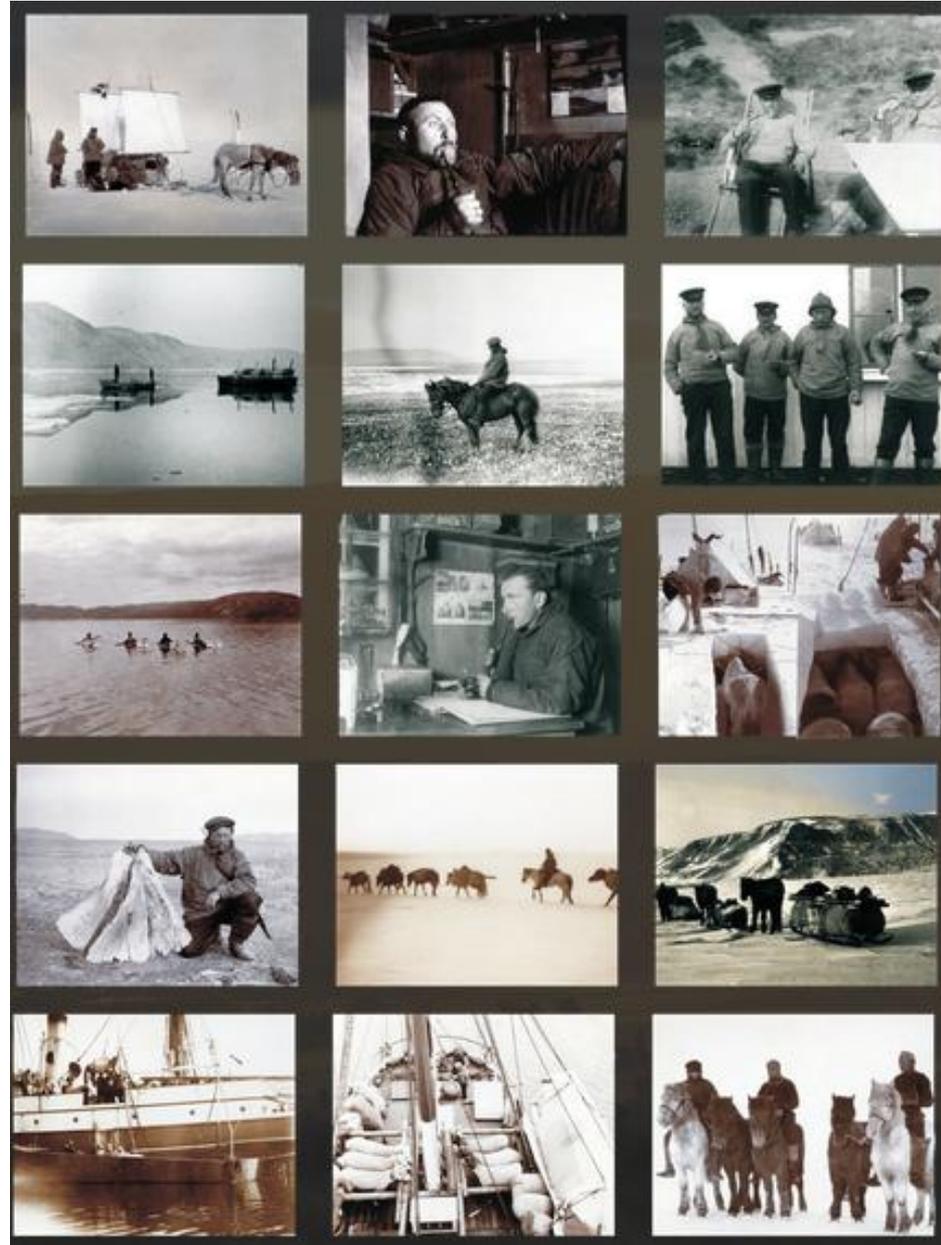


Members of the main expedition to Greenland before embarking on 1 April 1930. Georgi is fourth from left; Wegener is seventh from left.

A morte de Wegener

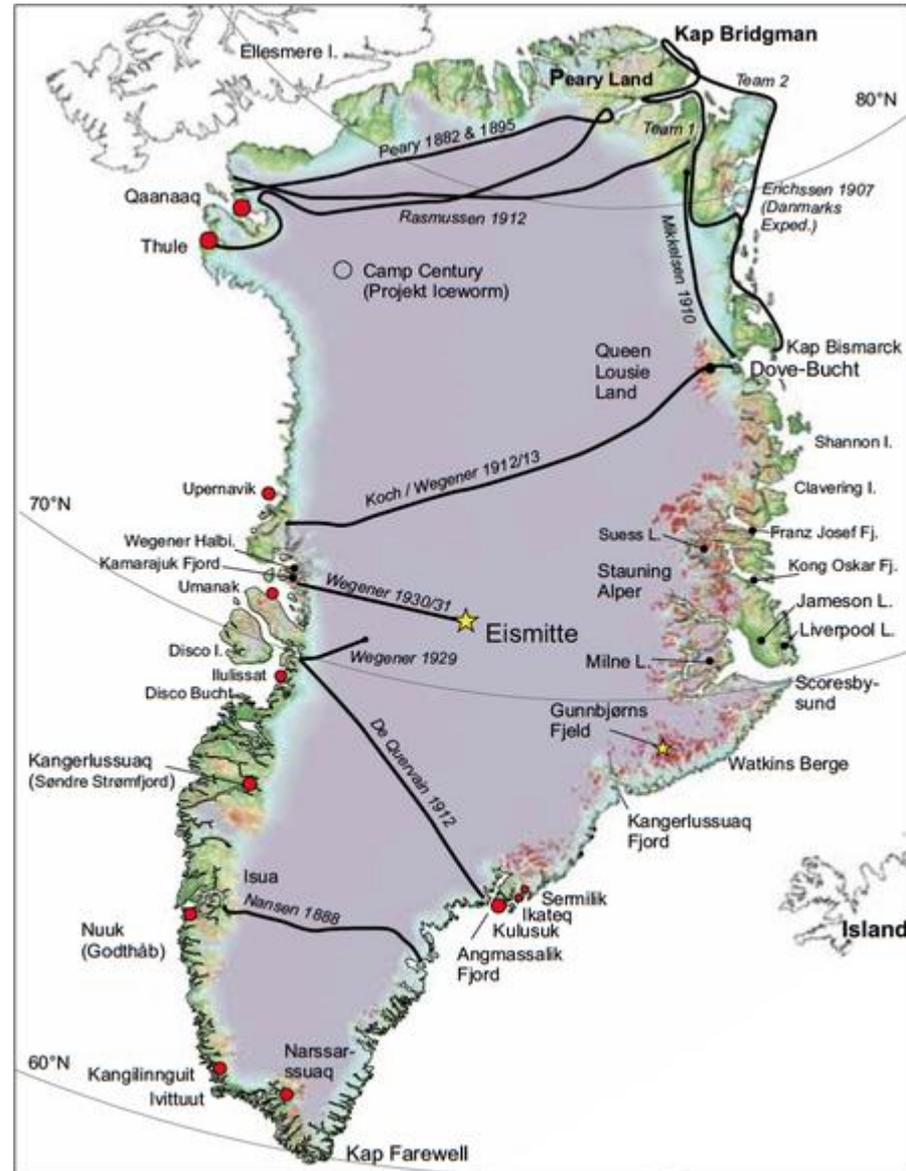
Eles viajariam na calota de gelo usando dois inovadores snowmobiles movidos a hélice, além de pôneis e trenós puxados por cães.

Wegener se sentia pessoalmente responsável pelo sucesso da expedição, pois o governo alemão havia contribuído com US\$ 120.000 (US\$ 1,5 milhão em dólares de 2007). O sucesso dependia da transferência de provisões suficientes do acampamento Oeste para Eismitte para dois homens passarem o inverno lá, e esse foi um fator na decisão que levou à sua morte.



A morte de Wegener

Devido a um degelo tardio, a expedição estava seis semanas atrasada e, quando o verão terminou, os homens em Eismitte enviaram uma mensagem de que não tinham combustível suficiente e, portanto, retornariam em 20 de outubro.



A morte de Wegener

Em 24 de setembro, embora os marcadores de rota estivessem agora em grande parte enterrados sob a neve, Wegener partiu com treze groenlandeses e o meteorologista Fritz Loewe para abastecer o acampamento em trenós puxados por cães.



A morte de Wegener

Durante a viagem, a temperatura atingiu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e os dedos dos pés de Loewe ficaram tão congelados que tiveram que ser amputados com um canivete sem anestesia. Doze groenlandeses retornaram ao acampamento Oeste. Em 19 de outubro, os três membros restantes da expedição chegaram a Eismitte.



Georgi

Wegener

Loewe

Sorge

A morte de Wegener

O membro da expedição Johannes **Georgi** estimou que havia suprimentos suficientes apenas para três pessoas em Eismitte, então Wegener e o nativo groenlandês Rasmus Villumsen, de 27 anos, pegaram dois trenós puxados por cães e foram para o acampamento Oeste.



Georgi (right) films the departure of Wegener (left) and Rasmus (middle) from Eismitte on 15 November 1930.
From Georgi 1933: 17.

A morte de Wegener

Eles não levaram comida para os cães e os mataram um por um para alimentar o resto até que pudessem correr apenas com um trenó. Enquanto Villumsen andava de trenó, Wegener teve que usar esquis, mas eles nunca chegaram ao acampamento.



Alfred Wegener y el esquimal Villumsen en una de sus últimas imágenes

A morte de Wegener

Wegener morreu em sua tenda a cerca de 145 quilômetros de Eismitte e foi enterrado às pressas com seus esquis presos na neve.

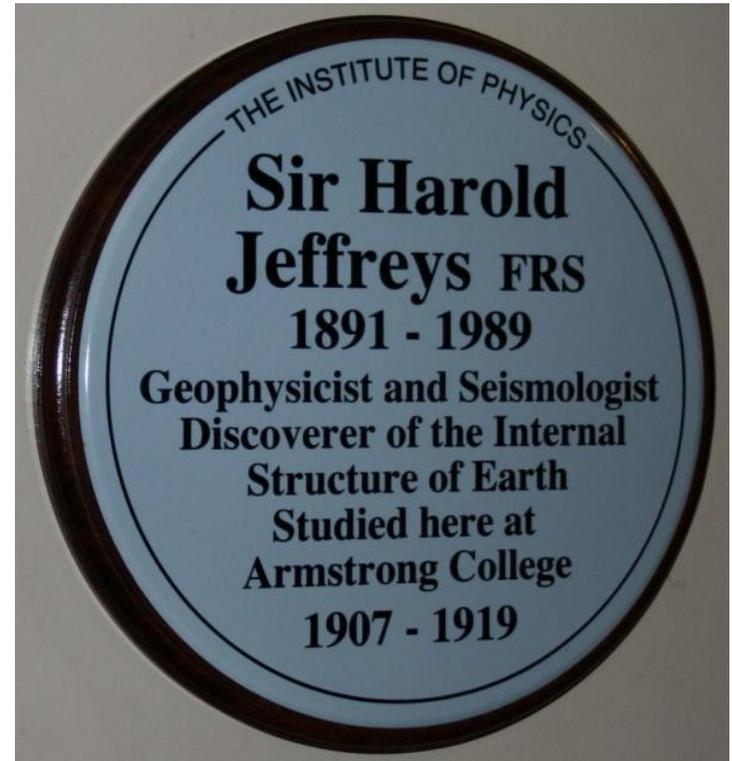
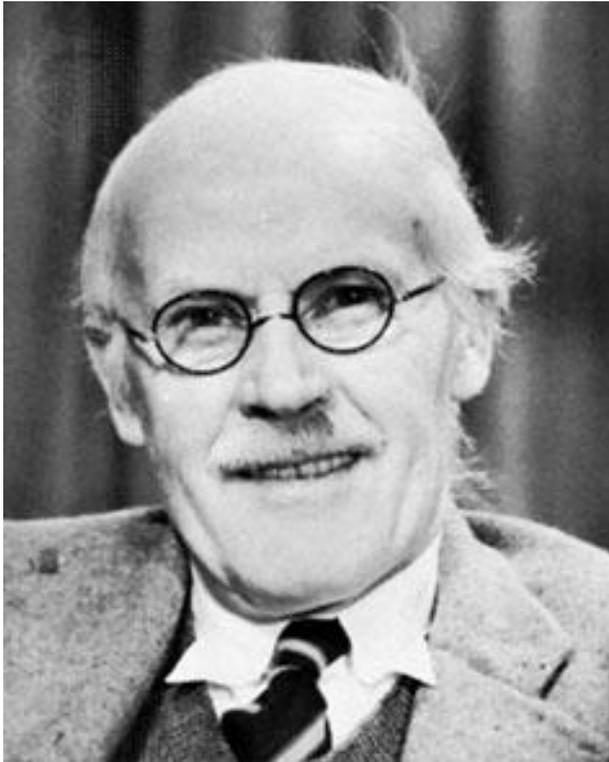
Georgi descobriu mais tarde que havia subestimado os suprimentos e que Wegener e Villumsen poderiam ter passado o inverno em Eismitte.



<https://www.environmentandsociety.org/exhibitions/wegener-diaries/greenland-diaries>

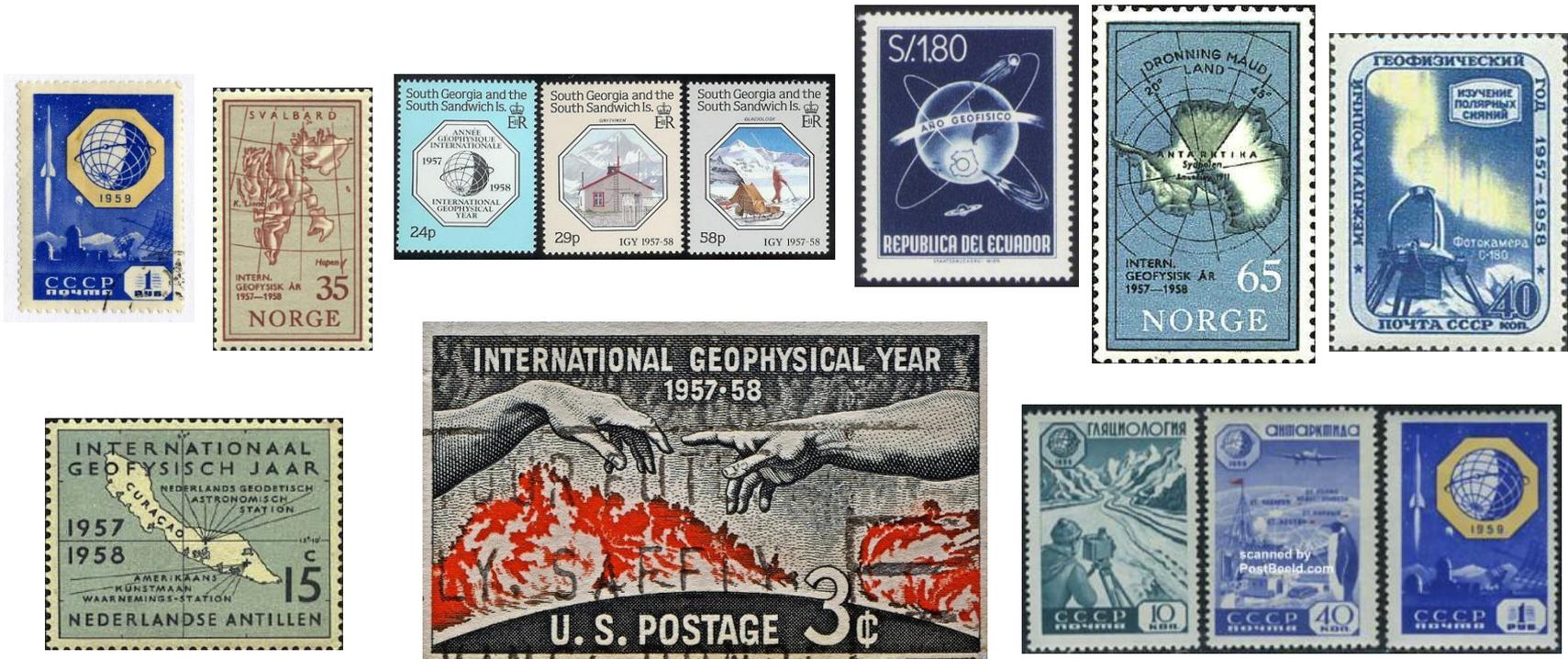
A Terra pós-Wegener

A teoria de Wegener foi muito contestada nos anos seguintes à sua morte, com o principal ponto negativo sendo o fato de que as massas continentais não poderiam se movimentar pelos oceanos da maneira proposta sem se fragmentar inteiramente, o que foi demonstrado por Harold Jeffreys, um renomado sismólogo inglês.



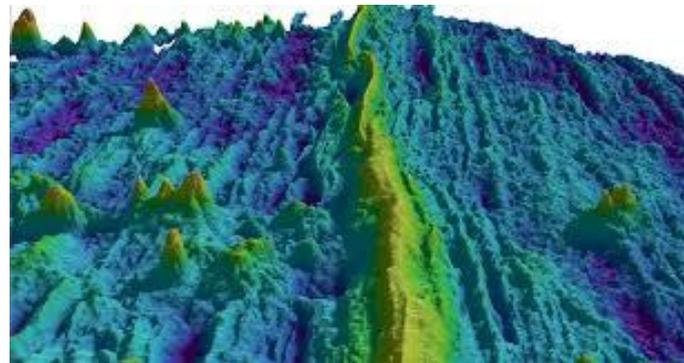
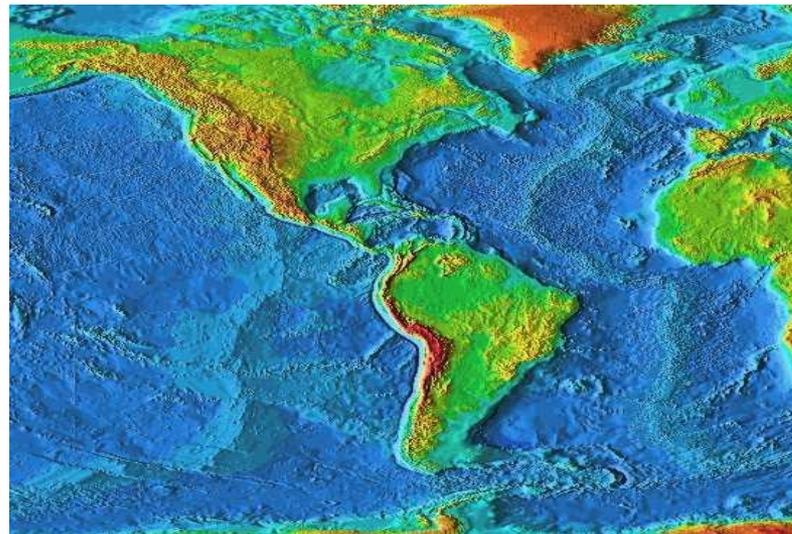
A Terra pós-Wegener

No início da década de 1950, porém, as idéias de Wegener foram retomadas, face a novas observações e descobertas científicas, ligadas especialmente aos oceanos. Um novo debate surgiu sobre as provocativas idéias de Wegener e suas implicações.



O assoalho oceânico irregular

Durante as guerras mundiais, muito esforço foi feito para um mapeamento preciso do fundo oceânico, resultando em uma imagem inesperada: um assoalho “*enrugado*”, com montes e depressões, o que foi constatado quando da necessidade da implantação de cabos telegráficos submarinos. Foram descobertas enormes cadeias de montanhas submarinas, situadas no meio do oceano Atlântico.

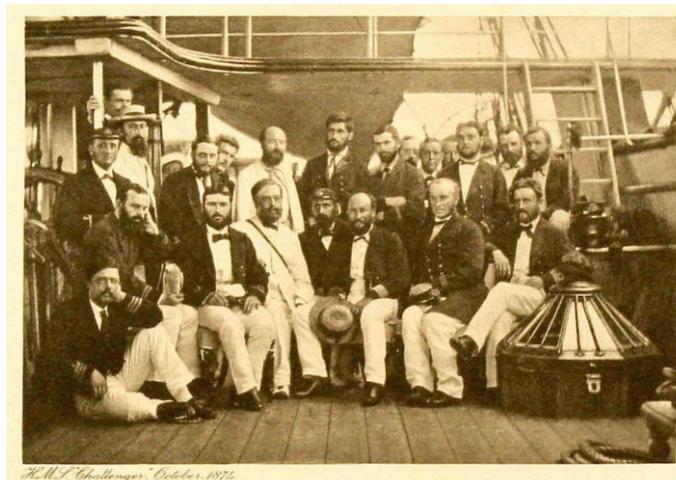


O assoalho oceânico irregular

- Medidas antigas usando cordas e pesos como bolas de canhão sugeriam que o fundo oceânico era bastante complexo;

- Em 1854 Matthew Fontaine Maury identificou em seu mapa um platô no meio do Atlântico Norte;

- Nos anos 1870, medidas a bordo do HMS Challenger mostravam uma elevação no Atlântico Central, e medidas de temperatura indicavam que havia uma compartimentação entre duas porções da bacia oceânica na região.



O assoalho oceânico irregular

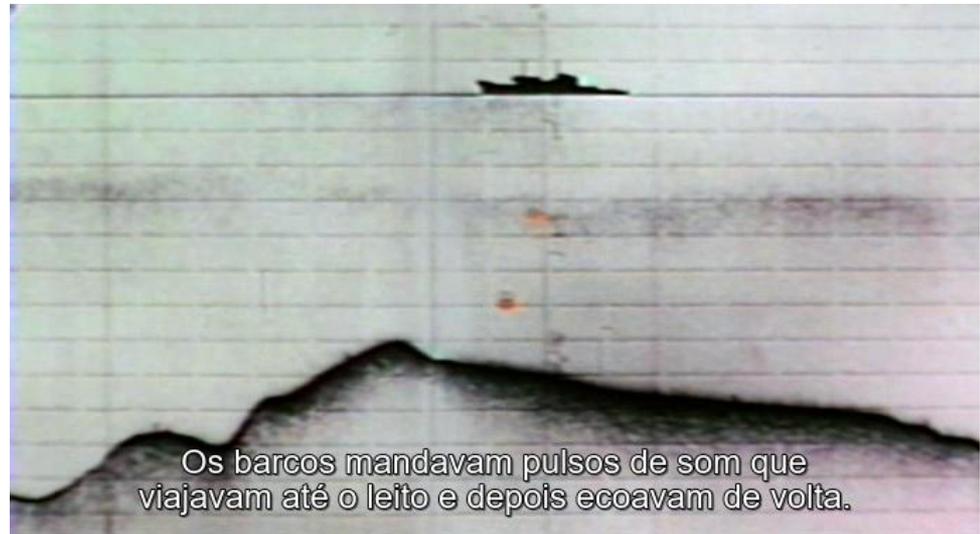
Durante a Segunda Guerra Mundial, Ewing e Joe Worzel, trabalhando em Woods Hole, desenvolveram o eco-batímetro contínuo para a Marinha. Com este novo instrumento, as medições de profundidade poderiam ser feitas ininterruptamente e 24 horas por dia.



O assoalho oceânico irregular

Um sinal sonoro, geralmente um *ping* eletrônico, seria enviado em intervalos regulares, e um microfone dentro do casco do navio captaria o eco. À medida que um sinal era enviado, uma caneta era acionada para baixo, através de uma tira continuamente enrolada de papel de dez centímetros de largura.

Quando o eco retornasse, a caneta marcaria o papel queimando-o com uma faísca elétrica. O resultado foi um perfil ininterrupto das profundidades do fundo do mar ao longo do curso do navio.



Marie Tharp e o fundo oceânico

“Eu nunca teria tido a oportunidade de estudar geologia se não fosse Pearl Harbor. As meninas eram necessárias para preencher os cargos deixados em aberto porque os rapazes estavam lutando. Um ano após o início da guerra, o departamento de geologia da Universidade de Michigan abriu suas portas para as mulheres.”

“Em 1943, cerca de dez de nós, mulheres, respondemos a um dos seus panfletos, que prometia um emprego na indústria petrolífera se conseguíssemos uma licenciatura em geologia. Parecia algo que eu poderia fazer. Fiz mestrado e consegui um emprego na Stanolind Oil and Gas Co. em Tulsa, Oklahoma.”



Marie Tharp (July 30, 1920 – August 23, 2006)

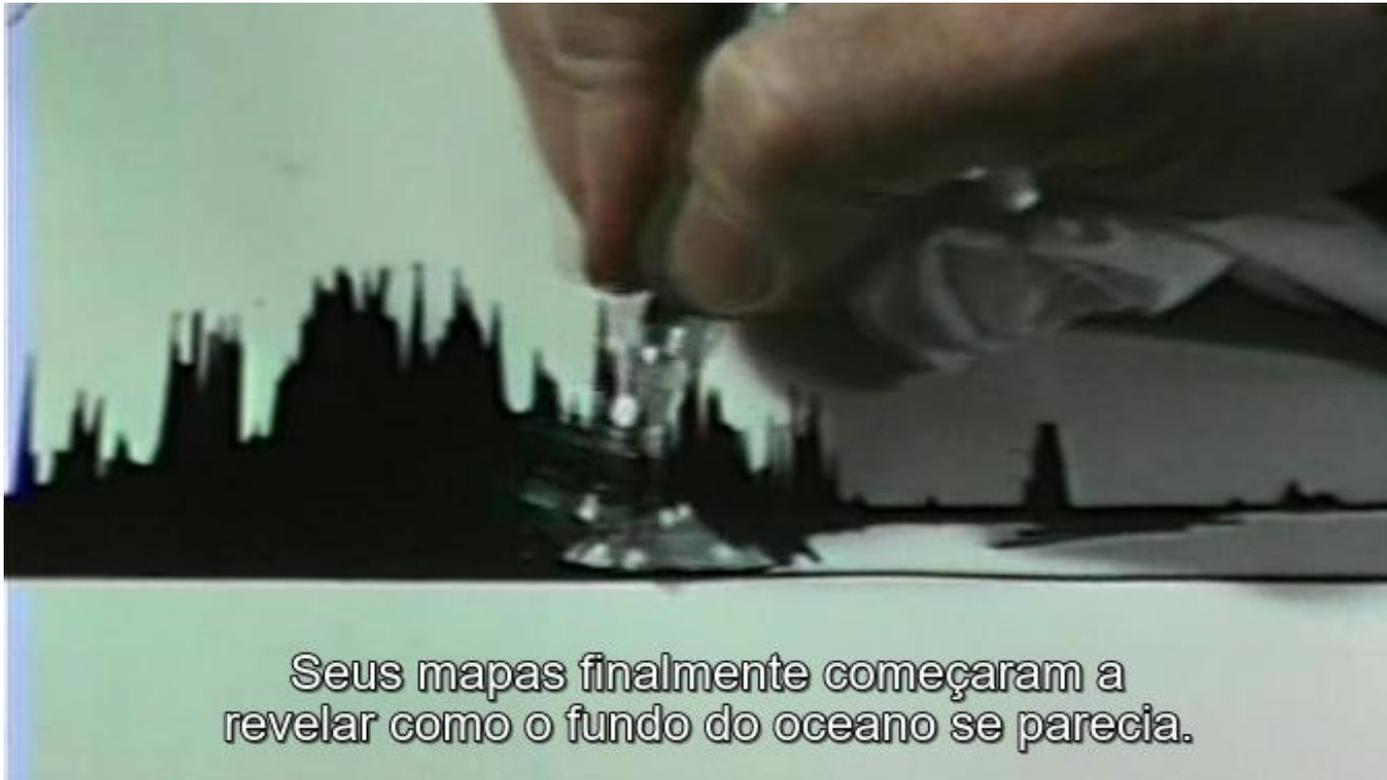
O assoalho oceânico irregular



Duas das primeiras pessoas a fazer isso foram Bruce Heezen e sua colega Marie Tharp.

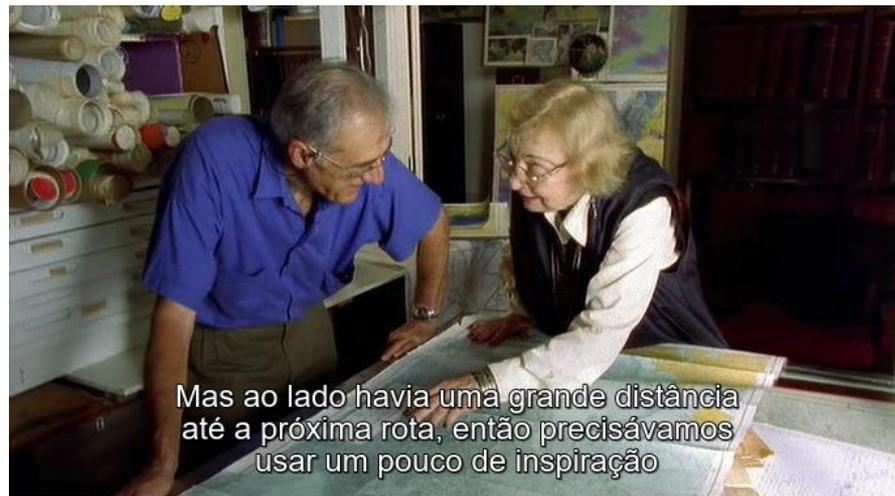
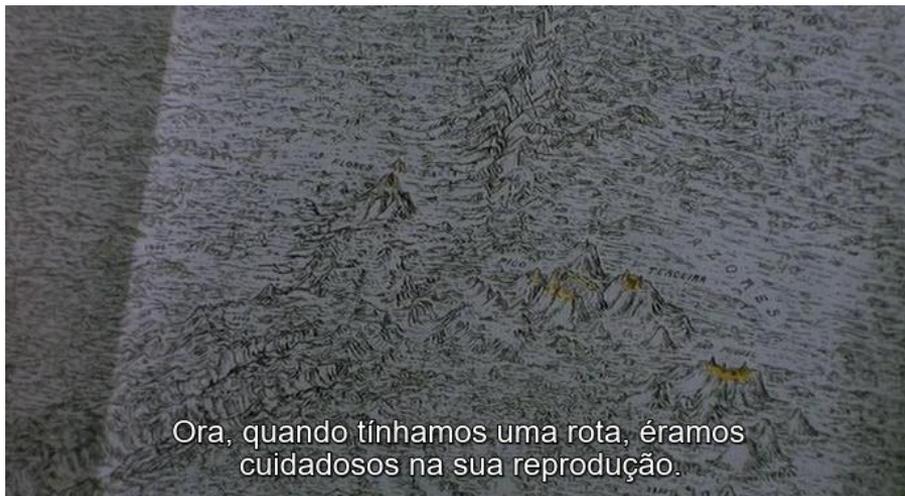
Hester Haring e eu fomos trabalhar em 1952 em mesas de desenho em um laboratório no segundo andar do Lamont Hall, perto do escritório de Bruce com seu cobiçado escritório particular (um antigo banheiro de Lamont). Primeiro, Hester traçaria as profundidades a partir dos dados de sondagem. Em seguida, traçamos perfis com profundidades selecionadas significativas ao longo do curso do navio.

O assoalho oceânico irregular



Os perfis tiveram que ser desenhados de maneira consistente. Qualquer erro e alguém como Bruce ou eu rabiscaríamos uma mensagem como **'Plotado ao contrário!'** no perfil e o redesenharíamos. Bruce e eu compararíamos então as profundidades dos perfis com as sondagens originais.

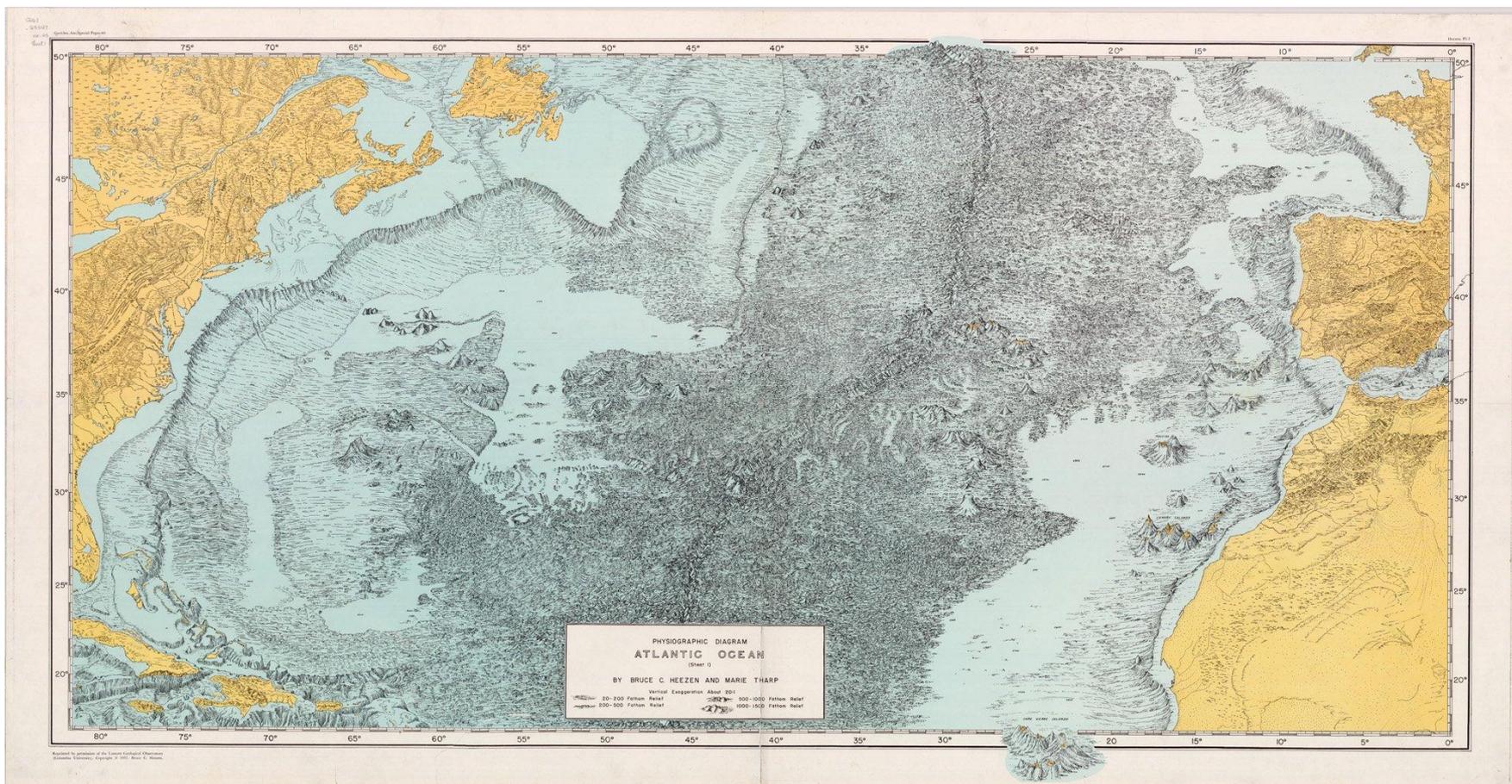
O assoalho oceânico irregular



Entretanto, estendi a Dorsal Médio-Atlântica e o vale do Rift até ao Atlântico Sul, utilizando dados de outra expedição oceanográfica lendária, os 30 cruzeiros transatlânticos do Atlântico Sul do *Meteor* da Alemanha em 1925-27. Os dados obtidos nesses cruzeiros teriam confirmado naquele momento que a cordilheira mesoatlântica se estendia até ao Atlântico Sul e que não era ampla e suave, como Maury e Thomson tinham pensado, mas sim estreita e extremamente acidentada.

O assoalho oceânico irregular

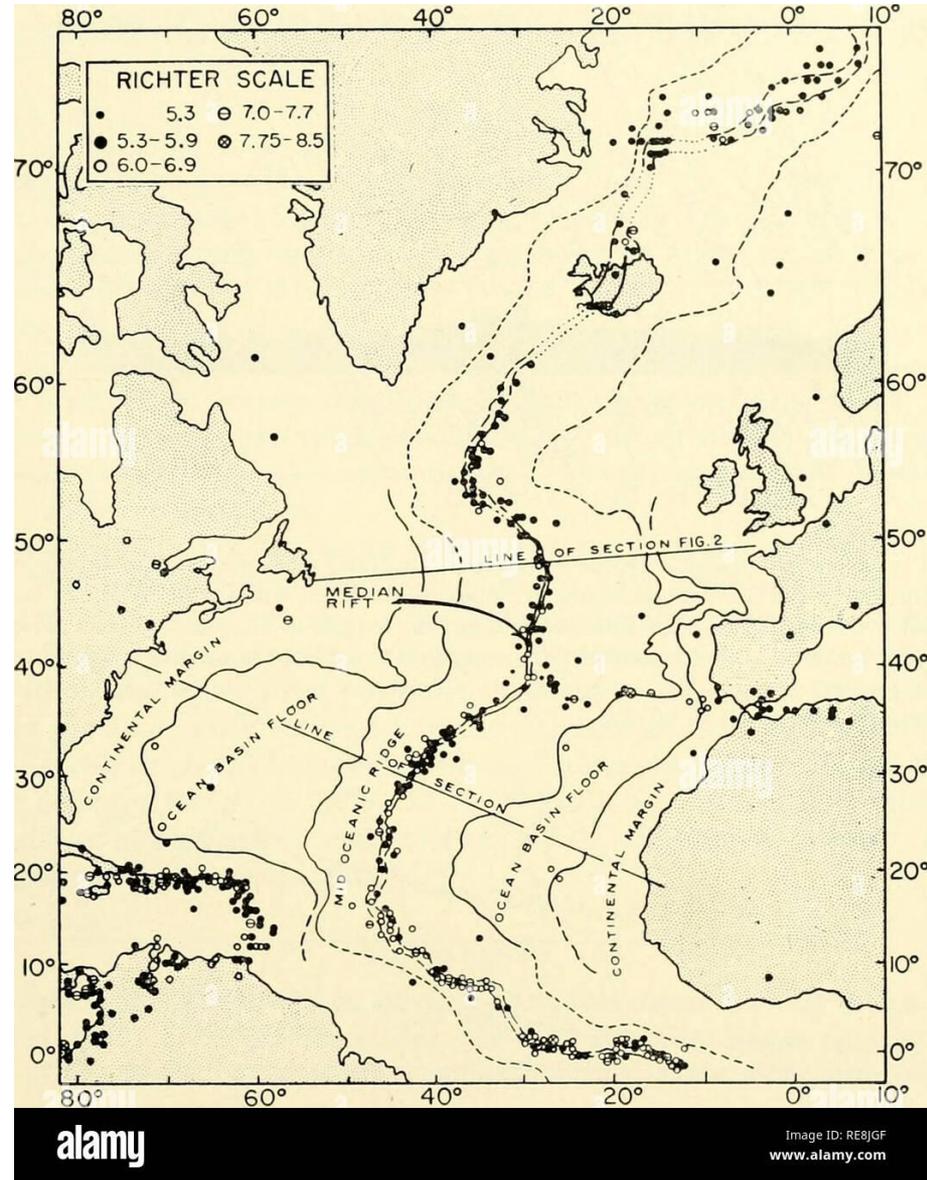
Os dados obtidos nesses cruzeiros teriam confirmado naquele momento que a dorsal mesoatlântica se estendia até ao Atlântico Sul e que não era ampla e suave, como Maury e Thomson tinham pensado, mas sim estreita e extremamente acidentada.



O assoalho oceânico irregular

Os Laboratórios Bell estavam interessados em instalar novos cabos e pediram a Bruce que ajudasse a determinar os melhores locais para eles.

Bruce contratou Howard Foster, um graduado pela Escola de Belas Artes de Boston, para traçar a localização dos epicentros registrados de terremotos nos oceanos. Nesta era pré-computador, Howard teve que traçar manualmente dezenas de milhares de terremotos.



O assoalho oceânico irregular

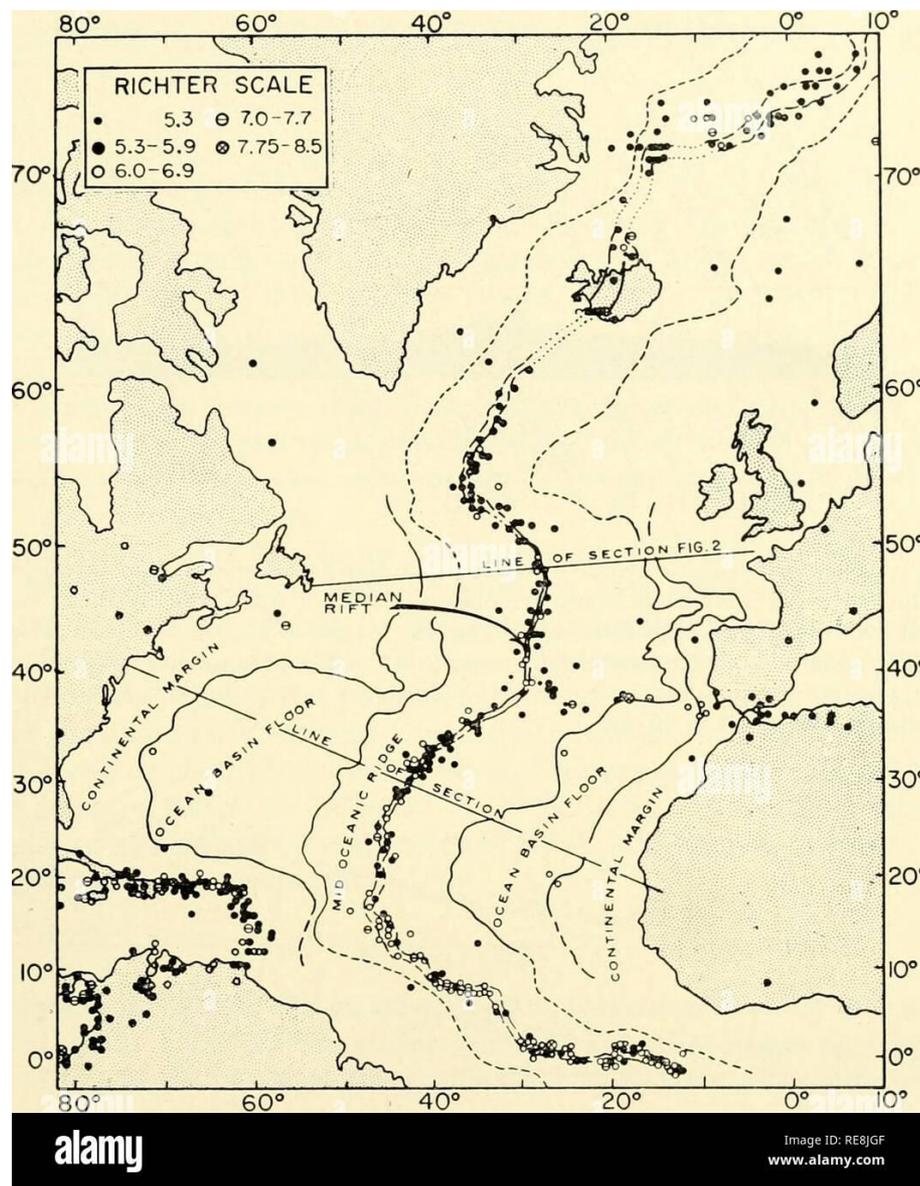
Enquanto eu estava em minha mesa de mapas, traçando a posição da Dorsal Meso-Atlântica e do suposto vale, Howard sentou-se em uma mesa adjacente fazendo o mapa dos locais dos terremotos oceânicos. Ambos os mapas foram criados na mesma escala, como insistiu Bruce.



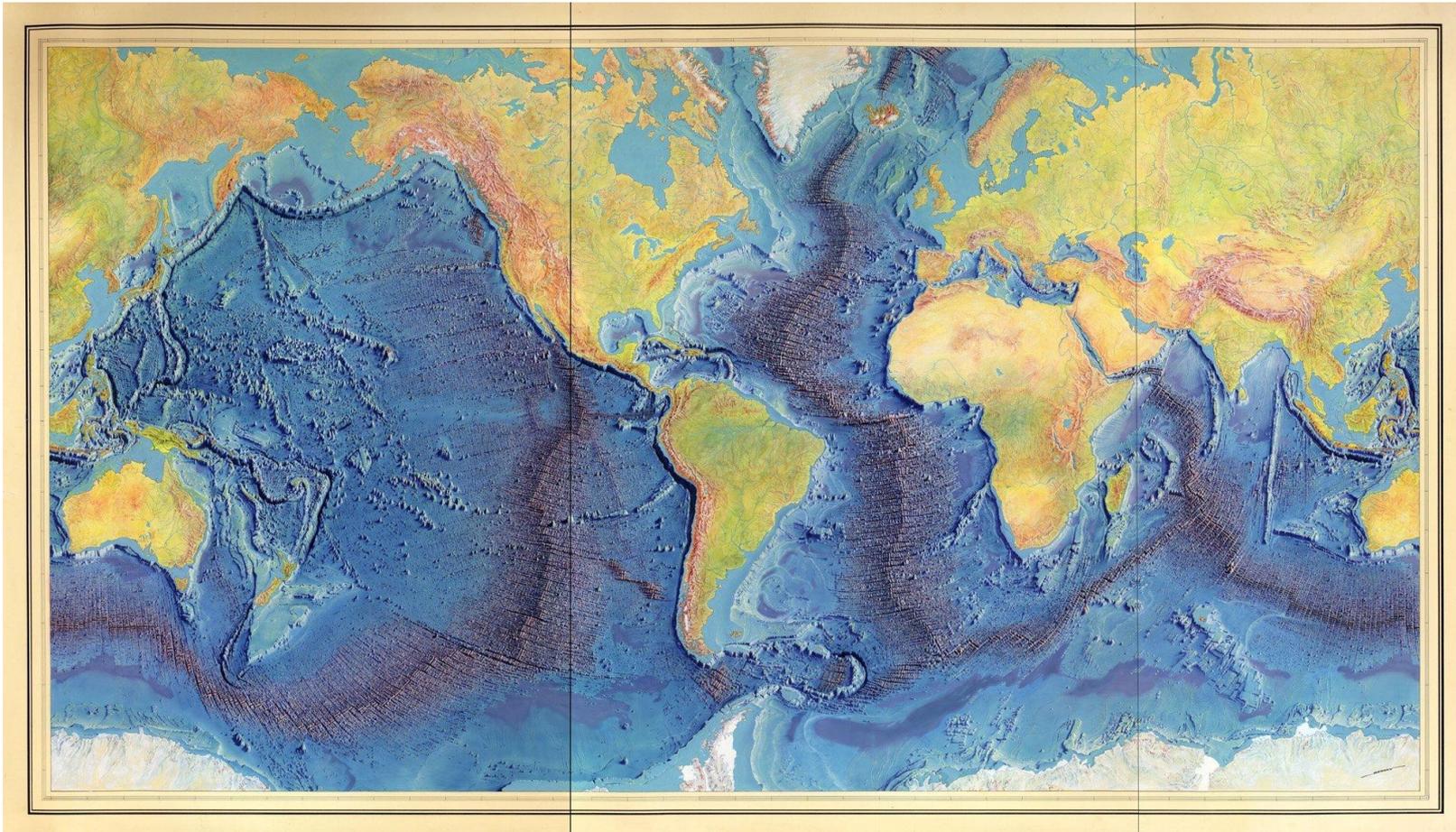
Duas das primeiras pessoas a fazer isso foram Bruce Heezen e sua colega Marie Tharp.

O assoalho oceânico irregular

Os epicentros do terremoto não foram localizados com tanta precisão quanto os nossos dados de sondagem. Às vezes, suas posições só podiam ser localizadas em qualquer lugar dentro de um alcance muito amplo, de várias centenas de quilômetros. Mas quando Bruce viu isso, ele percebeu que uma linha quase contínua de epicentros de terremotos descia pelo centro da Dorsal Meso-Atlântica.



O assoalho oceânico irregular



Reconhecendo a validade da correlação entre os terremotos e o vale do Rift, traçamos a posição do vale usando epicentros de terremotos para locais onde não houve sondagens.

Girl talk

O grande achado de Marie Tharp foi continuamente rejeitado por seu chefe, que usava a expressão “**girl talk**” para caracterizá-lo, e pedia para ela redesenhar o trecho. Ela atendia o pedido, mas a dorsal aparecia novamente, com o vale no seu interior. Após muito tempo e retrabalho, Bruce reconheceu a veracidade do achado de Marie Tharp, e o “girl talk” se transformou em um eureka!

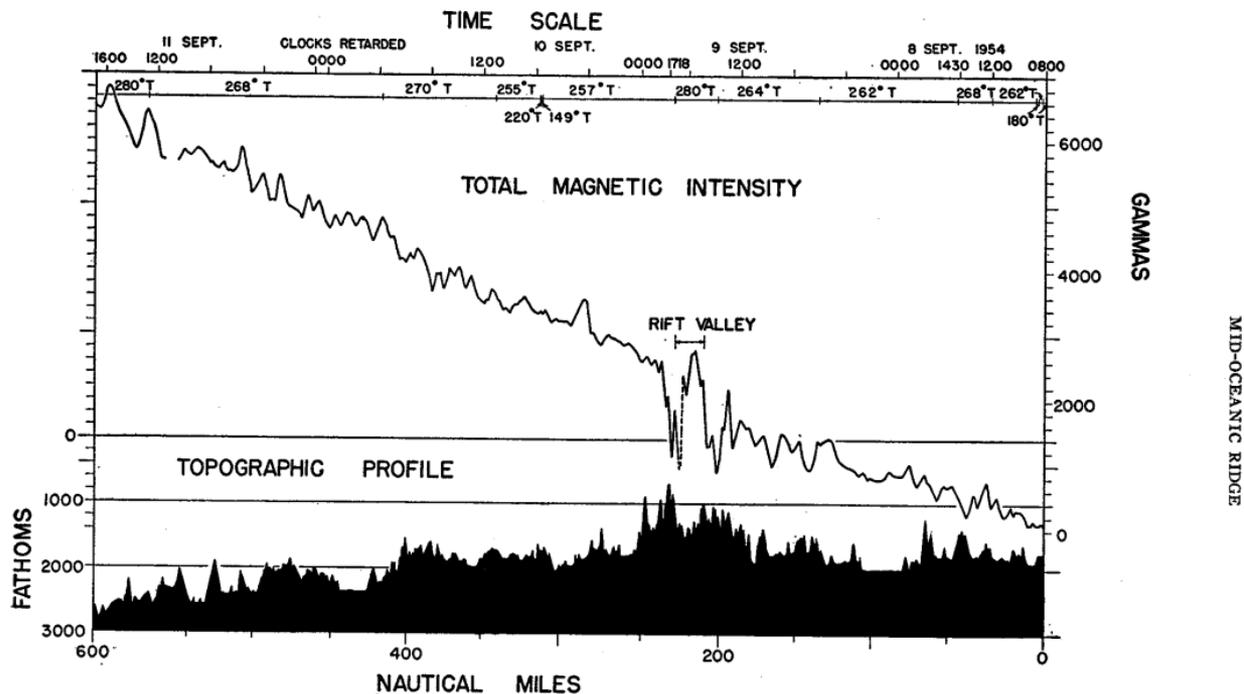
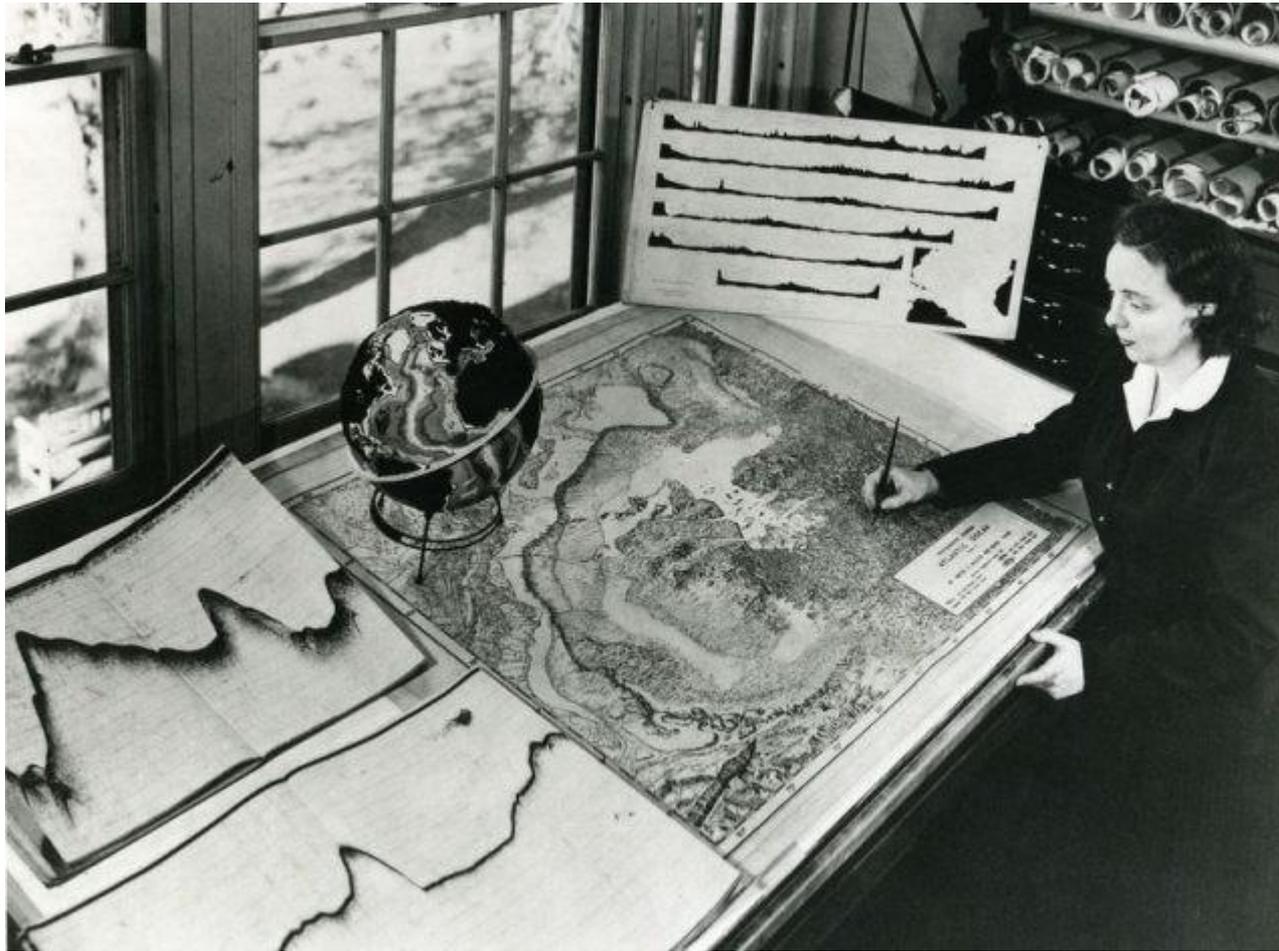


FIGURE 48.—Profile of total magnetic intensity and topography, Mid-Atlantic Ridge
Soundings made with PDR. Magnetic measurements made with fluxgate total-intensity magnetometer. Magnetic values in gammas relative to an arbitrary zero.

Marie Tharp e o fundo oceânico



Marie Tharp e o fundo oceânico



<https://www.google.com/doodles/celebrating-marie-tharp>

A idade do assoalho oceânico

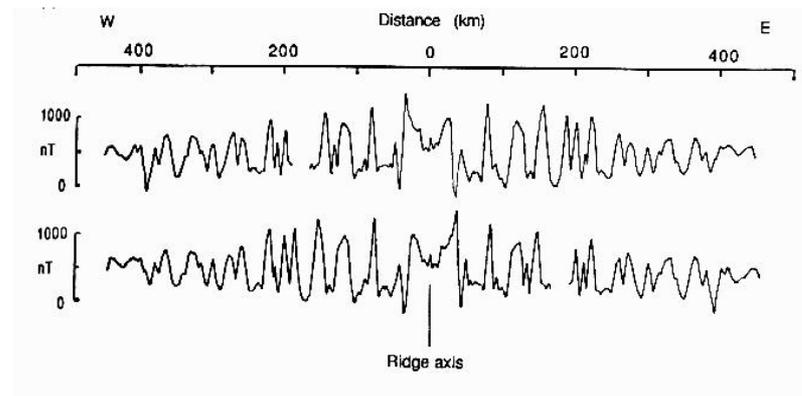
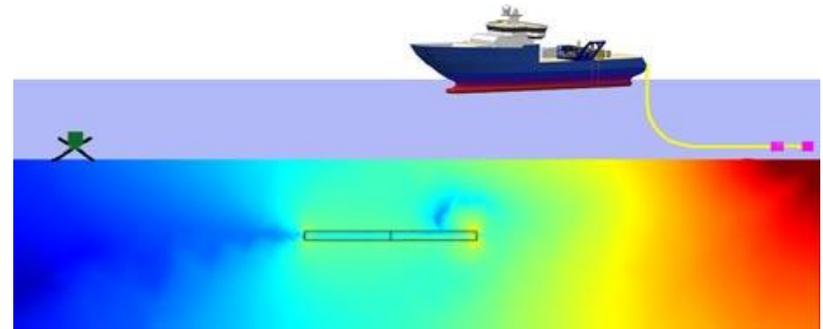
Acreditava-se que o assoalho oceânico tinha em média 4 bilhões de anos, e, portanto, deveria apresentar uma camada sedimentar bastante espessa; em 1957, sismólogos no navio USS Atlantis verificaram que em diversos locais a idade e a espessura dos sedimentos eram muito pequenas.



Reversões do campo magnético

No início da década de 1950, os cientistas utilizaram os magnetômetros (desenvolvidos na Segunda Guerra Mundial para a detecção de submarinos) para investigar a crosta oceânica.

Era esperado que o material da crosta oceânica apresentasse alguma resposta magnética, pois o basalto contém minerais com características magnéticas.



Magnetic Anomalies over the Pacific-Antarctic Ridge

Abstract. Four magnetic profiles across the Pacific-Antarctic Ridge reveal magnetic anomalies that show trends parallel with the ridge axis and symmetry about the ridge axis. The distribution of bodies that could cause these anomalies supports the Vine and Matthews hypothesis for the generation of patterns of magnetic anomalies associated with the midocean ridge system. The geometry of the bodies accords with the known reversals of the geomagnetic field during the last 3.4 million years, indicating a spreading rate of the ocean floor of 4.5 centimeters per year. If one assumes that the spreading rate within 500 kilometers of the ridge axis has been constant, reversals of the geomagnetic field during the last 10.0 million years can be determined. This new, detailed history of field reversals accords with observed anomalies over Reykjanes Ridge in the North Atlantic if a spreading rate of 1 centimeter per year is assumed there.

W. C. PITMAN III

J. R. HEIRTZLER

*Lamont Geological Observatory,
Columbia University,
Palisades, New York*

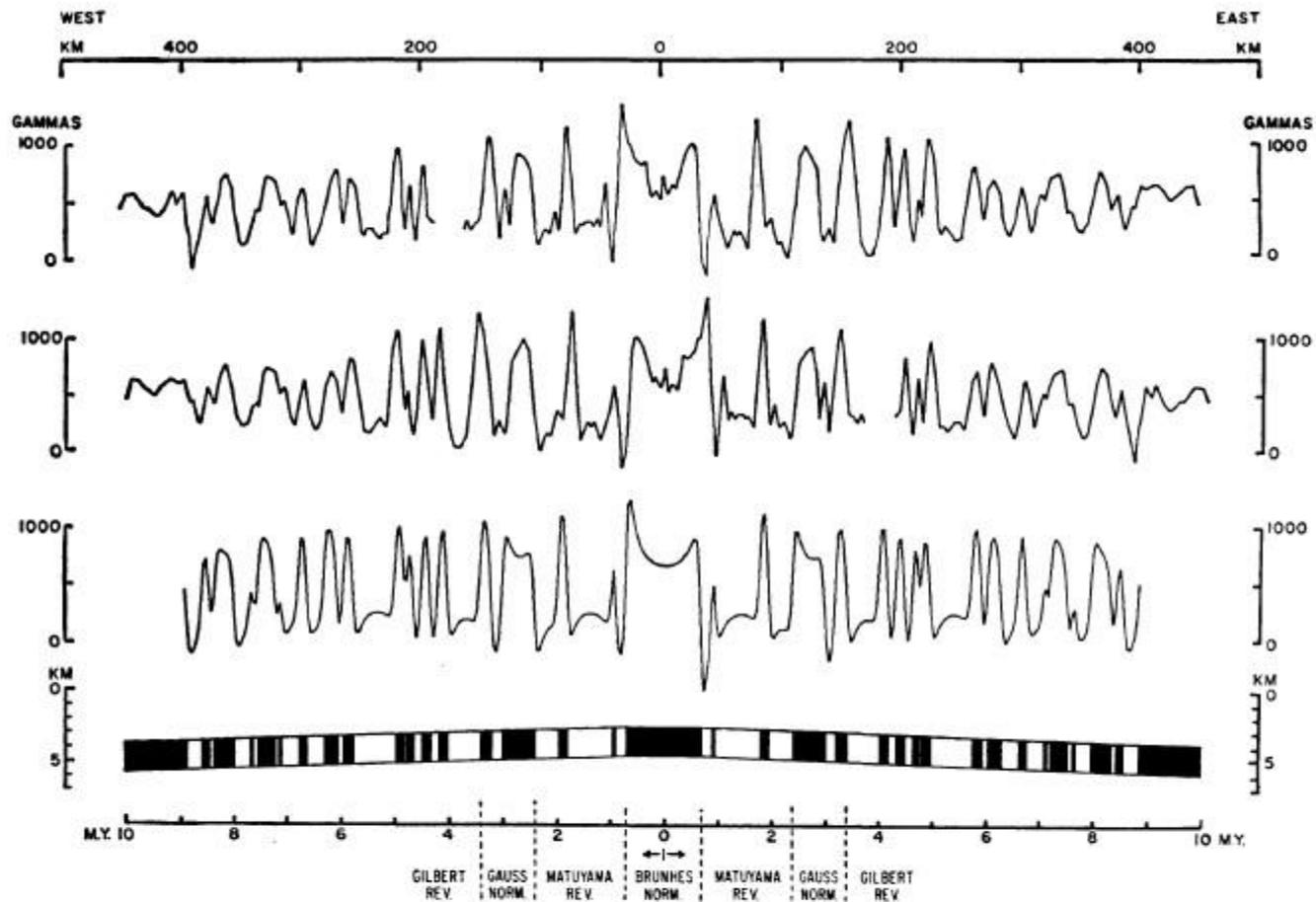


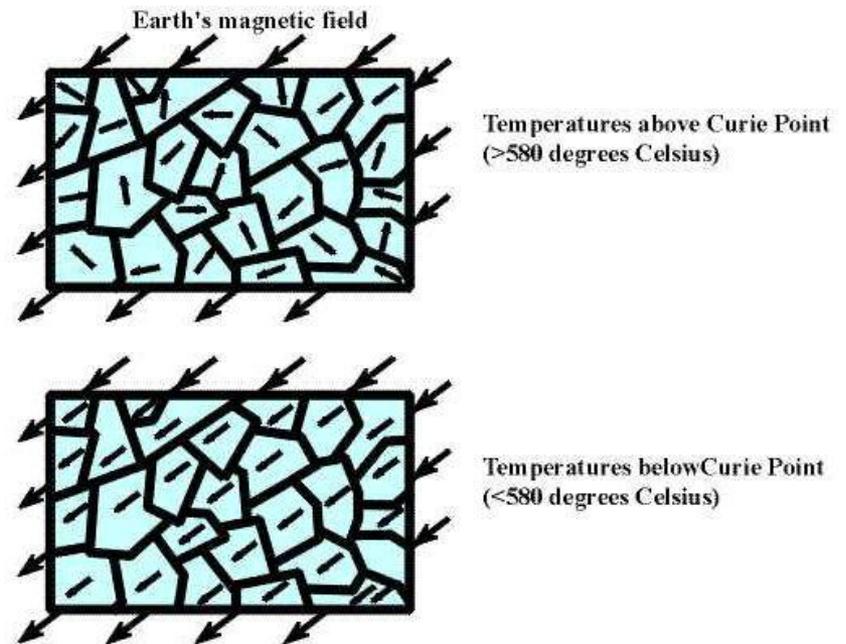
Fig. 3. The middle curve is the *Eltanin-19* magnetic-anomaly profile; east is to the right. The upper anomaly profile is that of *Eltanin-19* reversed; west is to the right. On the bottom is the model for the Pacific-Antarctic Ridge. The time scale (millions of years ago) is related to the distance scale by the spreading rate of 4.5 cm/yr. The previously known magnetic epochs since the Gilbert epoch are noted. The shaded areas are normally magnetized material; unshaded areas, reversely magnetized material. Above the model is the computed anomaly profile.

Reversões do campo magnético

Os cientistas sabem que as rochas podiam guardar a informação magnética proveniente do campo terrestre presente no momento de sua geração.

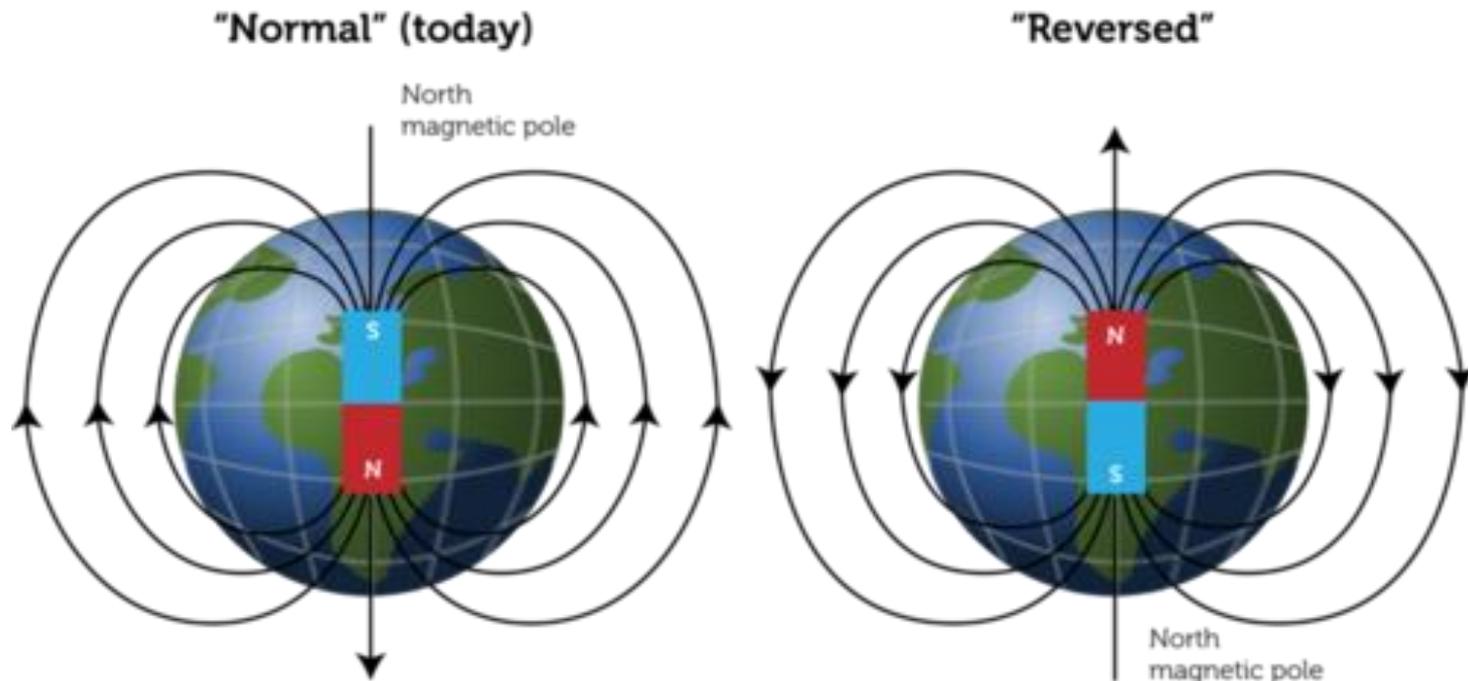
Desta forma, as rochas podem ser usadas para investigar o comportamento do campo magnético no passado.

Development of Magnetic alignment in minerals during cooling from a magma



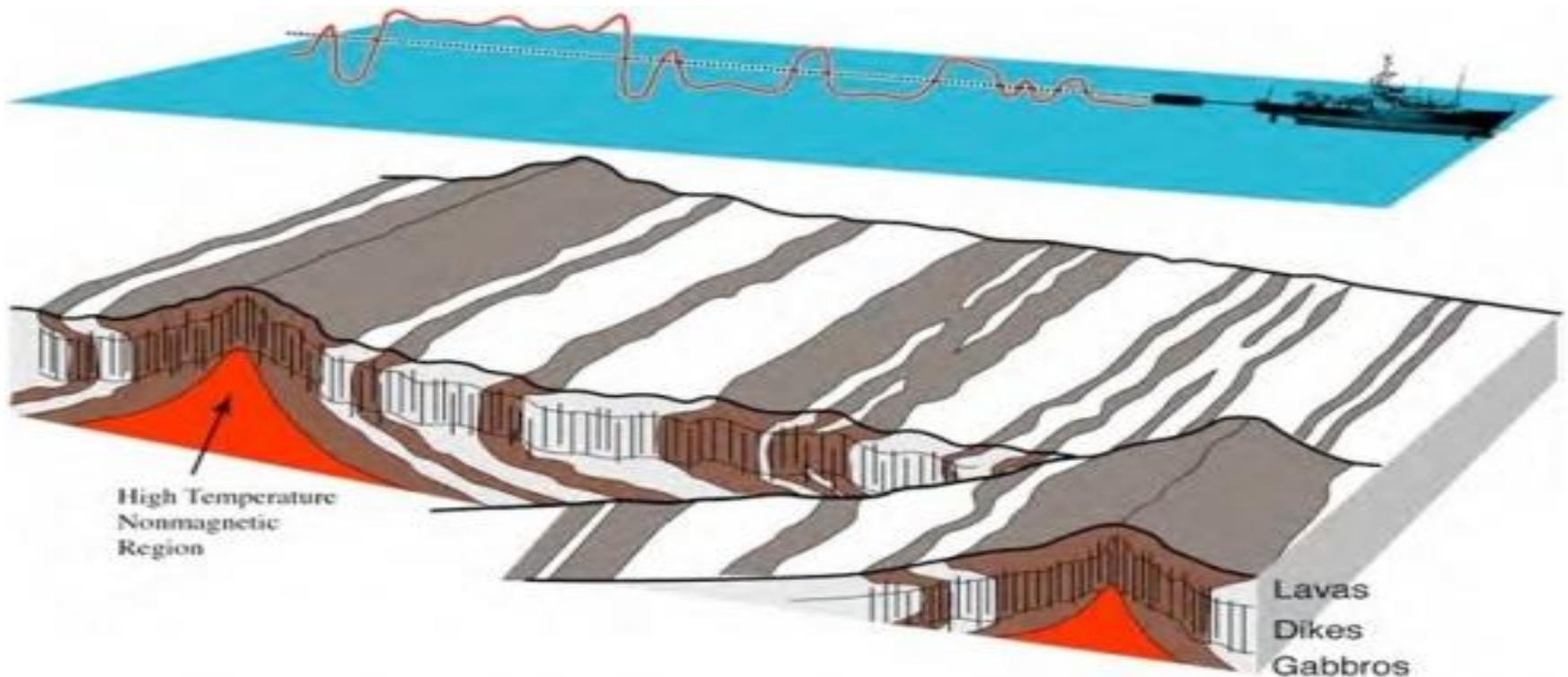
Reversões do campo magnético

Em meados do século XX, os paleomagnetistas verificaram que as rochas terrestres continentais podiam ser classificadas em dois grupos: as que apresentavam polaridade magnética compatível com a do campo presente, e as que apresentavam polarização reversa. Após muitas hipóteses e controvérsias isso foi atribuído às reversões do campo magnético terrestre.



Reversões do campo magnético

As rochas do fundo oceânico apresentavam o mesmo tipo de assinatura magnética normal e reversa das rochas continentais.



Reversões do campo magnético

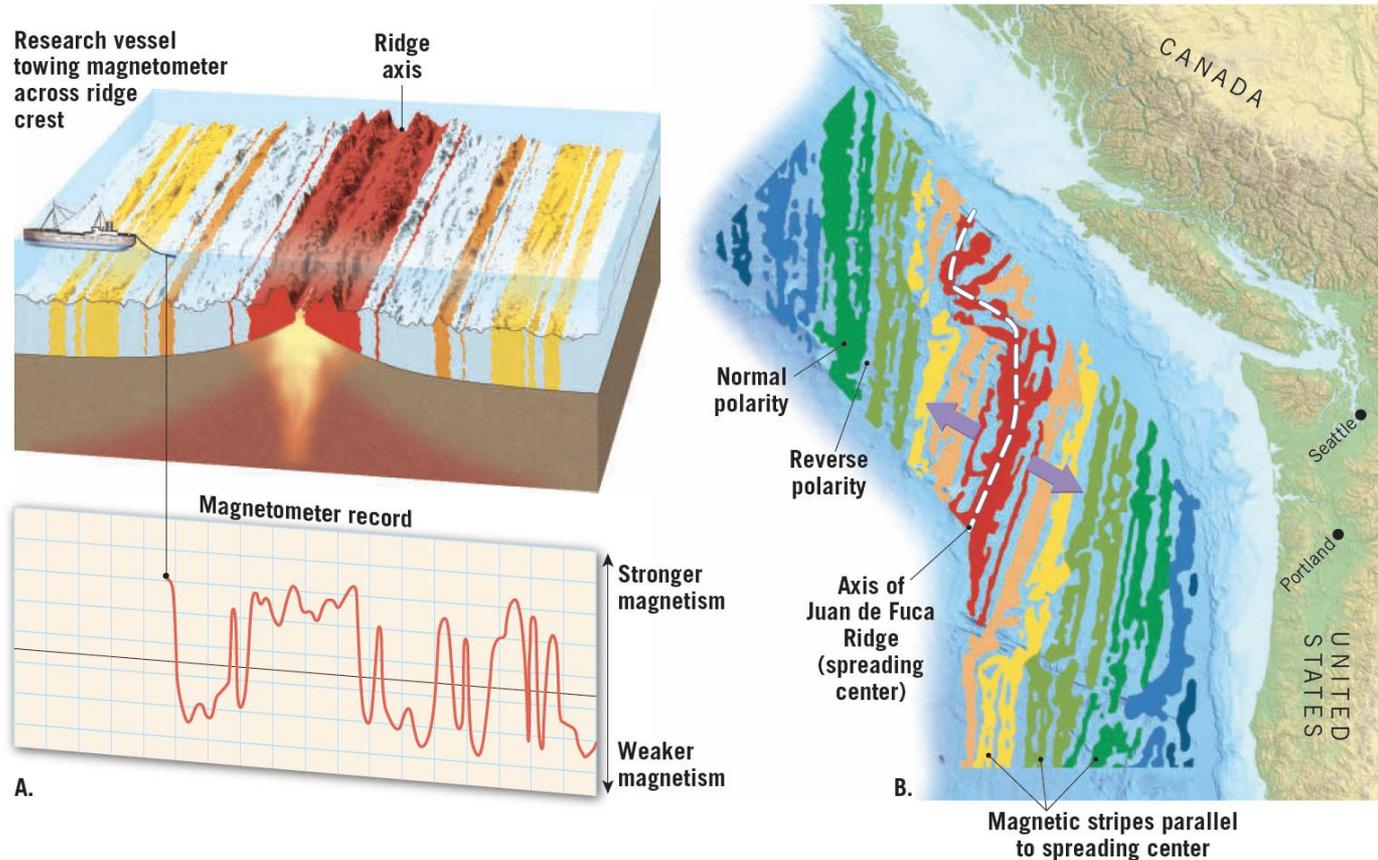
As rochas do fundo oceânico apresentavam o mesmo tipo de assinatura magnética normal e reversa das rochas continentais.

► **Figure 3.30**

Ocean floor as a magnetic recorder

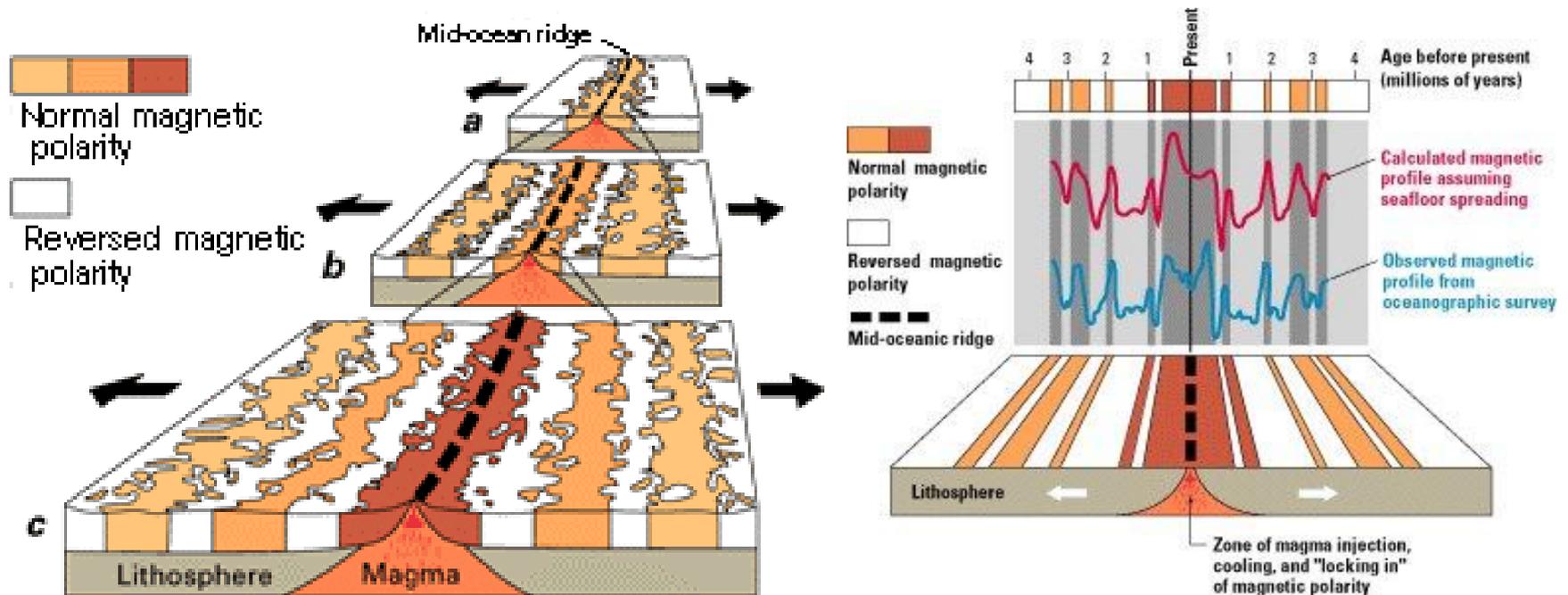
A. A magnetometer towed across a segment of the oceanic floor records magnetic intensities.

B. Notice the symmetrical stripes of low- and high-intensity magnetism that parallel the axis of the Juan de Fuca Ridge. The colored stripes of high-intensity magnetism occur where normally magnetized oceanic rocks enhance the existing magnetic field. Conversely, the white low-intensity stripes are regions where the crust is polarized in the reverse direction, which weakens the existing magnetic field.



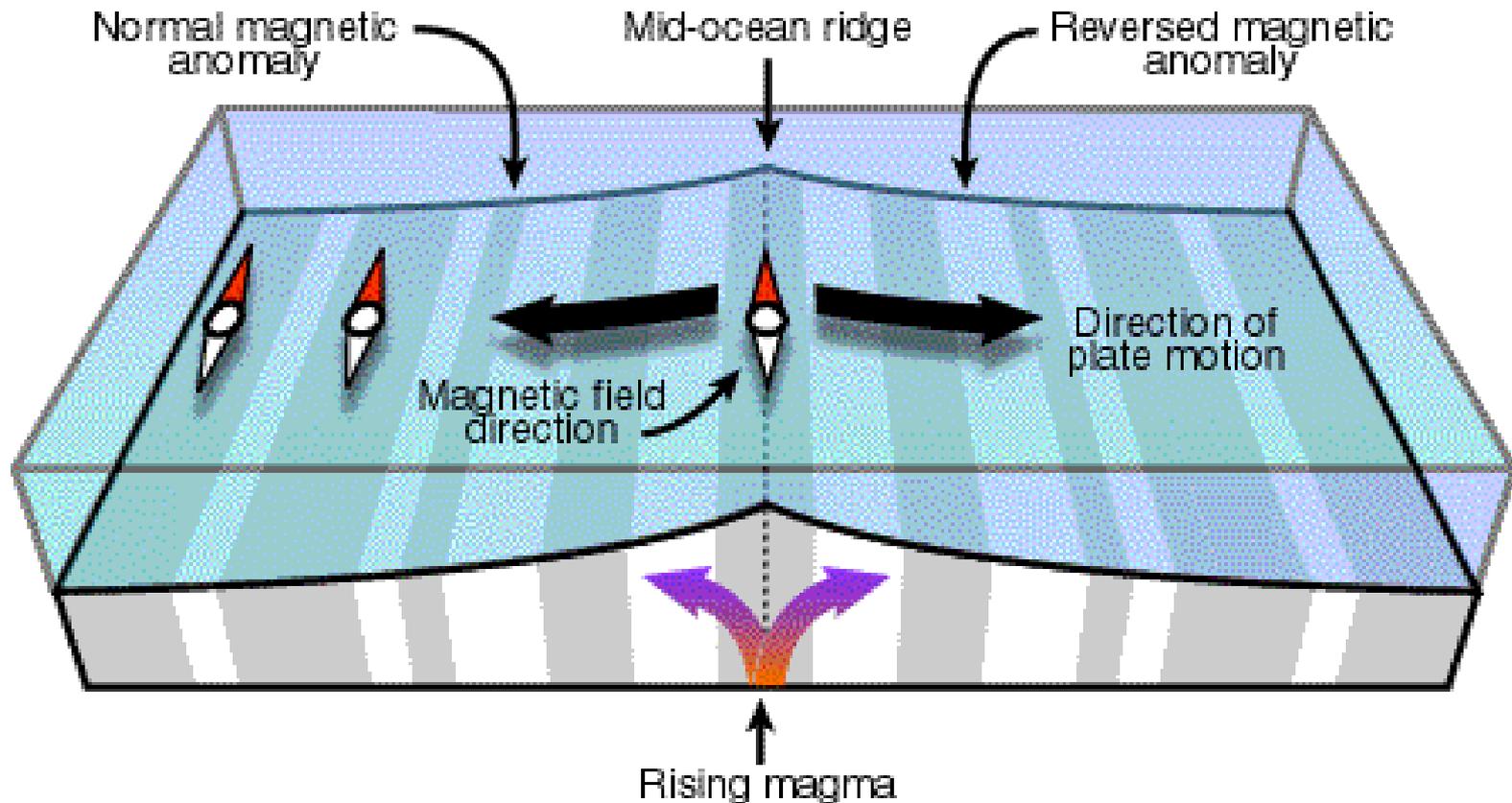
Reversões do campo magnético

Esta resposta magnética das rochas oceânicas mostrava uma variação na intensidade magnética com uma curiosa simetria em torno de um eixo.



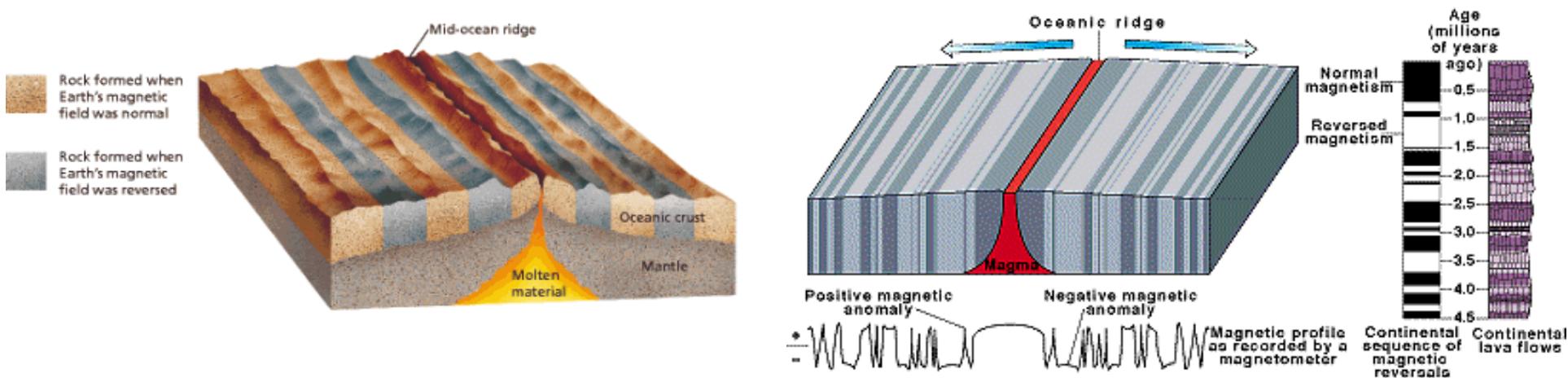
Reversões do campo magnético

A magnetização destas rochas implicava em um processo que gerasse um padrão simétrico em relação a um centro de espalhamento.



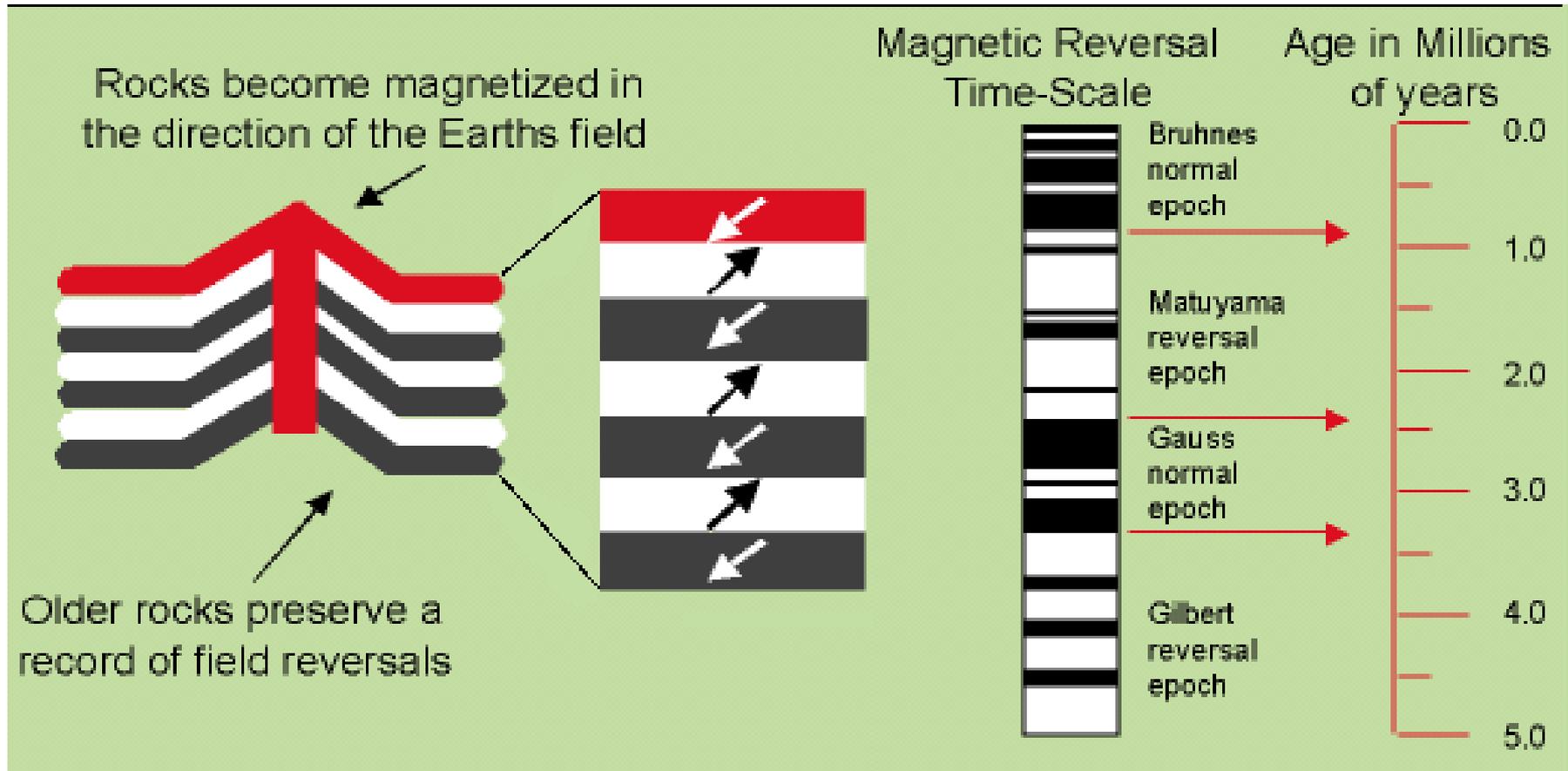
Reversões do campo magnético

Este padrão poderia ser explicado se as rochas tivessem sido formadas em um centro de espalhamento, onde o material magnético registraria a direção e intensidade do campo magnético da época da formação.



Reversões do campo magnético

As rochas conteriam, então, um registro do “magnetismo fóssil” da Terra.



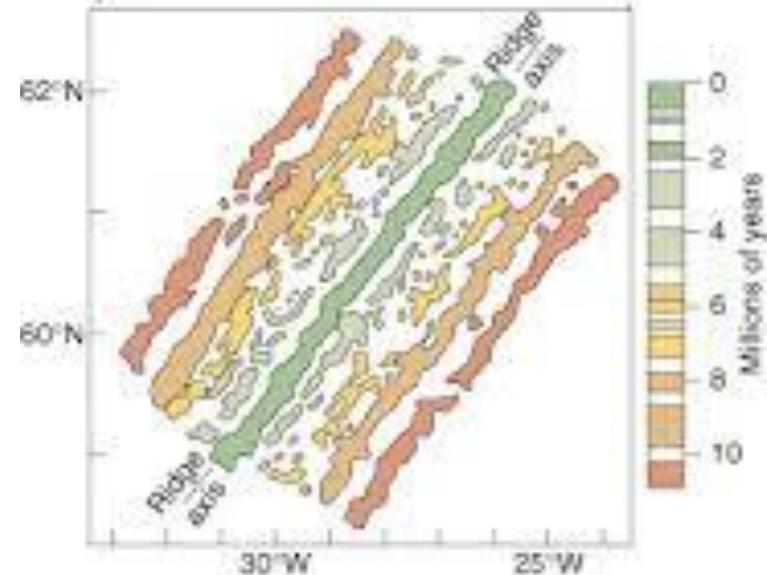
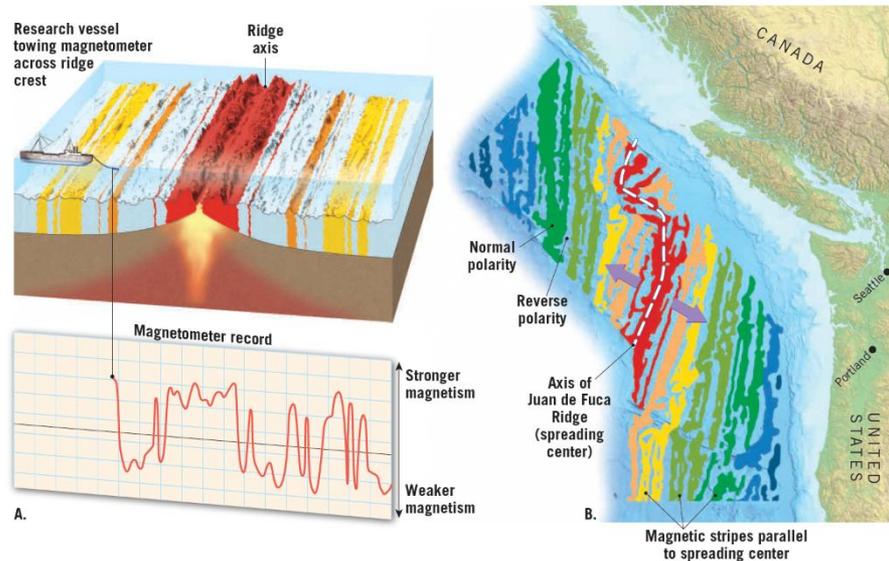
O "padrão zebrado" do assoalho oceânico

A evidência do padrão simétrico de anomalias magnéticas trazia uma questão importante: "qual o processo de formação da crosta oceânica que explica este padrão?"

► Figure 3.30

Ocean floor as a magnetic recorder
A. A magnetometer towed across a segment of the oceanic floor records magnetic intensities.

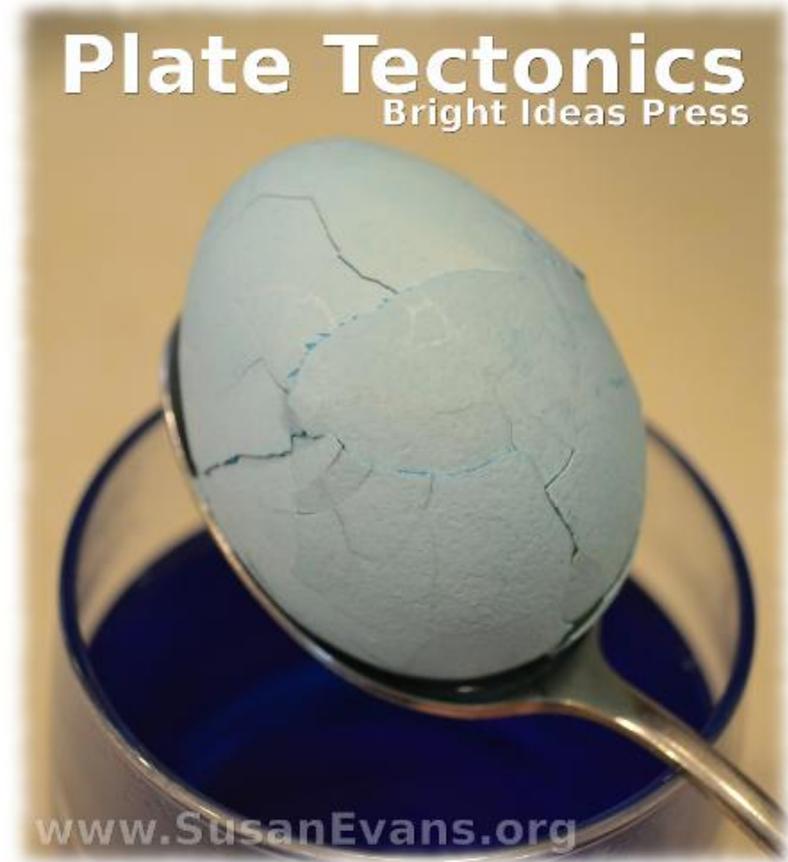
B. Notice the symmetrical stripes of low- and high-intensity magnetism that parallel the axis of the Juan de Fuca Ridge. The colored stripes of high-intensity magnetism occur where normally magnetized oceanic rocks enhance the existing magnetic field. Conversely, the white low-intensity stripes are regions where the crust is polarized in the reverse direction, which weakens the existing magnetic field.



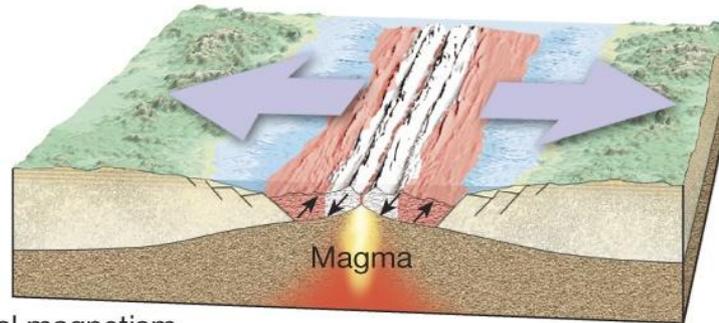
O afastamento do assoalho oceânico

As teorias da época (1961) diziam que as dorsais meso-oceânicas eram zonas de fraqueza da crosta, onde o material do manto subjacente se incorporava às placas, afastando-as.

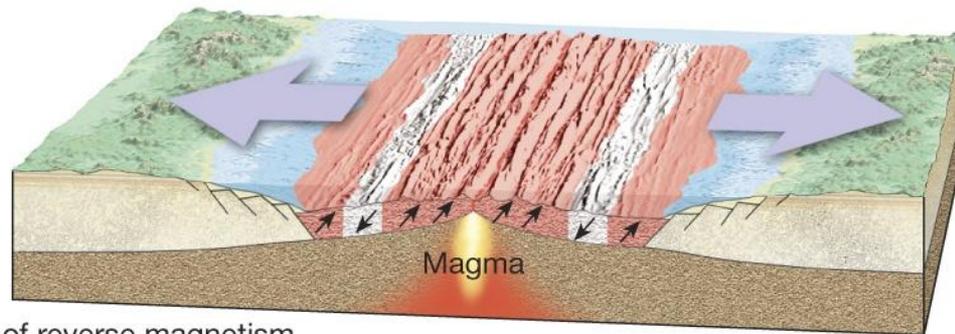
Este processo, denominado espalhamento do assoalho oceânico, duraria milhões de anos, formando as cadeias oceânicas observadas. Se esta teoria estivesse correta, as rochas, ao se formarem, guardariam a magnetização da época da Terra, gerando o padrão observado.



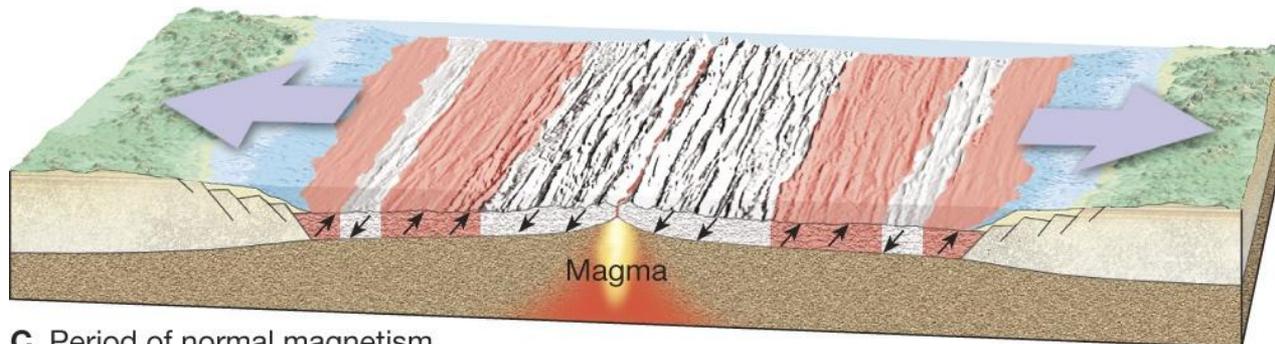
O afastamento do assoalho oceânico e o padrão zebrado



A. Period of normal magnetism

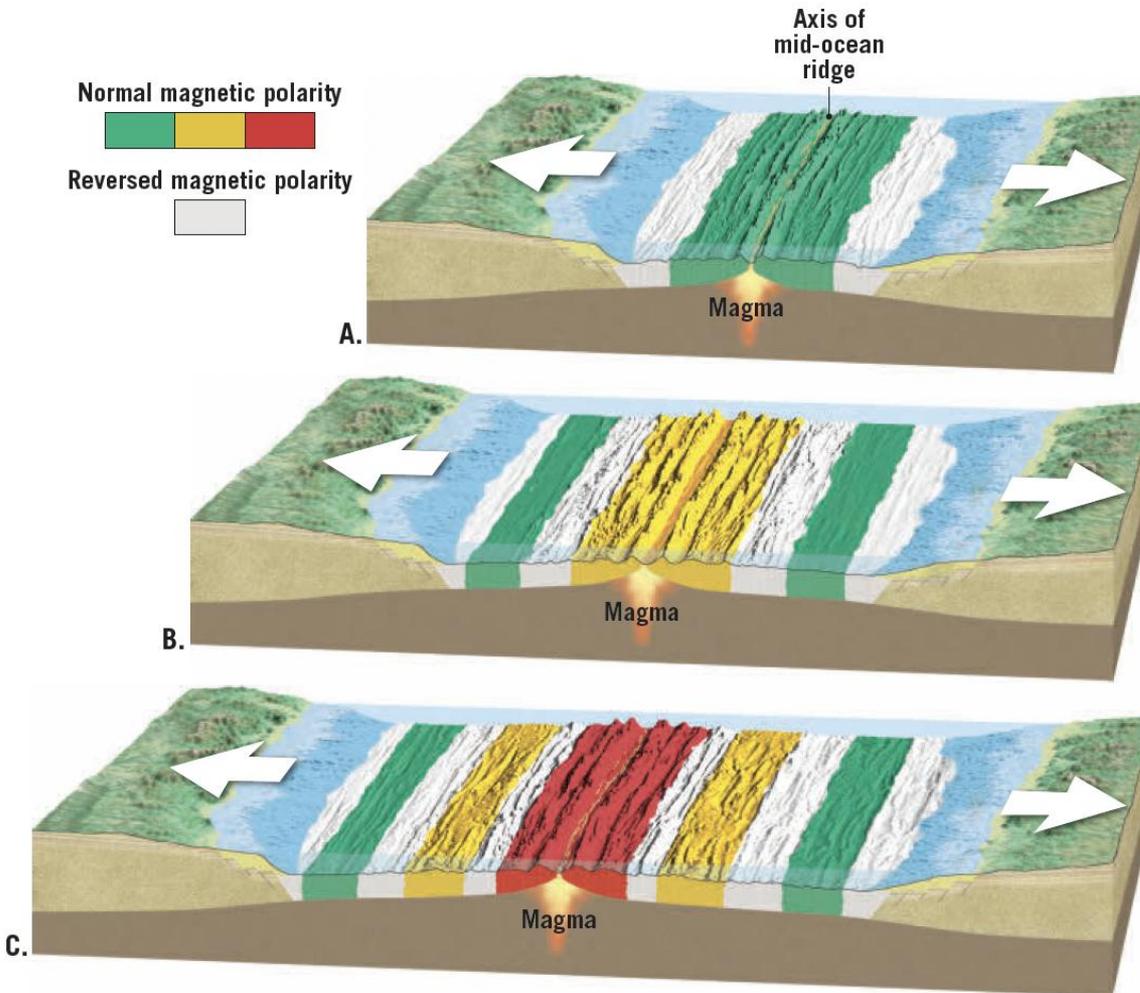


B. Period of reverse magnetism



C. Period of normal magnetism

O afastamento do assoalho oceânico e o padrão zebraado



◀ SmartFigure 3.31

Magnetic reversals and seafloor spreading

When new basaltic rocks form at mid-ocean ridges, they magnetize according to Earth's existing magnetic field. Hence, oceanic crust provides a permanent record of each reversal of our planet's magnetic field over the past 200 million years.

▶ Animation

https://media.pearsoncmg.com/ph/esm/esm_lutgens_foundations_9/media/

O "padrão zebrado" do assoalho oceânico

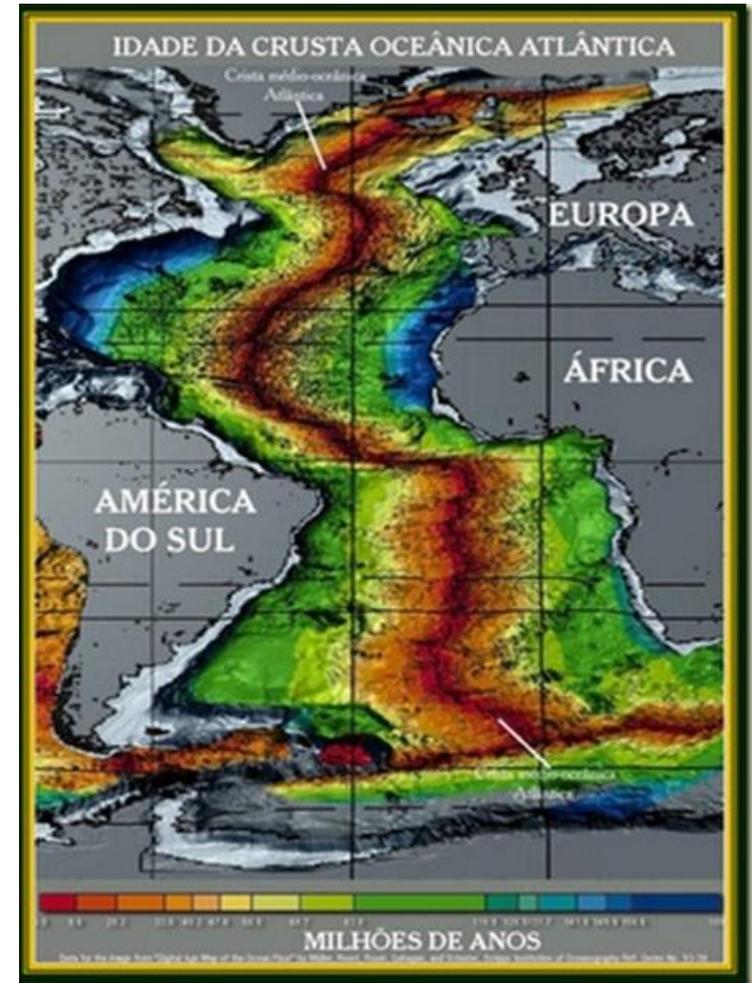
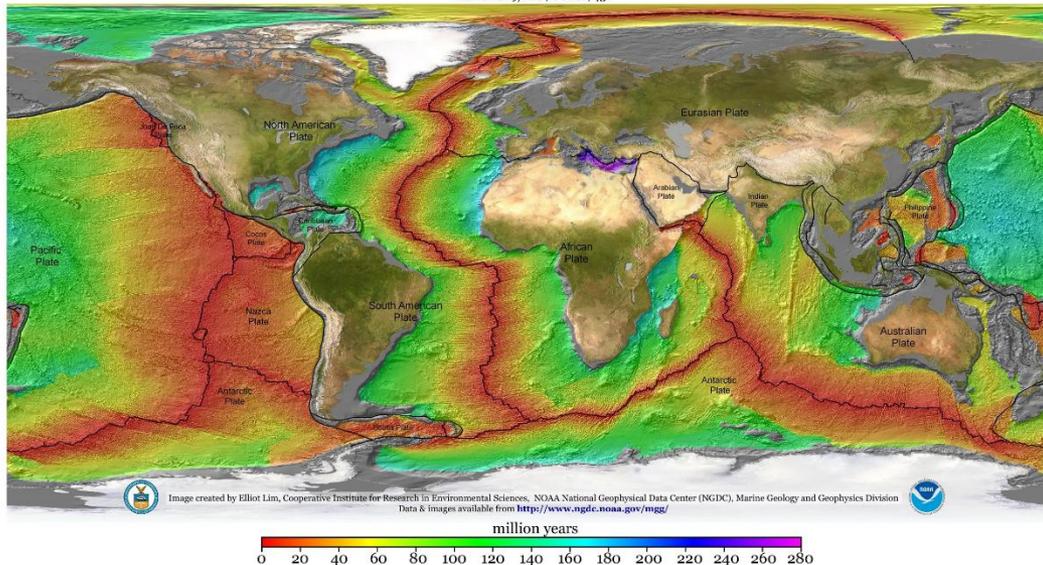
Fatos que comprovam a teoria do espalhamento do assoalho oceânico:

1) As rochas nas proximidades da dorsal são muito jovens, aumentando sua idade com o afastamento da dorsal;

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

Data source:

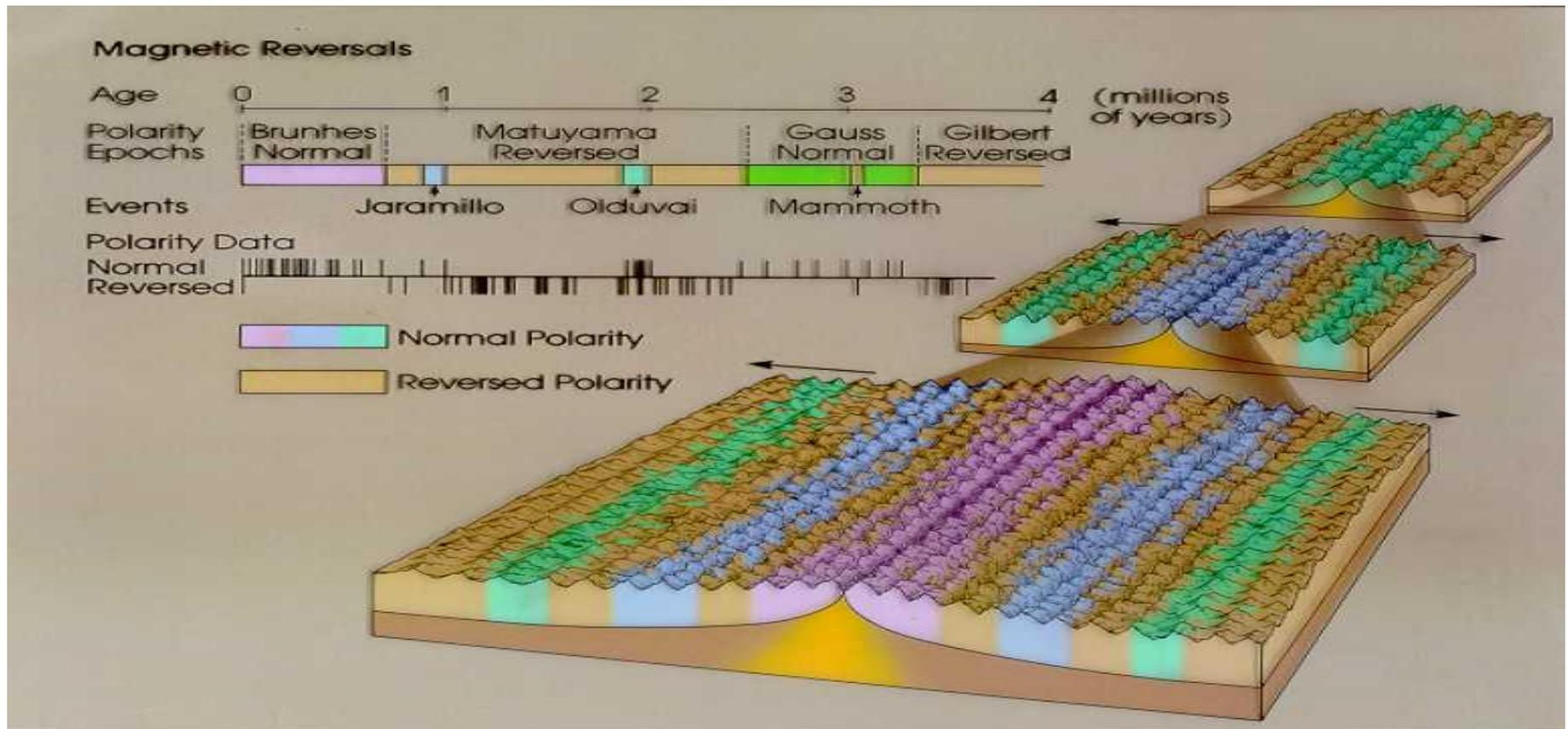
Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.



O "padrão zebrado" do assoalho oceânico

Fatos que comprovam a teoria do espalhamento do assoalho oceânico:

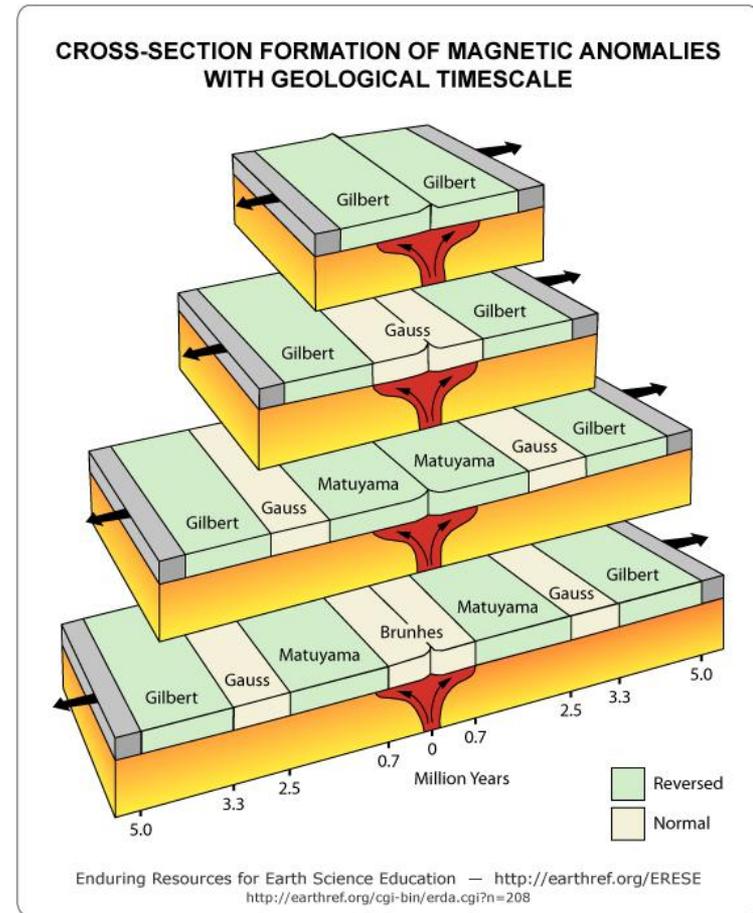
2) As rochas mais jovens, próximas da dorsal, sempre apresentavam polaridade positiva (idêntica ao do campo geomagnético atual);



O “padrão zebrado” do assoalho oceânico

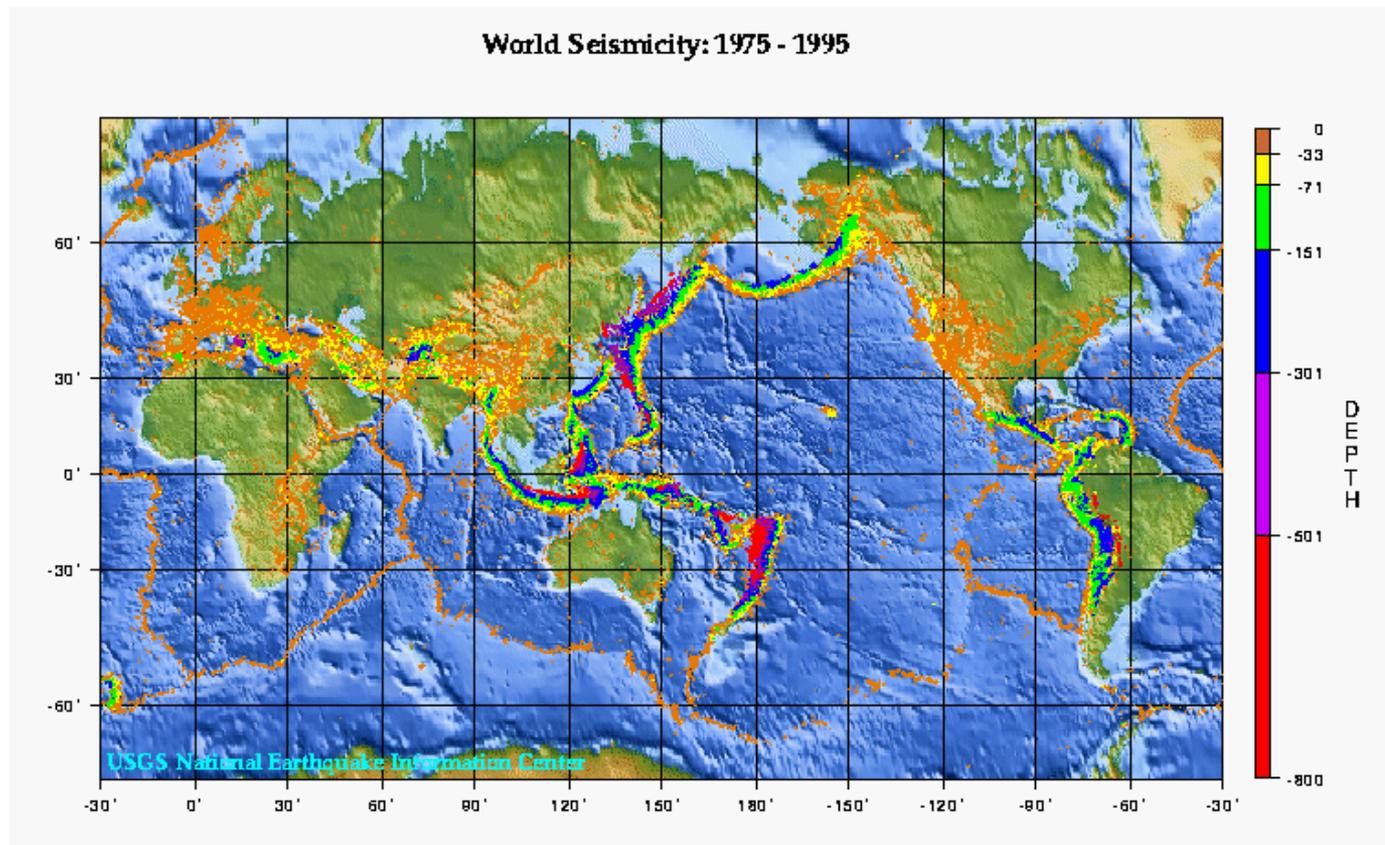
Fatos que comprovam a teoria do espalhamento do assoalho oceânico:

3) Há um padrão de magnetização que apresenta simetria em relação à dorsal (rochas à mesma distância da dorsal apresentavam polaridade idêntica). Isto mostra a simetria do espalhamento, e a frequência de inversão da magnetização.



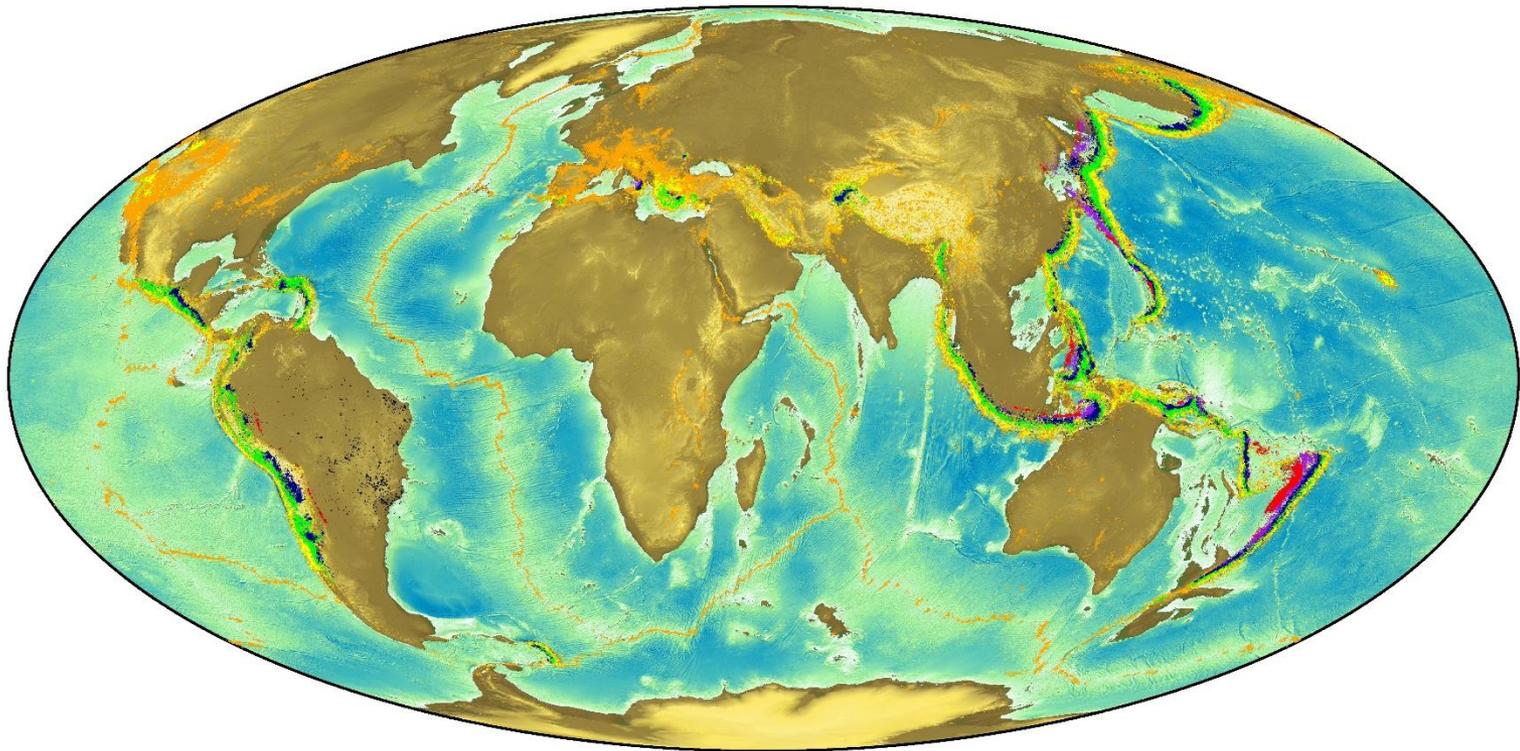
A distribuição dos terremotos

Com o desenvolvimento dos sismógrafos no início do século XX, os cientistas perceberam que os terremotos concentravam-se preferencialmente ao longo das trincheiras oceânicas e dorsais meso-oceânicas.



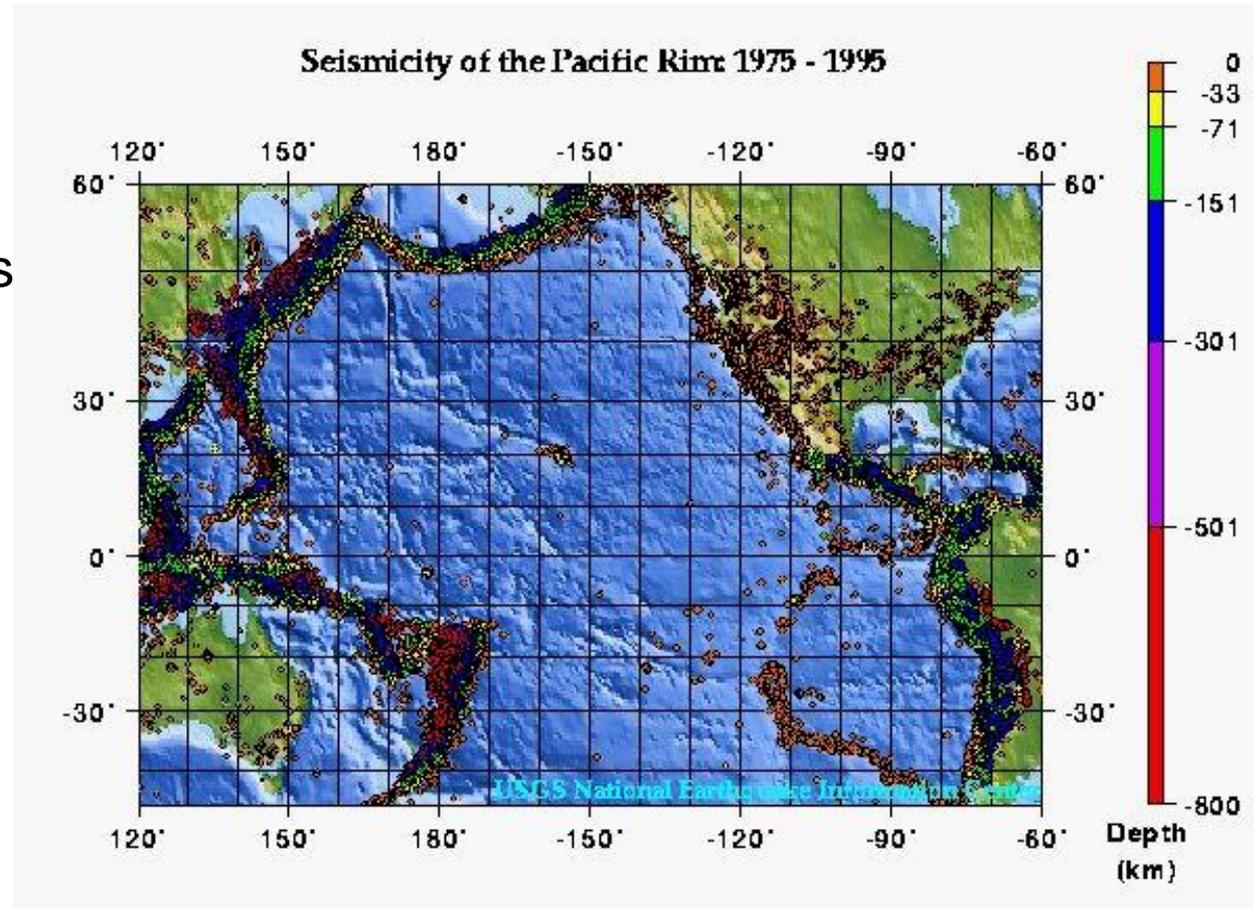
A distribuição dos terremotos

Com o desenvolvimento dos sismógrafos no início do século XX, os cientistas perceberam que os terremotos concentravam-se preferencialmente ao longo das trincheiras oceânicas e dorsais meso-oceânicas.

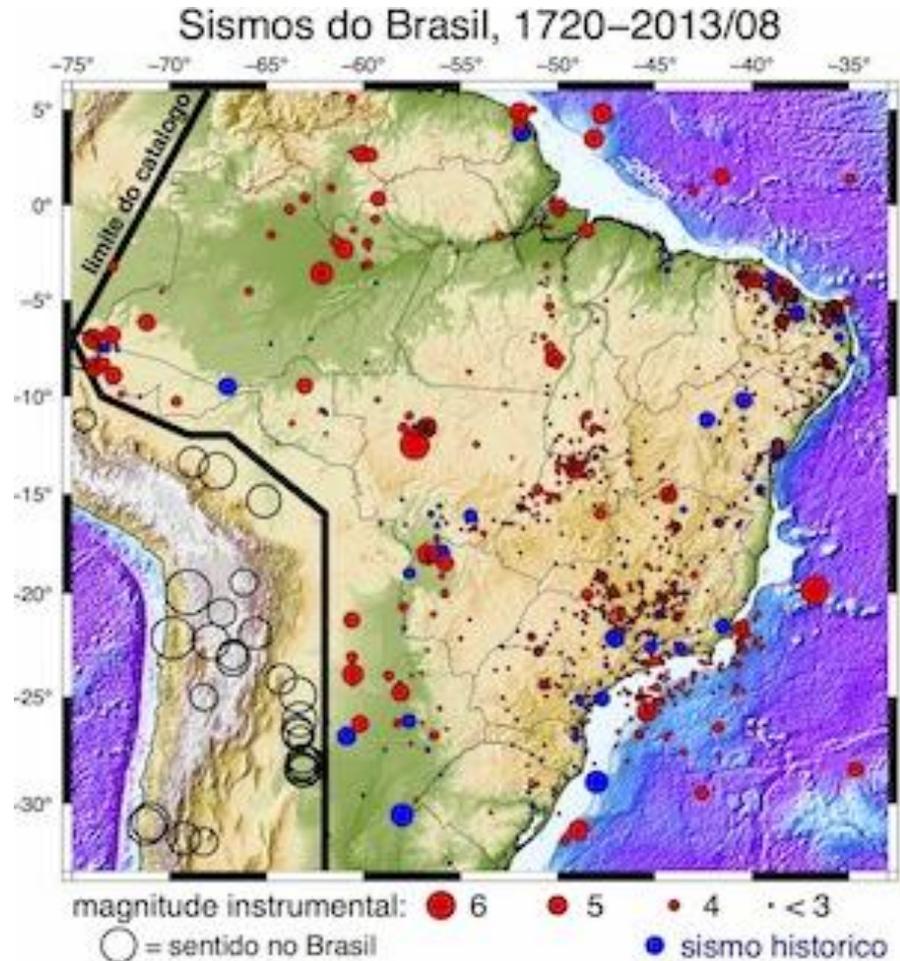
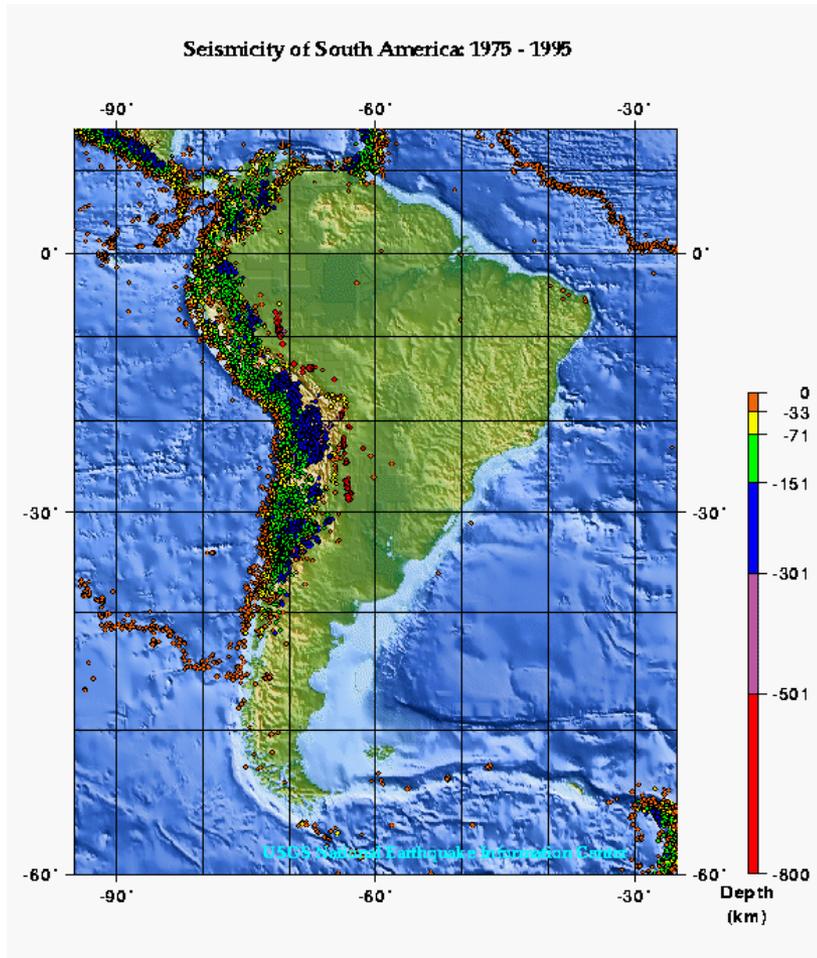


A distribuição dos terremotos

A implantação da rede mundial de sismógrafos (para detectar explosões nucleares clandestinas) trouxe grande avanço no conhecimento da distribuição dos abalos sísmicos.

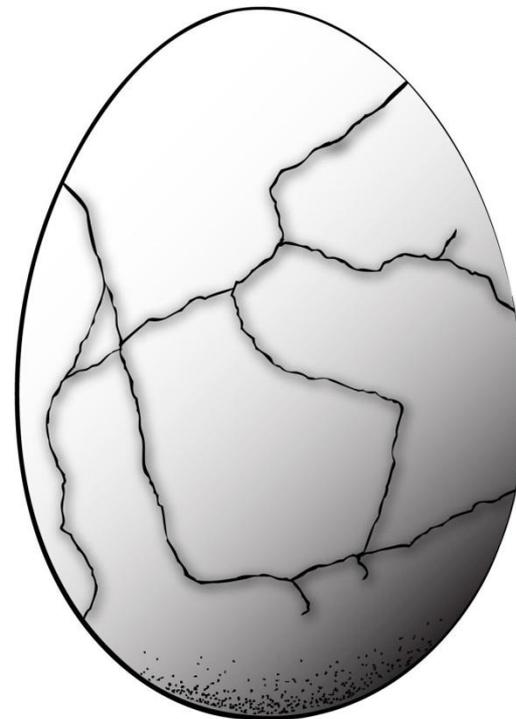
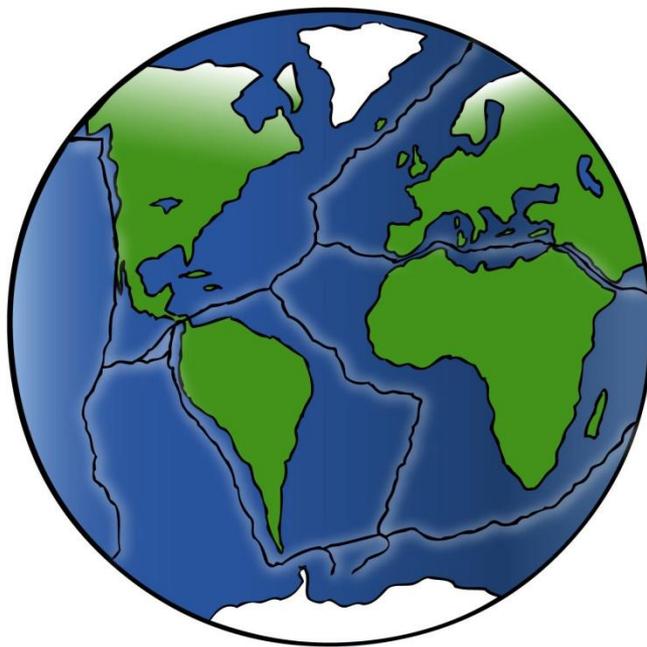


A distribuição dos terremotos



A distribuição dos terremotos

A camada superficial do planeta parecia então, apresentar grandes zonas de fraqueza, onde havia a concentração de sismos e a criação de nova crosta pela saída do material subjacente.



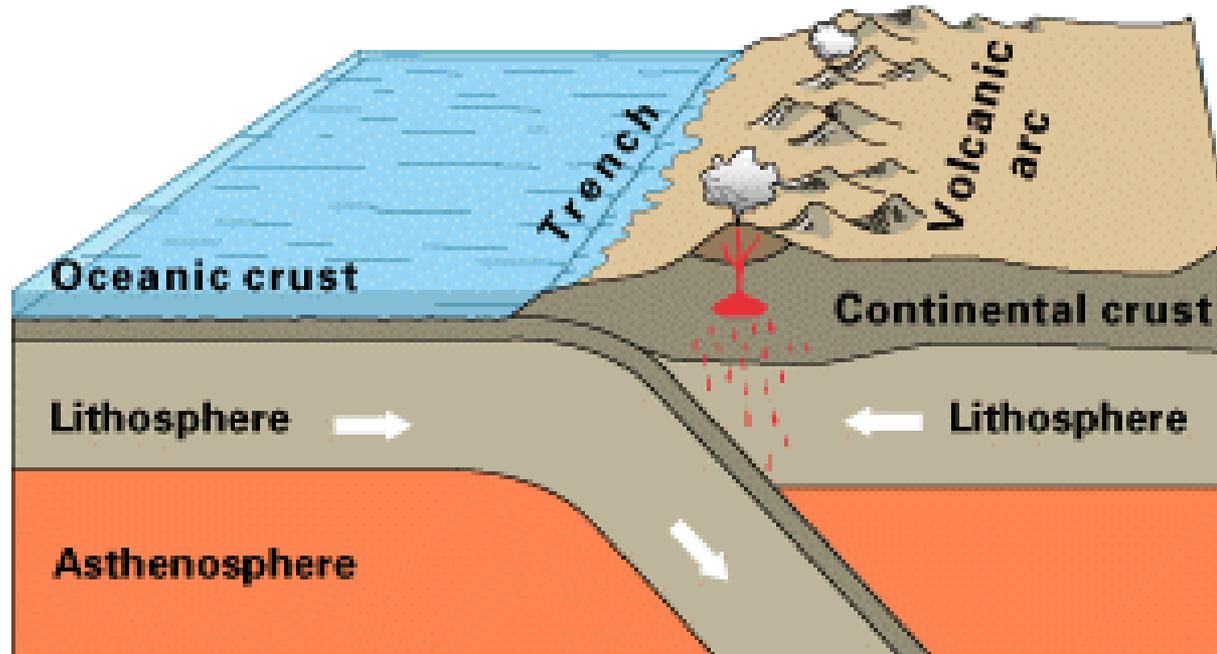
O problema do modelo

Se nas dorsais oceânicas havia contínua criação de placas, e **não havia evidência de que a Terra estivesse aumentando de tamanho**, em algum lugar deveria estar havendo o consumo das placas.



A solução do problema

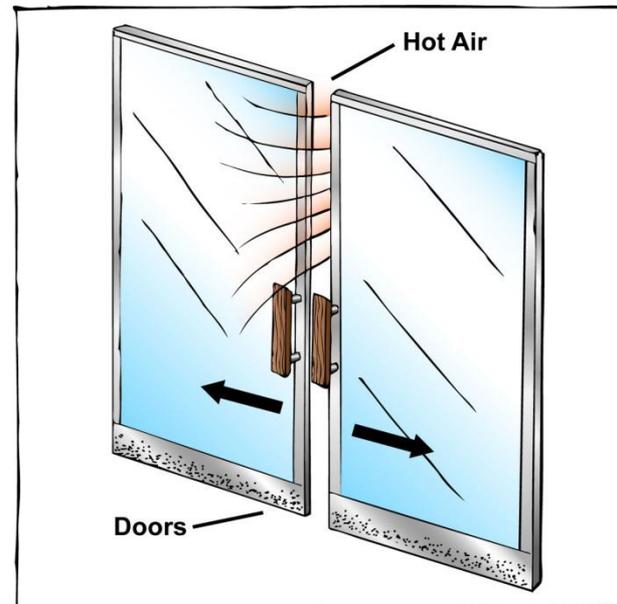
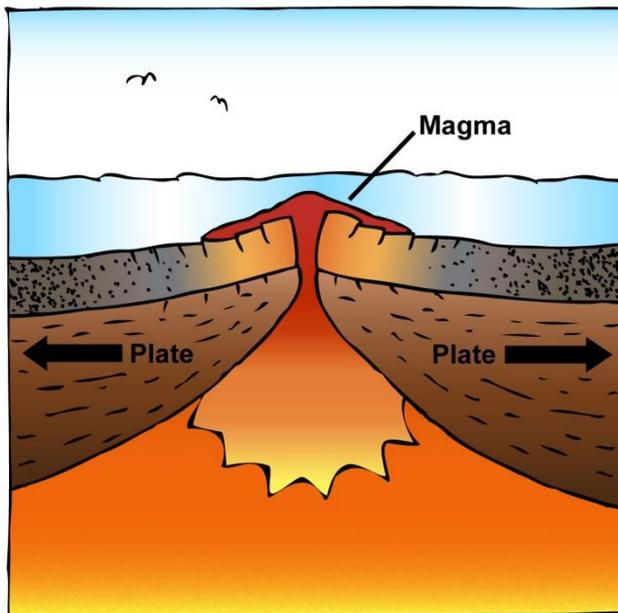
Dois cientistas, Dietz e Hess, postularam que, nas trincheiras oceânicas (faixas estreitas muito profundas ao longo do cinturão do Pacífico), a crosta* oceânica estaria sendo consumida, em contraposição com a criação da crosta* nas dorsais oceânicas.



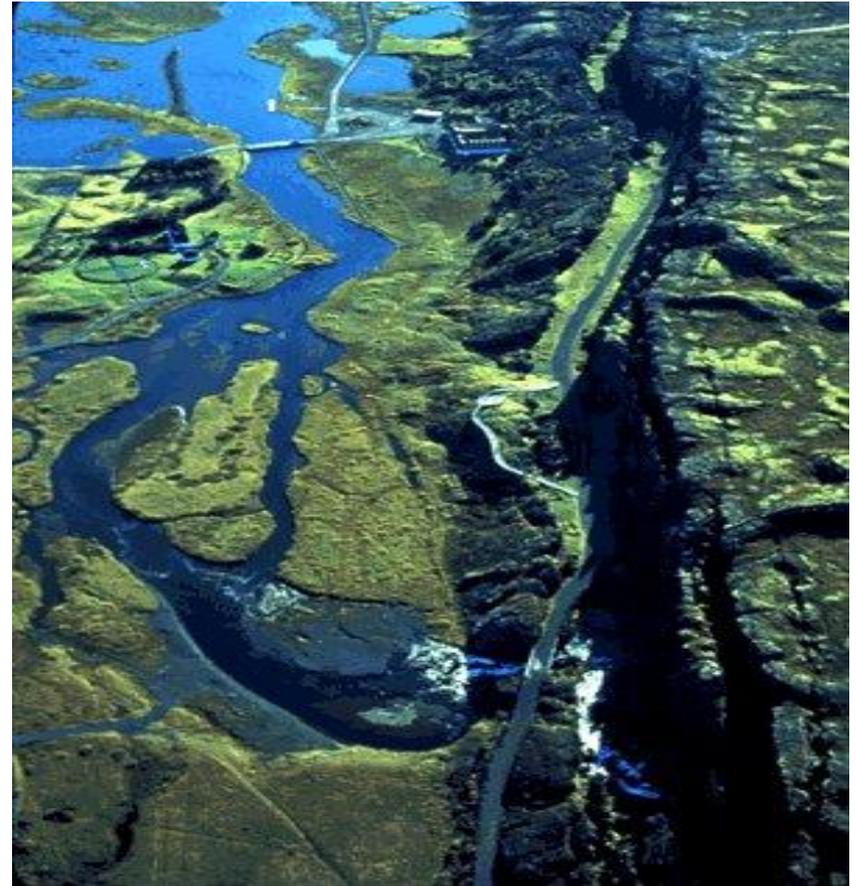
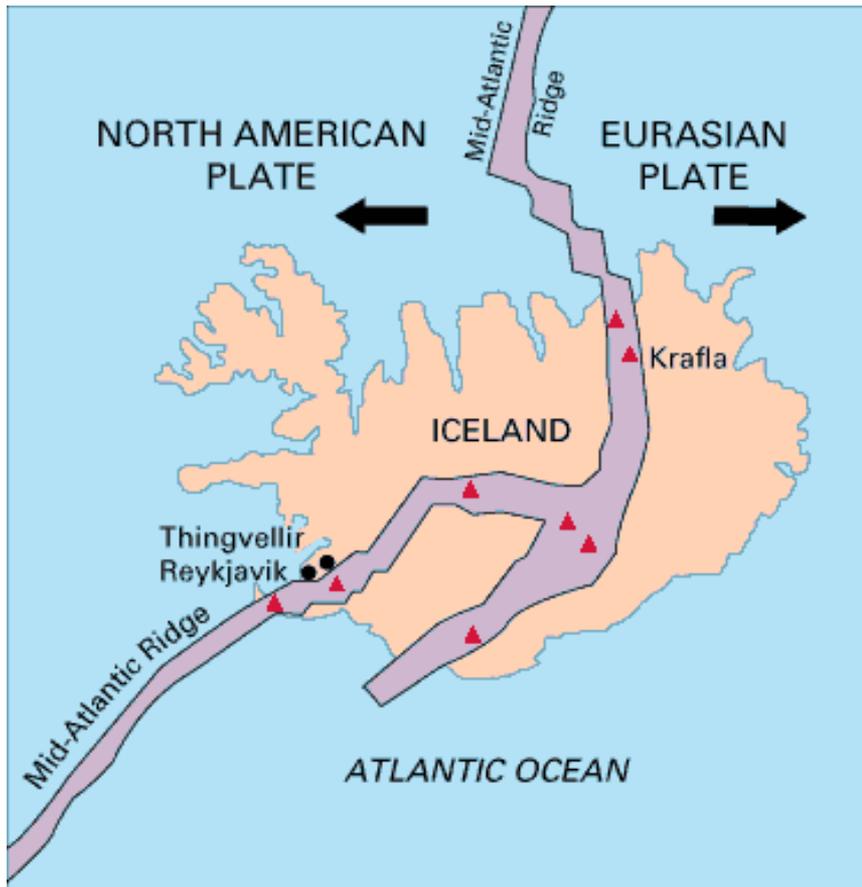
A solução do problema

Com estes dados, o quadro mostrava-se completo:

Nas dorsais oceânicas, havia a criação de crosta* por acreção de material do manto* às bordas das placas; esta construção de placas era evidenciada pela idade progressiva da placa ao se afastar da dorsal, ao padrão magnético e à concentração de terremotos nestas regiões.

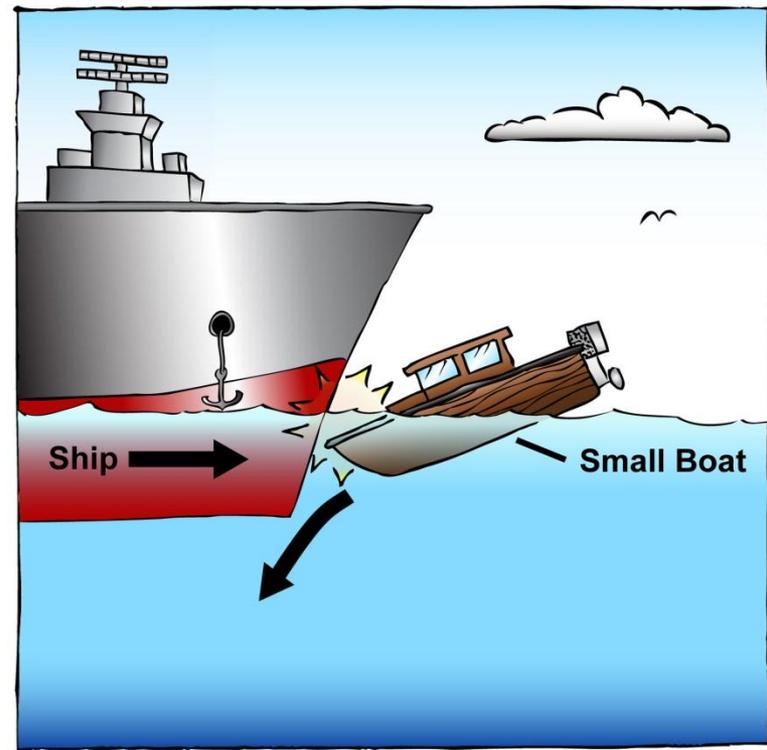
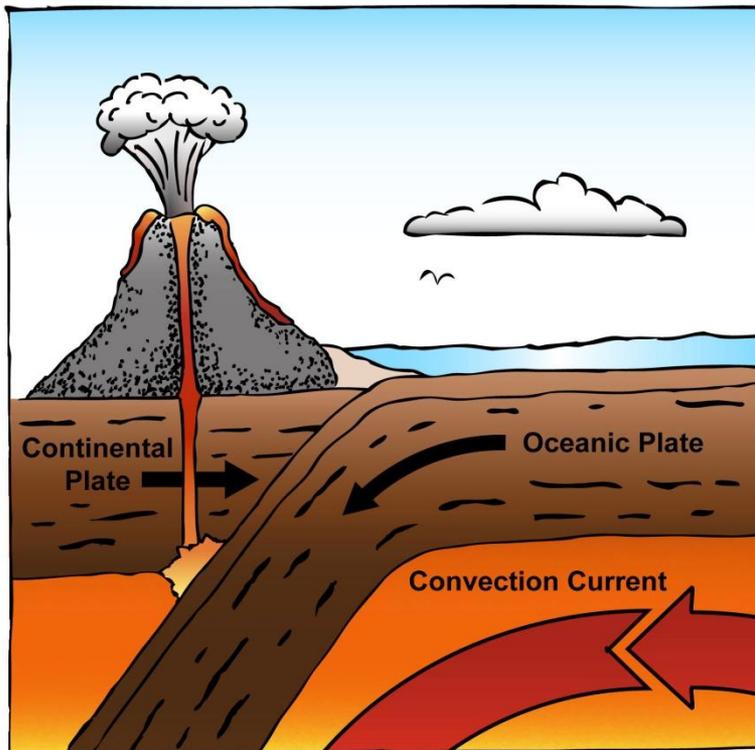


Zonas de divergência



A solução do problema

Nas regiões de trincheira, uma porção da camada superior da Terra estaria afundando sob a vizinha, com terremotos e vulcanismo na borda.

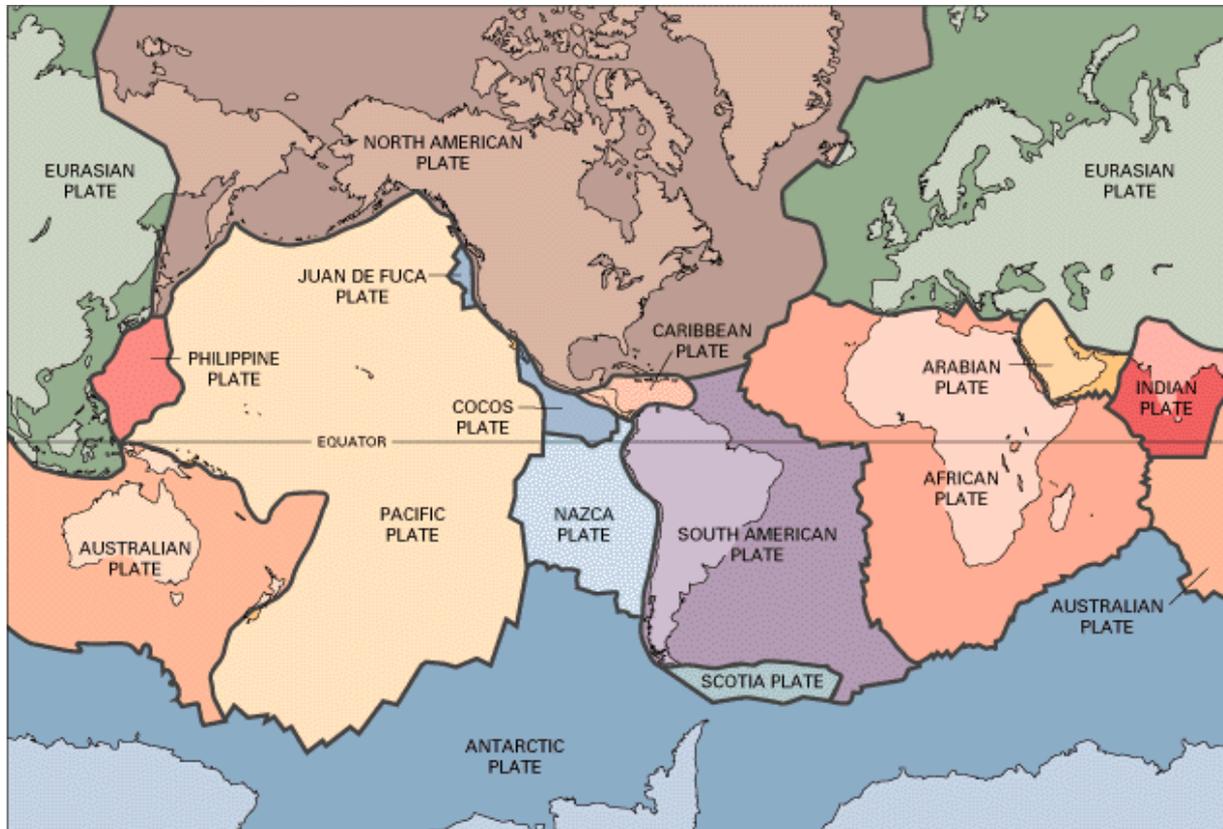


Zonas de convergência

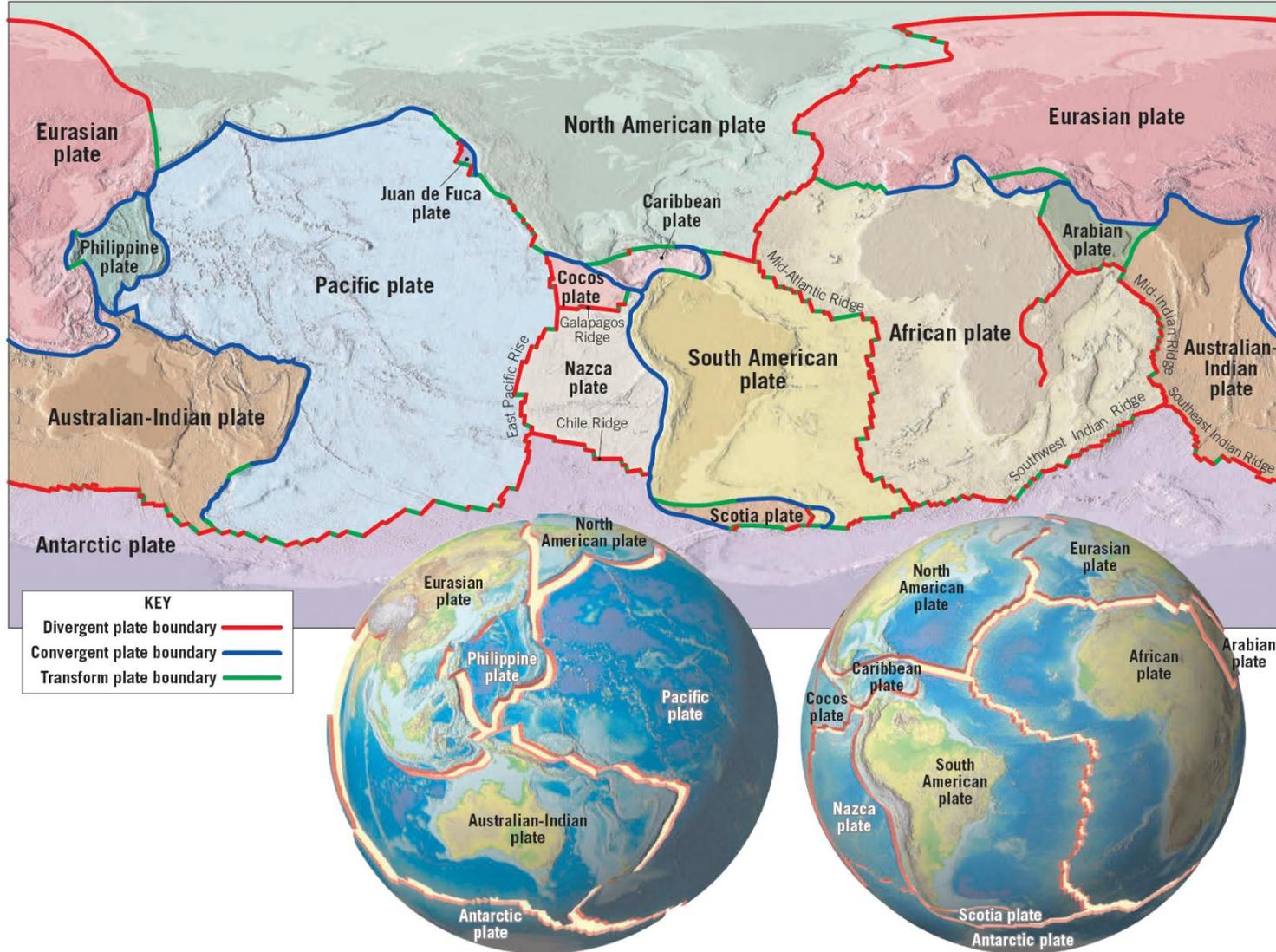


Tectônica de Placas

A camada superficial da Terra está dividida em grandes porções, que denominamos PLACAS LITOSFÉRICAS.



As placas litosféricas

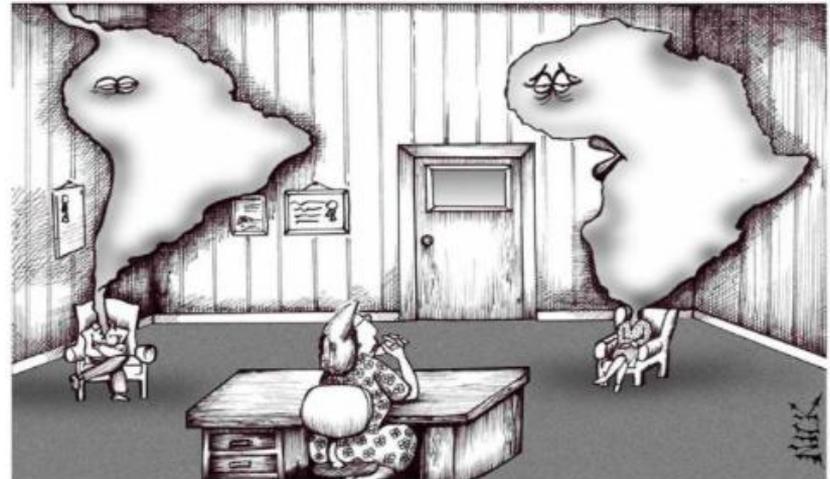
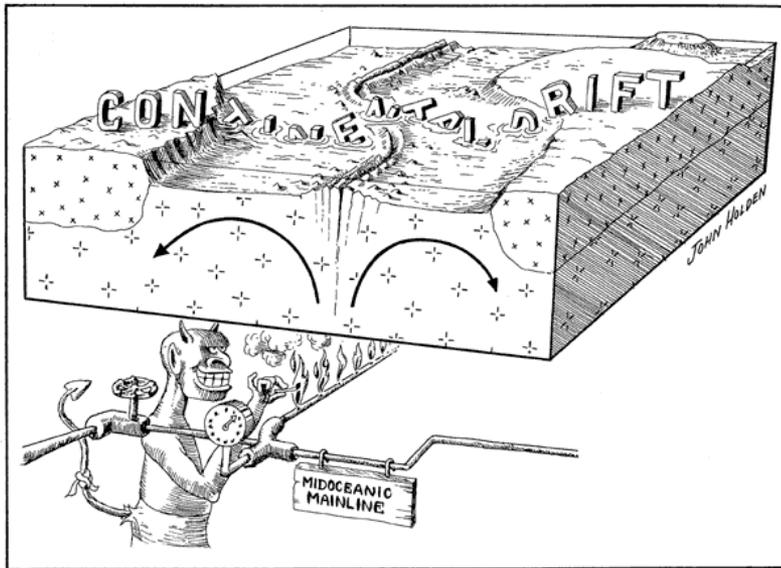


▲ **Figure 3.10**

Earth's major lithospheric plates A. Divergent, convergent, and transform plate boundaries illustrated on a flat map. B. Some of Earth's plates shown using two globes.

Tectônica de Placas

A interação entre as placas litosféricas é responsável por fenômenos como terremotos, grande parte do vulcanismo, formação de cadeias de montanhas e oceanos, e consumo de porções continentais e oceânicas da camada mais externa do planeta, e explica adequadamente a mobilidade das massas continentais e oceânicas.

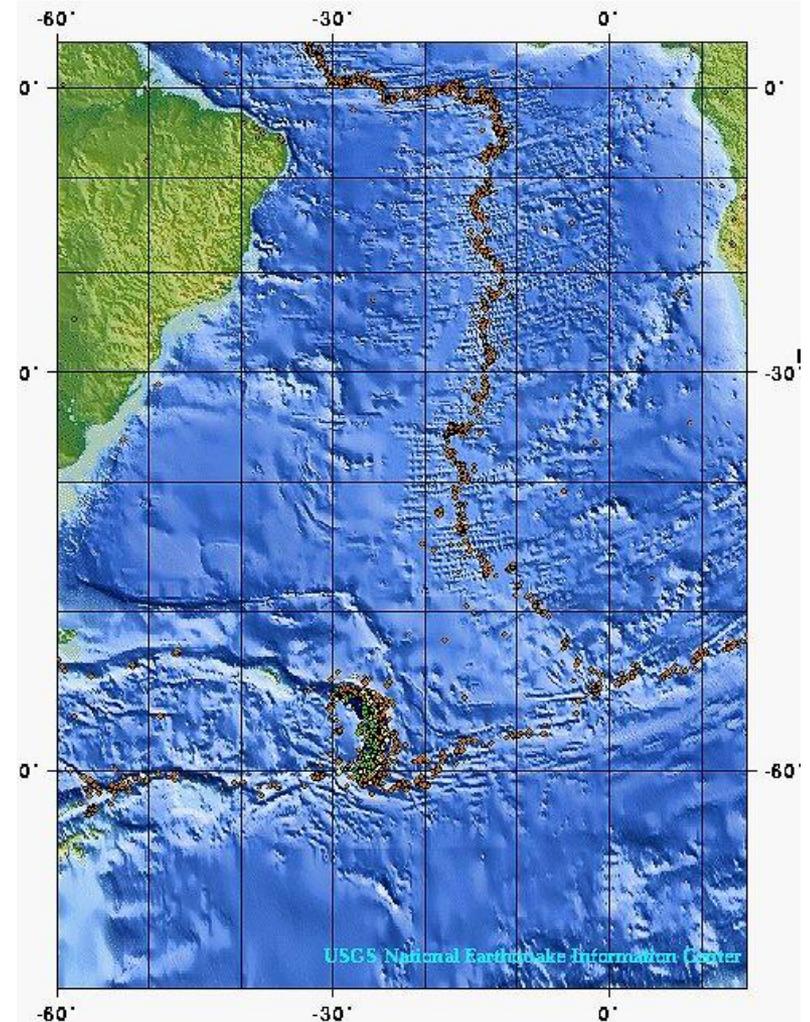
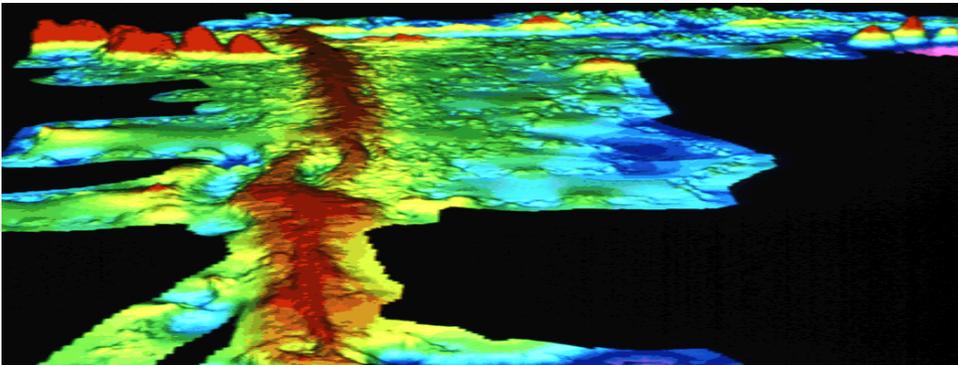


"Well looking back I suppose it's been going on for quite some time, but I only noticed we were drifting apart during the last 50 million years..."

Tipos de bordas de placas

MARGENS DE DIVERGÊNCIA

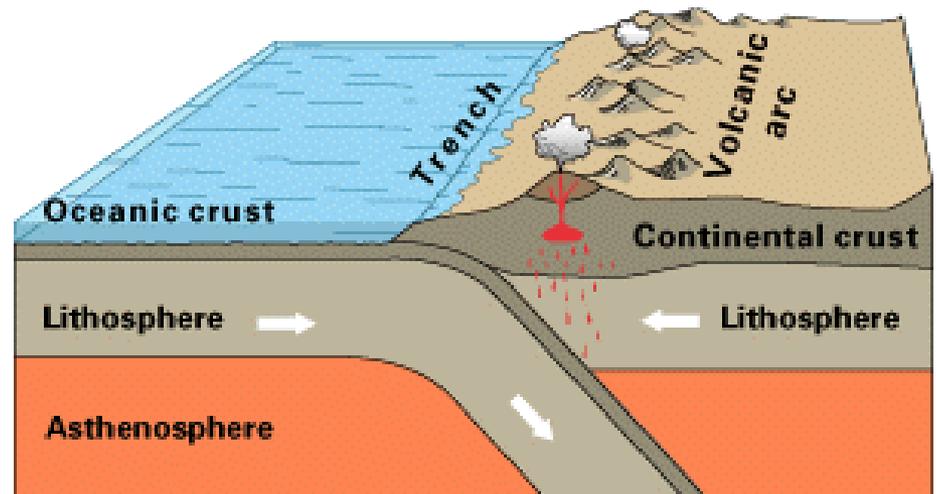
Nas dorsais oceânicas, há uma contínua separação entre duas placas, com acréscimo de material proveniente do manto às bordas das placas. É uma região de constante separação entre as placas, injeção de novo material e crescimento lateral das placas.



Tipos de bordas de placas

MARGENS DE CONVERGÊNCIA

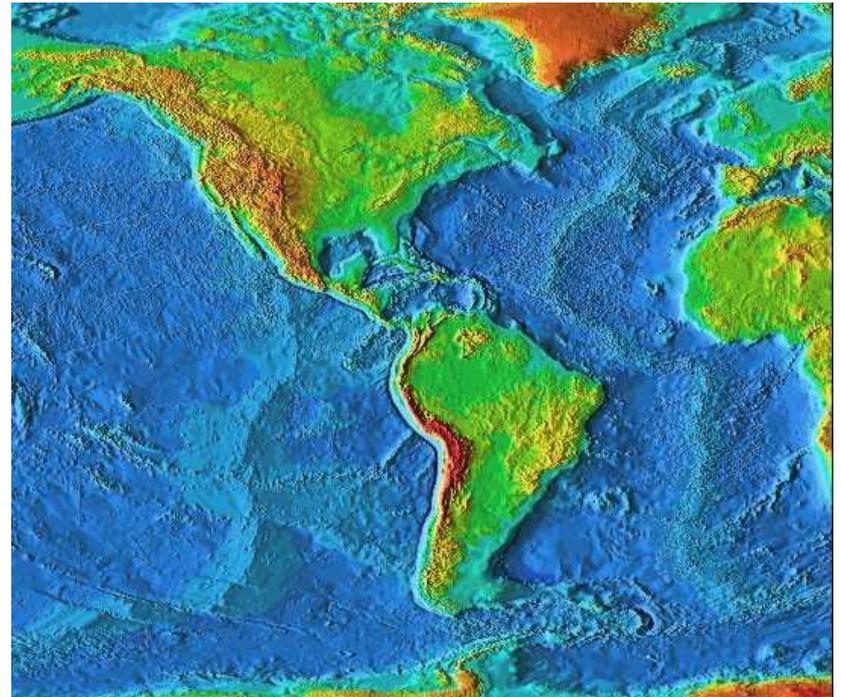
Local onde duas placas colidem, havendo a subducção de uma delas. A elas estão associados os sismos que ocorrem em trincheiras oceânicas profundas, arcos de ilhas e cinturões de montanhas.



Tipos de bordas de placas

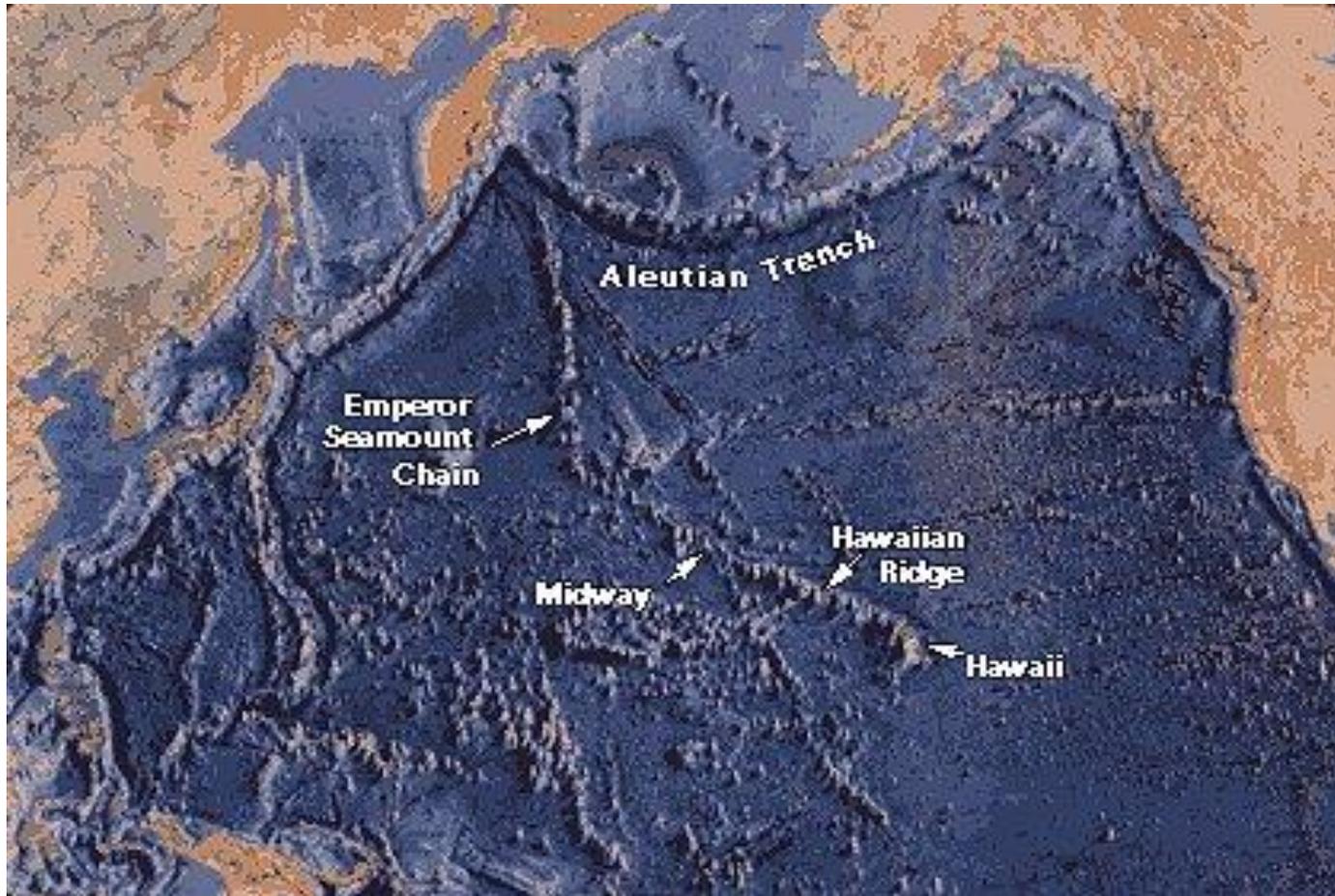
MARGENS DE CONSERVAÇÃO

As falhas transformantes são estruturas presentes nas dorsais oceânicas, que conectam dois segmentos da dorsal. Podem também conectar segmentos de zonas de subducção, mas o caso mais frequente é nas cadeias oceânicas. Neste tipo de margem de placa, não há criação ou destruição de placa, há apenas o deslocamento relativo entre duas placas.



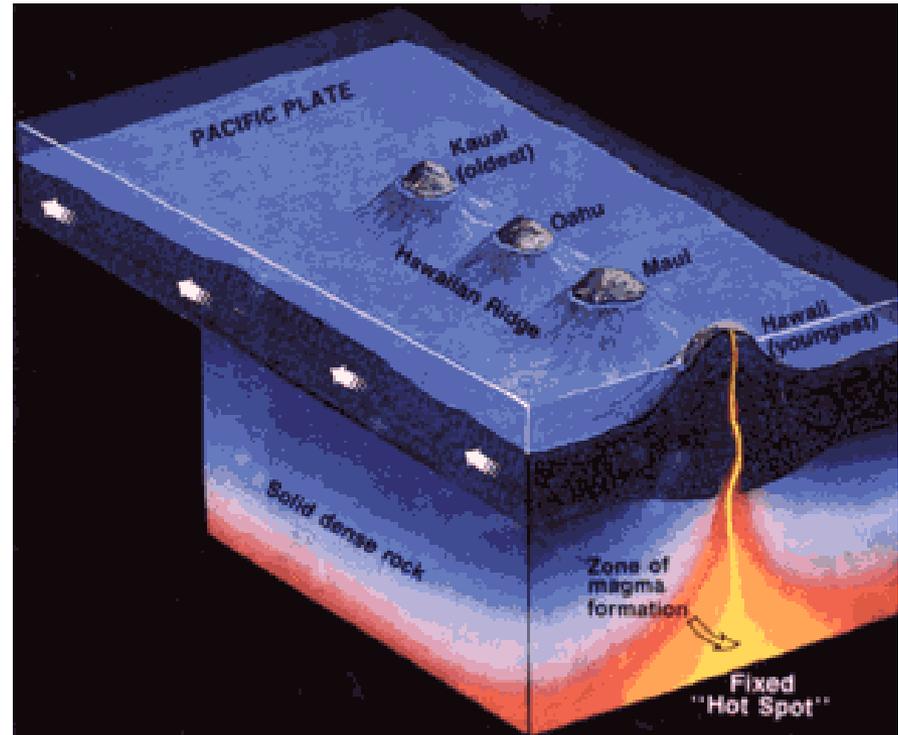
Os hot-spots

A maior parte do vulcanismo terrestre está associado aos processos que ocorrem nas bordas das placas. Alguns pontos específicos são exceção, como por exemplo, a cadeia vulcânica do Havaí.



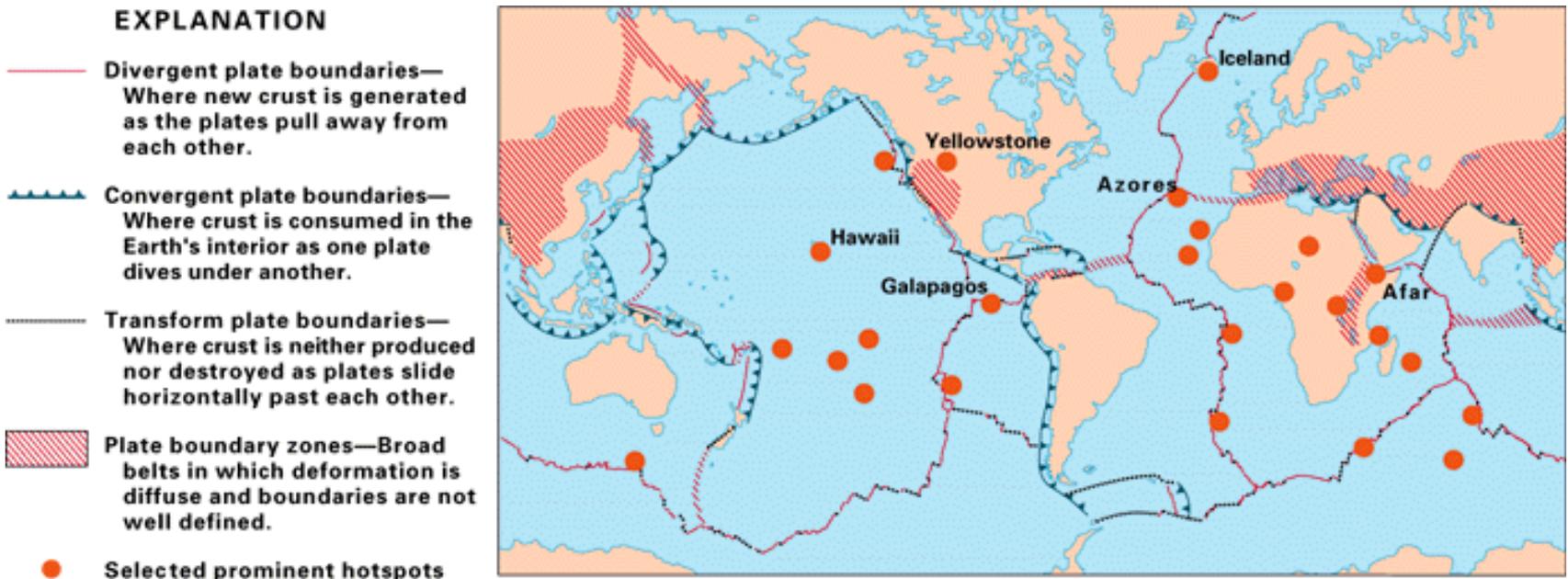
Os hot-spots

Em 1963, Tuzo Wilson, que já havia descoberto as falhas transformantes, sugeriu um mecanismo para este vulcanismo que ocorria fora das regiões de bordas de placas. Ele notou que em certas regiões, o vulcanismo esteve ativo por um longo período de tempo, e sugeriu que deveria haver regiões pequenas, quentes e de longa duração - os pontos quentes (hot-spots).



Distribuição dos hot-spots

Vários hot-spots já foram identificados, a maioria no interior das placas. Os hot-spots devem ser a expressão de grandes “plumas” de material proveniente da interface manto/núcleo (camada D”), que atravessam todo o manto e atingem a superfície.



Tectônica versus Deriva

A ideia de Wegener sobre a mobilidade das massas continentais não estava incorreta em sua essência. O mecanismo pelo qual se dá esta mobilidade é que não foi desvendado.

A diferença fundamental entre a Deriva Continental e a Tectônica de Placas é o fato de que na primeira os continentes estavam se deslocando pela camada superficial do planeta, ao passo que na segunda os continentes FAZEM PARTE DE UMA PLACA LITOSFÉRICA, e é o movimento das placas que faz com que eles se desloquem.

