

# O CICLO DA ÁGUA **6** TÓPICO

Christine Laure Marie Bourotte

- 6.1** Introdução
- 6.2** Propriedades geoquímicas da água
- 6.3** Hidrosfera
- 6.4** Ciclo hidrológico
- 6.5** As águas continentais
  - 6.5.1** Águas superficiais
  - 6.5.2** Água subterrânea
- 6.6** O ciclo da água e o ciclo das rochas
- 6.7** A água e Tectônica de Placas

## 6.1 Introdução

Diferentes componentes interagem em diferentes escalas nas esferas terrestres, com troca de energia e massa. Vimos, no tópico “Tectônica Global”, que a Tectônica de Placas está ligada à convecção no manto que, por sua vez, é controlada pela energia interna da Terra. Em contraste, as interações entre a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera estão vinculadas a outra fonte de energia – a energia solar –, que influencia a dinâmica externa terrestre, determinante na evolução da paisagem.

Em movimento, a água, o gelo e o ar modelam as superfícies continentais, e as paisagens resultantes refletem não apenas estes agentes da dinâmica externa, mas também o tipo, a composição e a estrutura das formações geológicas locais e regionais. Nesse contexto, vários processos combinados atuam no aplainamento do relevo, com rebaixamento das regiões mais altas e sedimentação nas regiões mais baixas: o intemperismo (Tópico “Intemperismo e Pedogênese”), que prepara as rochas duras para o ciclo erosivo, transformando-as em materiais fragmentados e decompostos, e os processos seguintes, que são a erosão, o transporte e a sedimentação, que geram depósitos sedimentares pela denudação continental; esses depósitos, posteriormente, serão transformados em rochas sedimentares (Tópico “Sedimentos e Rochas Sedimentares”). Assim, graças à dinâmica externa, os continentes tendem a atingir o nível de base, que é o nível mais baixo em cada paisagem. Levando-se em conta os continentes em geral, esse nível é o dos oceanos, em cada época, já que há oscilações do nível do mar ao longo do tempo. Não fosse a dinâmica interna, formando cadeias de montanhas continuamente, o relevo terrestre seria bem mais monótono do que é hoje.

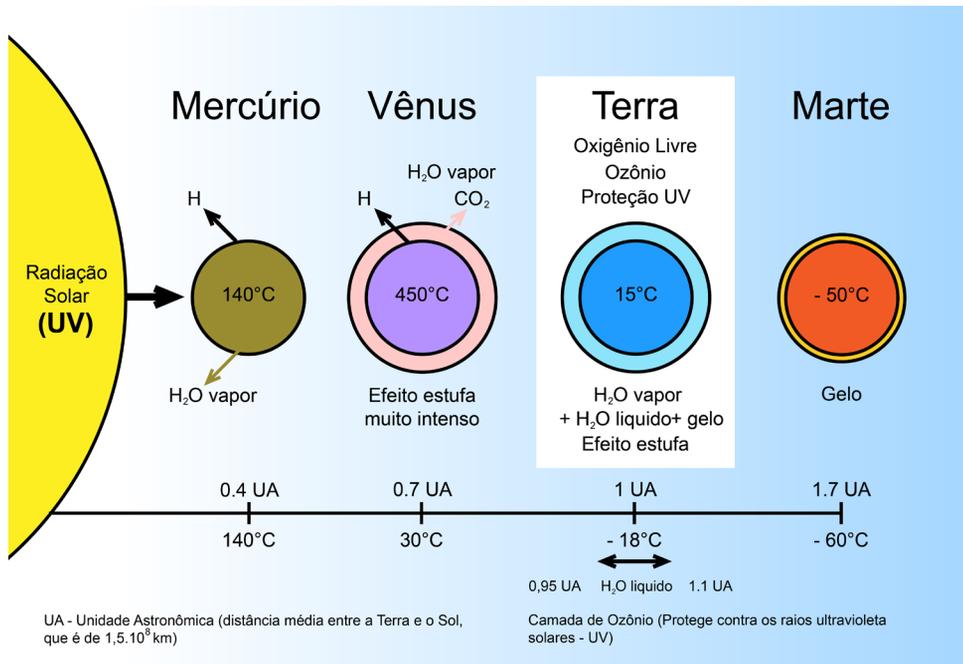
Todos os processos da superfície acima mencionados são, porém, intimamente associados ao movimento da água no planeta: **o ciclo da água**. Esse ciclo pode ser definido como a contínua transferência de água de um reservatório para outro, com destaque para o fato de que, em cada fase do movimento, a água realiza um trabalho geológico, muitos deles com consequências diretas para a biosfera.

A interação entre os diferentes subsistemas ou as diferentes esferas terrestres – a chamada Terra Fluida (atmosfera, hidrosfera, biosfera) e a Terra Sólida (geosfera representada na superfície pela litosfera), ao longo da sua evolução, mudou e transformou o planeta do ponto de vista climático, biológico e geológico. Os ciclos biogeoquímicos, que também se alteraram ao longo da história, representam outro aspecto dessas interações e são particularmente importantes, pois são responsáveis pela reciclagem natural dos elementos essenciais à vida, na qual a água tem um papel preponderante.

Após o crescimento planetesimal e formação da Terra, há 4,56 bilhões de anos, houve um período de intensa perda de gases (degasagem) do manto por meio da atividade vulcânica global (processo que continua ainda hoje em escala subordinada); durante essa perda de gases, a água foi liberada em forma de vapor e armazenada na atmosfera primordial do planeta. Quando a temperatura diminuiu o suficiente, parte importante do vapor d'água condensou e a água líquida, ao se acumular na superfície, formou os primeiros oceanos. Uma pequena quantidade de vapor d'água permaneceu na atmosfera, em quantidade suficiente para manter, junto com a presença de outros gases, inclusive o  $\text{CO}_2$ , o efeito estufa, sem o qual o planeta seria coberto por gelo.

Evidências da presença de oceanos são associadas a rochas sedimentares com idades de 3,8 bilhões de anos. Essas rochas, por suas características, necessitam da presença de água para sua formação, indicando que já naquela época ocorriam o intemperismo de rochas primitivas, a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos, processos que serão detalhados nos tópicos “Intemperismo e Pedogênese” e “Sedimentos e Rochas Sedimentares”.

A Terra é um planeta único no sistema solar, por possuir água nos seus três estados físicos (sólido, líquido e gasoso) e oxigênio na sua atmosfera, e também porque seu efeito estufa natural mantém uma temperatura média global moderada ( $\sim 15^\circ\text{C}$ ) (**Figura 6.1**). Dois principais fatores podem explicar essas condições peculiares, em comparação com os demais planetas do sistema solar: a sua distância em relação ao Sol, reunindo as condições ideais de temperatura e pressão atmosférica, e a existência da biosfera.



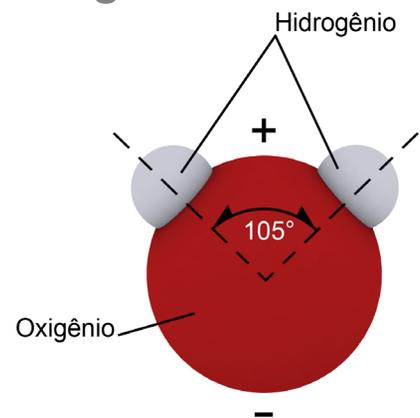
A circulação da água representa a maior movimentação de uma substância química na superfície do nosso planeta. Os processos envolvidos no ciclo da água são relacionados à sua transformação nos diferentes estados físicos, sólido, líquido e gasoso, o que implica em troca de energia (liberação ou absorção). Dessa forma, esses processos têm um papel importante na liberação ou absorção de calor, o que reflete na capacidade da água de armazenar e transportar energia, seja na atmosfera ou nos oceanos, tendo, portanto, um importante papel na regulação do sistema climático terrestre. Pelos processos de evaporação-precipitação e pela circulação oceânica, a água transfere, dos Trópicos até os Polos, uma grande parcela da energia calorífica recebida pela Terra a partir do Sol, regulando as temperaturas; assim, o movimento da água determina os padrões climáticos da Terra e sua sazonalidade, bem como a própria evolução biológica.

Além disso, a circulação da água entre os diferentes reservatórios permite o transporte de partículas e íons, promovendo a parte superficial do ciclo das rochas. Assim, o escoamento das águas continentais transfere os produtos do intemperismo físico e químico (partículas sólidas e substâncias dissolvidas) em direção às partes mais baixas dos continentes e aos oceanos, promovendo a mobilização de nutrientes, que podem entrar no ciclo biológico dos organismos durante esse trajeto ou seguirem até o oceano, onde farão parte de novas fases, em solução (contribuindo para a manutenção da salinidade dos oceanos) ou como minerais precipitados, com ou sem a participação de organismos. Percebe-se, assim, que o ciclo da água é fundamental à manutenção da vida.

## 6.2 Propriedades geoquímicas da água

A composição da água (duas partes de hidrogênio e uma de oxigênio) foi descoberta pelo cientista londrino **Henry Cavendish** (1731-1810), em 1781. A geometria dipolar da molécula confere propriedades físicas e químicas muito peculiares à água (**Figura 6.2**).

Do ponto de vista geológico e ambiental, as propriedades da água como densidade, pontos de fusão e ebulição, capacidade térmica, calor de vaporização, tensão superficial, absorção de radiação (importante para o balanço energético da superfície terrestre ou como solvente) permitem qualificar a sua importância e caráter peculiar.



**Figura 6.2:** Estrutura molecular da água, que determina a distribuição de carga elétrica predominantemente positiva de um lado, e predominantemente negativa do outro, formando um dipolo elétrico.

A densidade máxima da água, por exemplo, é atingida a 4 °C; temperaturas abaixo ou acima desse valor promovem uma estratificação em corpos d'água, o que pode promover movimentação dentro dos copos d'água.

Quando congelada, a água se expande. Caso a água congelada esteja aprisionada em fissuras nas rochas, ela promoverá a expansão das fissuras, ou seja, contribuirá para o intemperismo físico (quebra a desagregação das rochas). Pela mesma propriedade, sendo o gelo menos denso que a água líquida, ele permanece na superfície de corpos d'água (lagos, por exemplo) quando ocorre seu congelamento parcial, agindo como uma cobertura térmica e reduzindo a perda de calor. Assim, as formas de vida adaptadas a essa situação podem manter-se na parte líquida abaixo da cobertura congelada.

A capacidade térmica da água, isto é, a quantidade de calor necessária para aumentar sua temperatura em um grau Celsius também é muito elevada. Por isso, a água absorve grandes quantidades de calor durante os períodos de insolação, retendo energia, o que lhe dá um papel regulador do clima em escala global: a energia armazenada no período de insolação é lentamente liberada depois, permitindo que os grandes corpos d'água, como oceanos e grandes lagos, forneçam o calor armazenado para a atmosfera.

As constantes mudanças de estado físico da água durante seu ciclo natural também exercem influência no clima (**Tabela 6.1**), devido à liberação e absorção de calor, conforme a transformação física.

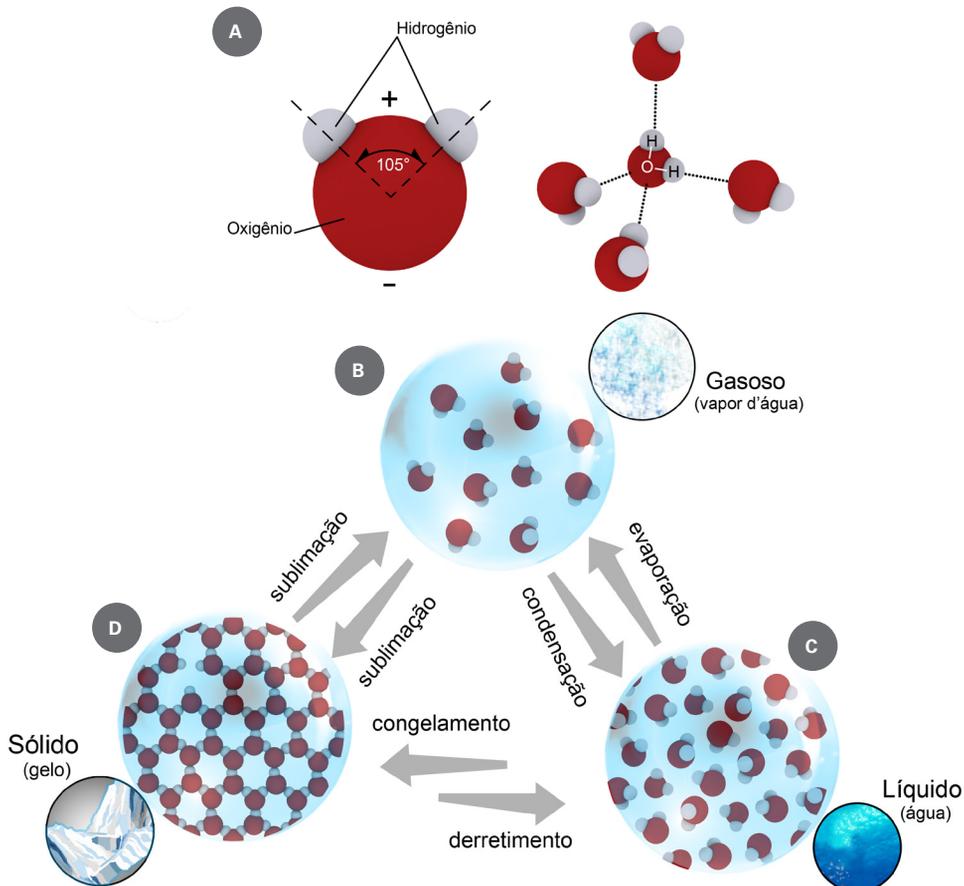
Mudança de estado físico	Nome do processo	Consequência energética
Gasoso para líquido	Condensação	Liberação de calor
Líquido para sólido	Solidificação (cristalização)	Liberação de calor
Gasoso para sólido	Solidificação	Liberação de calor
Líquido para gasoso	Evaporação	Absorção de calor
Sólido para líquido	Fusão	Absorção de calor
Sólido para gasoso	Sublimação	Absorção de calor

**Tabela 6.1:** Processos de mudança de estado físico da água e suas consequências no balanço de energia do sistema.

Além disso, a água é um excelente solvente, o que permite o transporte de substâncias nutritivas e residuais nos sistemas biológicos. Nos ambientes geológicos, facilita o intemperismo químico de rochas e o transporte de substâncias em solução.

Todas essas características são produto das propriedades advindas da estrutura dipolar da molécula de água (**Figura 6.2**), que permite interações moleculares do tipo pontes de hidrogênio, 10 a

50 vezes mais fracas que as ligações covalentes entre H e O dentro das moléculas, mas com força suficiente para as moléculas manifestarem sua tendência ao agrupamento molecular. A presença dessa atração entre as moléculas permite uma organização, tanto maior quanto menos energia tiver o sistema, ou seja, é maior no estado sólido e menor no estado gasoso, conforme mostra a **Figura 6.3**.



**Figura 6.3:** Estrutura da molécula de água e interação intermolecular nos três estados físicos. **A.** Pontes de hidrogênio unindo moléculas de água. **B.** Organização das moléculas nos diferentes estados físicos: sólido, líquido e gasoso. No gelo, a coordenação da molécula é 4 e, no estado líquido, a coordenação é 4,4.

## 6.3 Hidrosfera

A hidrosfera é o conjunto de toda a água existente na Terra, distribuída em seus vários reservatórios. Os principais são os oceanos, as águas continentais (superficiais e subterrâneas),

a atmosfera e a água presente nos seres vivos (biosfera). Considerando somente a massa e o volume dos diferentes reservatórios em superfície, o volume total de água no planeta é de aproximadamente 1,4 bilhão de km<sup>3</sup>, distribuídos conforme indicado na **Tabela 6.2**. Esta tabela demonstra que a distribuição da água é bastante desigual pelos diversos continentes no planeta. Há ainda, água na estrutura de vários minerais constituintes nas rochas, solos e sedimentos.

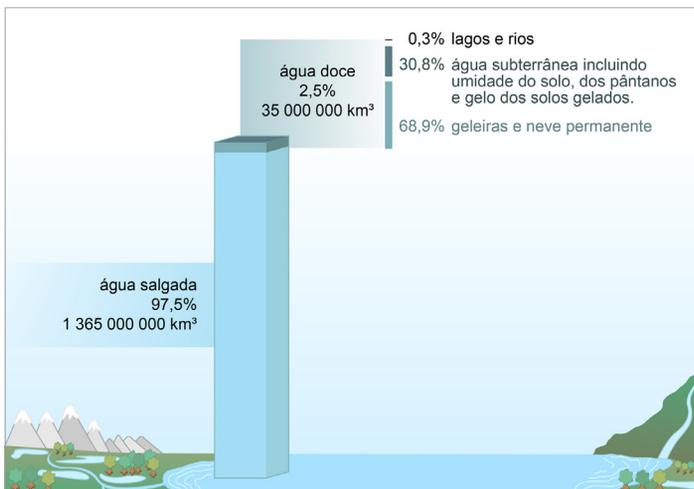
Reservatórios	Volume de água	
	(10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	(%)
Oceanos	1.340	97,1
Gelo	24	1,7
Águas subterrâneas	16	1,2
Águas superficiais	0,176	0,01
Atmosfera	0,013	0,001
Seres vivos	0,00112	0,0001
TOTAL hidrosfera (*)	1.380	

(\*): desconsiderada a quantidade de água presente nos diversos minerais que a contêm em sua estrutura, e que constituem as rochas, solos e sedimentos.

**Tabela 6.2:** Reservatórios de água na Terra. / Fonte: CARON *et al.*, 2003.

As águas salgadas contêm, em média, 35% de sais em forma de íons. Os mais abundantes são Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Esses íons são trazidos para os oceanos pelas águas continentais, durante a lixiviação dos íons mais solúveis (ver Tópico “Intemperismo e Pedogênese”) e pela atividade hidrotermal nas zonas de dorsais mesoceânicas.

Há água também na crosta e no manto, na estrutura de alguns minerais; a quantidade estimada nesses materiais é de 1% (crosta) e 0,05% (manto) do seu peso. Considerando a massa e a densidade da crosta e do manto, a massa de água corresponde a  $243 \times 10^{18}$  kg e  $150 \times 10^{18}$  kg, respectivamente.

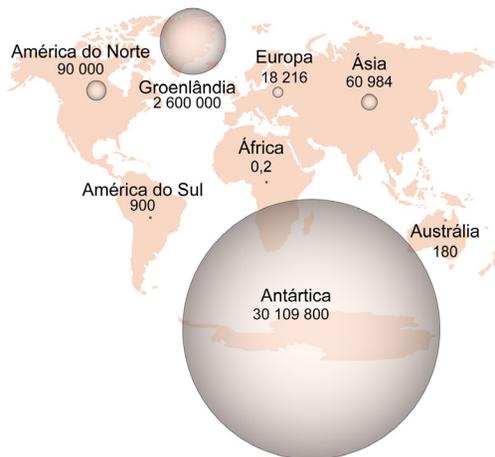


Esses valores representam 23% da hidrosfera, o que não foi considerado nos cálculos aqui indicados, que consideram apenas os reservatórios superficiais fora da litosfera. A **Figura 6.4** apresenta a repartição da água nos diferentes reservatórios da hidrosfera.

**Figura 6.4:** Repartição da água nos diferentes reservatórios da hidrosfera.

A repartição da água doce no planeta depende muito das condições climáticas que influenciam regionalmente, ou de modo localizado, o ciclo hidrológico, ou seja, o balanço hídrico (balanço entre as quantidades de precipitação e evaporação somada com transpiração, sendo que a diferença representa o escoamento e a infiltração). Isso explica, em parte, a distribuição da água nos diferentes continentes. Nas regiões tropicais, onde se situam os grandes desertos áridos e quentes da África do Norte, da Austrália e do Oriente Médio, o balanço hídrico é negativo, devido à elevada evaporação e escassez de precipitação. Nas regiões temperadas e intertropicais, o balanço é geralmente positivo e elas são, portanto, regiões favorecidas do ponto de vista da disponibilidade de água. O Brasil, com suas grandes bacias hidrográficas (Amazonas, Tocantins, Paraná, São Francisco) e seus aquíferos, como o Guarani (a ser definido mais adiante), possui 40% da água doce do mundo. Sendo a água doce um recurso fundamental, e até mesmo estratégico, esta é uma situação privilegiada, a ser reconhecida para a valorização da conservação dos recursos hídricos nacionais. A **Figura 6.5** destaca os recursos globais das águas subterrâneas, em termos de quantidade e distribuição na Terra.

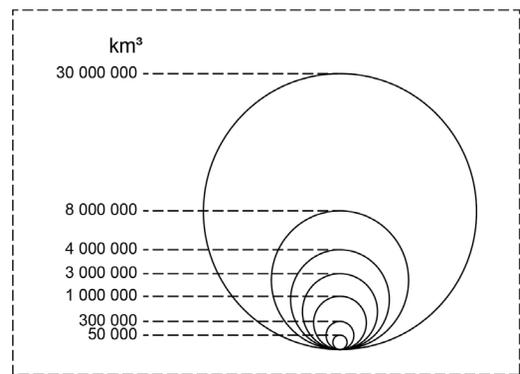
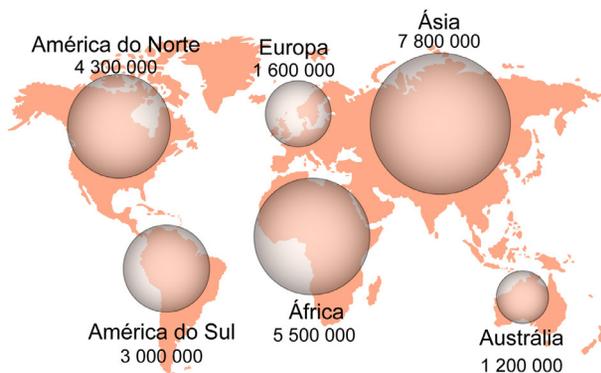
geleiras e calotas de gelo (km<sup>3</sup>)



regiões alagadas, grandes lagos, represas e rios (km<sup>3</sup>)



água subterrânea (km<sup>3</sup>)



"legenda" indicativa da quantidade de água doce em km<sup>3</sup>

**Figura 6.5:** Recursos Globais de Águas doces (quantidade e distribuição por continente, em km<sup>3</sup>).

## 6.4 Ciclo hidrológico

A água contida em cada reservatório não é estática. Ela se movimenta continuamente, sendo transferida entre os diferentes reservatórios. Assim, o ciclo da água representa a circulação contínua da água através da hidrosfera, atmosfera, biosfera e geosfera. Estima-se que esses fluxos movimentam aproximadamente 580.000 km<sup>3</sup> de água todo ano entre a atmosfera, a biosfera, os oceanos e os continentes. No sentido figurado, podemos dizer que a Terra funciona como um gigantesco destilador, no qual a água evapora continuamente, deixando seus íons dissolvidos, passa por condensação, retornando à superfície na forma líquida (chuva), principalmente, mas também sólida (neve/gelo). A velocidade dessas transferências varia em função das características intrínsecas de cada reservatório, pois depende do seu tamanho e dos fluxos de entrada ou saída (**Tabela 6.3**).

Reservatório	Quantidade (10 <sup>17</sup> kg)	Fluxo (10 <sup>17</sup> kg/ano)	Tempo de residência médio (anos)
Atmosfera	0,13	0,40	0,3
Rios e lagos	2,25	0,40	5,6
Oceanos	13.480	4,25	3.172
Água intersticial	3.300	0,40	8.250

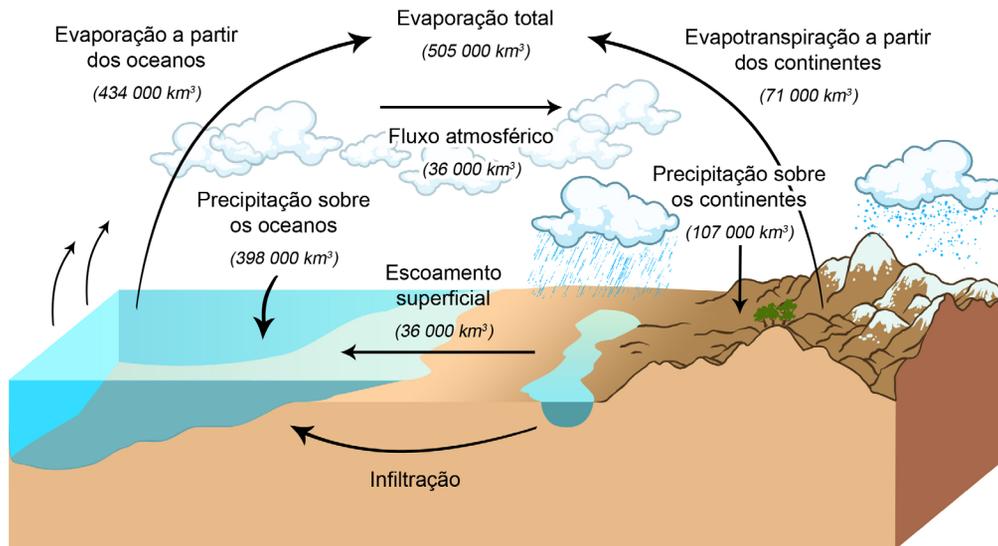
**Tabela 6.3:** Fluxos e tempo de residência da água nos grandes reservatórios terrestres. / Fonte: CARON *et al.*, 2003.

O ciclo externo da água pode ser observado facilmente. O calor solar fornece energia para a transformação da água líquida em vapor, em toda a superfície do globo; nos oceanos, ocorre apenas a evaporação; já nos continentes, ocorre tanto a evaporação das águas livres como a transpiração dos seres vivos; por isso, o processo, nos continentes, é chamado evapotranspiração. O produto da evaporação e da evapotranspiração se acumula na atmosfera, em forma de nuvens que se movimentam, distribuindo a água na atmosfera. Assim, parte da água que evaporou dos oceanos passa para o estado líquido, precipitando-se como chuva ou neve sobre os continentes. Esse mecanismo natural fornece o excesso de água aos continentes, que, de outra parte, mantêm o trabalho de escoamento superficial e subterrâneo, promovendo intemperismo das rochas, cujos produtos (materiais soltos) são erodidos e transportados em direção aos oceanos, principalmente pelos rios (ver Tópico “Sedimentos e Rochas Sedimentares”). Esses processos, associados à movimentação das nuvens, são responsáveis pela transferência de água entre oceanos e continentes e ocorrem em escala global.

Nos continentes, a água que atinge a superfície pode evaporar novamente, ou ser interceptada pelos seres vivos, absorvida e evapotranspirada novamente. Parte da água escoar na

superfície, alimentando os rios e retornando aos oceanos ao longo dos litorais. Uma parte da água infiltra-se nas rochas e nos solos, recarregando as águas subterrâneas. As condições locais de clima, relevo, litologia e cobertura vegetal são fatores condicionantes do ciclo da água, que pode variar de uma região para outra.

Pode ser estabelecido um balanço hidrológico global, conforme apresentado na **Figura 6.6**. A quantidade de água evaporada anualmente é de  $505.000 \text{ km}^3$ , o que representa  $0,04\%$  da água total da hidrosfera. Daquele valor, mais de  $85\%$  são evaporados diretamente dos oceanos, sendo o restante evaporado a partir da água superficial dos continentes; também a água de transpiração dos seres vivos incorpora-se nesse fluxo, que é comumente denominado de evapotranspiração. O fluxo de água que retorna da atmosfera para a superfície terrestre por meio das precipitações é igual ao fluxo da evapotranspiração. Entretanto, o balanço é negativo nos oceanos, com  $398 \text{ mil km}^3$  de precipitação e  $434 \text{ mil km}^3$  de evaporação. Nos continentes, esse balanço é positivo:  $71 \text{ mil km}^3$  de água evaporam e  $107 \text{ mil km}^3$  de água precipitam. O excedente nos continentes ( $36 \text{ mil km}^3$ ) retorna aos oceanos por meio do escoamento superficial, ou seja, das redes de drenagem. Esse retorno da água dos continentes para os oceanos é mais lento que o fluxo atmosférico, pois parte da água dos continentes pode estar estocada em forma de gelo ou em reservatórios profundos.



**Figura 6.6:** O ciclo hidrológico, com o fluxo anual de transferência de água, por ano, entre os reservatórios. Pela evapotranspiração, a água é transferida dos continentes e oceanos para a atmosfera, de onde retorna para a superfície pela precipitação (chuva, neve). A evaporação mais elevada a partir dos oceanos em relação à precipitação é compensada pelo escoamento superficial que corresponde ao excedente de precipitação sobre os continentes (em relação à evaporação), que retorna para os oceanos.

## 6.5 As águas continentais

As águas continentais podem ser classificadas em águas superficiais e águas contidas em reservatórios subterrâneos.

### 6.5.1 Águas superficiais

Rios e lagos são importantes reservatórios superficiais de água doce tanto para o consumo humano quanto para a manutenção e sobrevivência dos organismos vivos (plantas e animais). Os rios são formados pelo escoamento superficial da água nos continentes e drenam grandes áreas de captação da água da precipitação, formando **bacias hidrográficas**. O rio Amazonas, por exemplo, descarrega para o oceano  $3.768 \text{ km}^3$  de água por ano, drenando uma área de  $7.049.980 \text{ km}^2$ . Neste volume drenado, estão incluídas  $46,4 \text{ t/km}^3$  de íons e substâncias dissolvidas e  $79 \text{ t/km}^3$  de sólidos em suspensão, que alcançam o oceano Atlântico; esses sólidos em suspensão depositam-se parcialmente próximo à foz do rio, formando um enorme cone de deposição.

A quantidade de água que escoar na superfície e não se infiltra no subsolo depende de vários fatores: a duração e intensidade da precipitação, o tipo de material superficial e suas características de permeabilidade, a quantidade de água presente no solo, a topografia e a cobertura vegetal (tipo, extensão, densidade). Quando o material na superfície é impermeável, ou quando se torna saturado de água, é o escoamento superficial que predomina em relação à infiltração. Filetes de água se juntam em riachos que, por sua vez, formam rios. Em área urbana, é o escoamento superficial que predomina, devido à impermeabilização da superfície (pavimentação de ruas, alta densidade de construções etc.), o que muitas vezes provoca enchentes e inundações nas áreas de planície de inundação dos rios ocupadas pelo ser humano.

### 6.5.2 Água subterrânea

Embora escondida abaixo da superfície, existe grande quantidade de água subterrânea nas fissuras, fraturas e poros das rochas, solos e sedimentos, que podem se tornar saturados de água, formando um volume que se distribui por todo o subsolo. Na verdade, a água subterrânea representa um dos maiores recursos de água potável do mundo. Alguns países ou regiões dependem totalmente desse recurso para sobrevivência de sua população (ver **Figura 6.4**)

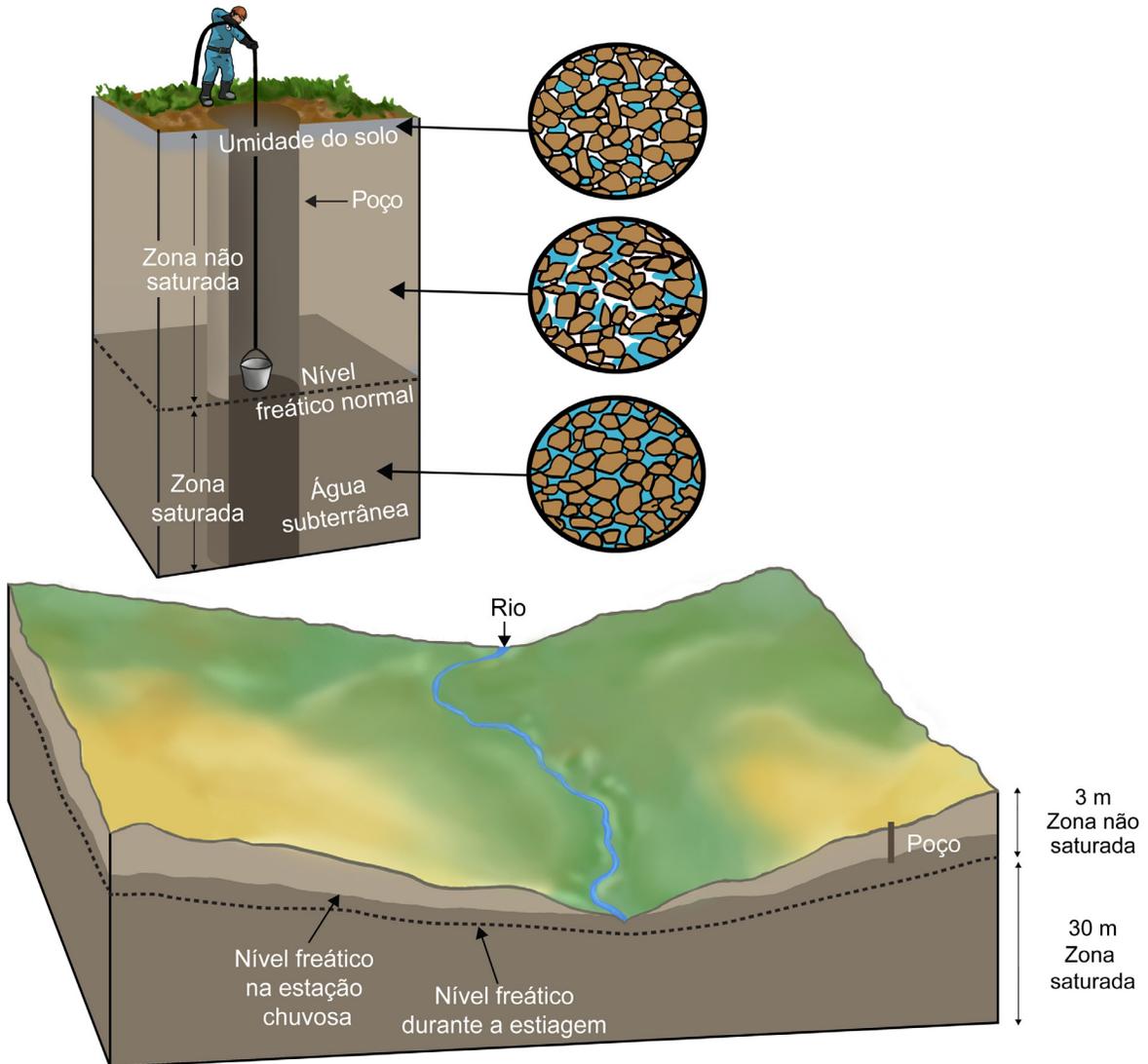
A água do subsolo tem sua origem principalmente na parcela infiltrada das chuvas. A facilidade com que a água se infiltra, devido à força da gravidade, depende das características dos materiais locais (tipo, textura, estrutura) que determinam sua porosidade e permeabilidade, e controlam o armazenamento e o movimento da água no subsolo. A **porosidade** é a porcentagem de vazios por unidade de volume presente em uma rocha, solo ou sedimento em função das características e disposição dos minerais constituintes. A **permeabilidade** corresponde à capacidade do sedimento ou da rocha de transmitir os fluidos que ocupam os poros, ou seja, de permitir o fluxo de água. Para que um sedimento ou uma rocha seja permeável, os poros existentes entre os grãos minerais precisam estar em contato uns com os outros.

Um material que armazena e transmite água é denominado **aquífero**. Areias ou arenitos porosos são geralmente bons aquíferos, por permitirem uma boa infiltração, armazenamento e circulação de água subterrânea. Rochas fraturadas também podem ser excelentes aquíferos, desde que as fraturas estejam conectadas entre si, formando uma rede. Contudo, sedimentos muito finos, ricos em argila e rochas argilosas, como folhelhos (ver Tópico “Sedimentos e Rochas Sedimentares”), por exemplo, constituem uma barreira à circulação da água subterrânea. De fato, argilominerais possuem uma estrutura em folha (filossilicatos, ver Tópico “Minerais Formadores de Rochas”) cujo arranjo muito fino e fechado torna o conjunto do material pouco permeável, ou mesmo impermeável à passagem da água. Essas camadas de materiais impermeáveis são chamadas **aquicludes**.

Assim, se os materiais são permeáveis, as águas de chuva infiltram-se até atingir um certo nível, a partir do qual se acumulam. Dessa maneira, no subsolo, a água distribui-se em duas zonas principais: a **zona não-saturada** e a **zona saturada**. Na zona saturada, todos os poros da rocha ou sedimento são preenchidos por água, enquanto na zona não-saturada (também chamada zona vadosa), situada acima dela, os poros são preenchidos por água e ar. O limite entre as duas zonas representa o nível d’água, ou a superfície do **lençol freático** (ver **Figura 6.6**). No topo da zona saturada e localizada na zona vadosa, existe uma pequena faixa onde a água pode subir por capilaridade a partir do lençol freático; essa zona é chamada franja capilar.

O limite superior do lençol freático oscila conforme a estação do ano: na estação chuvosa, ele sobe, podendo até atingir a superfície da topografia, enquanto na estação seca esse nível desce. Os poços abertos para retirada da água subterrânea mostram bem essa oscilação, pois seu nível é reflexo direto do nível da água em cada momento. A água subterrânea tem um papel importante na recarga dos rios em períodos de seca, já que há comunicação direta entre a água

subterrânea e a água superficial (**Figura 6.7**). Por outro lado, nas épocas de seca, são os rios que podem levar água para o lençol subterrâneo, se houver água suficiente na região de suas cabeceiras, mantendo a perenidade do curso d'água. Além disso, outros ecossistemas dependem da descarga da água subterrânea em áreas como lagos e pântanos.



**Figura 6.7:** Distribuição da água subterrânea: zonas não-saturada e saturada e relação com a topografia, estação do ano e recarga dos rios.

Já o limite inferior da água subterrânea pode localizar-se em profundidades de até algumas centenas de metros, onde a pressão torna os poros pequenos demais para a água se infiltrar. Quanto mais profunda na crosta, mais a água se enriquece em substâncias minerais, incluindo metais e outros íons solúveis, o que pode torná-la imprópria para consumo.

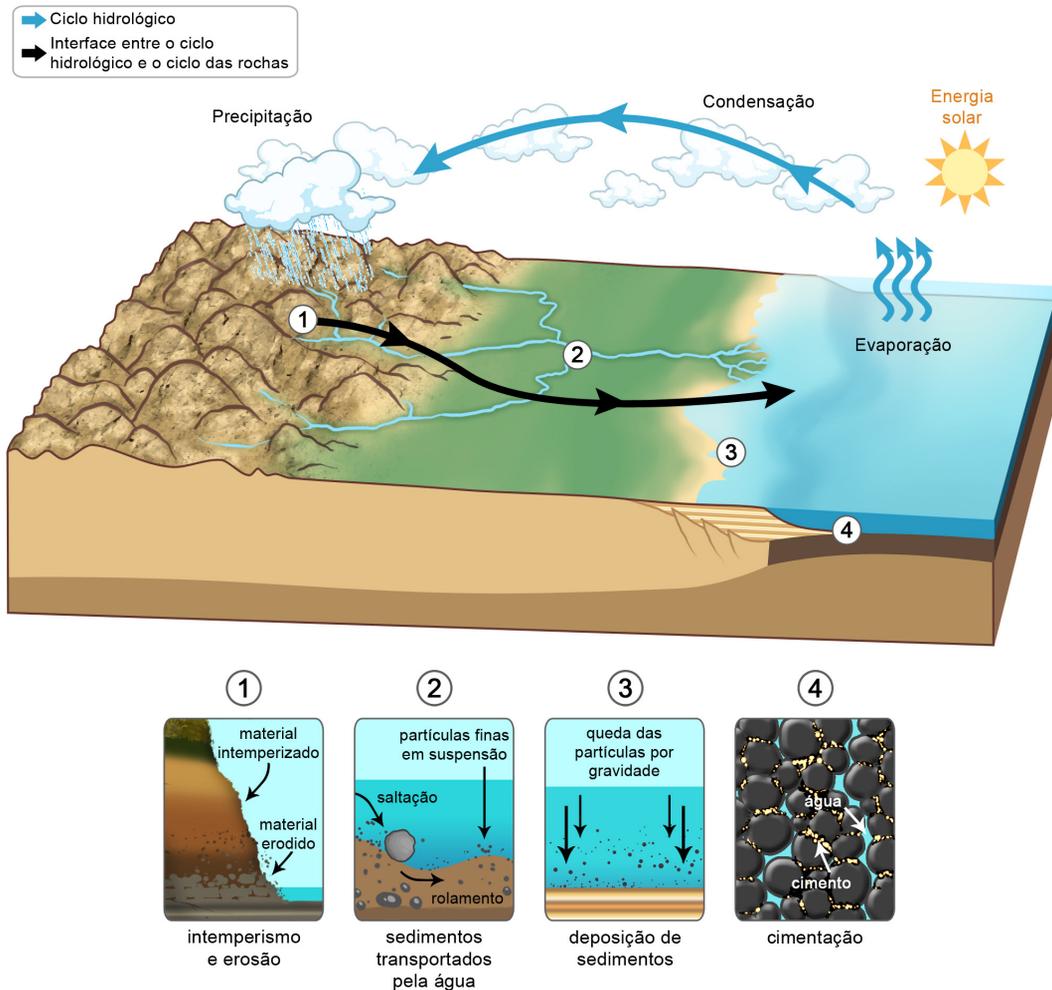
Em média, as águas subterrâneas se movimentam em velocidades da ordem de alguns centímetros por dia, ou seja, alguns metros por ano ou um quilômetro a cada cem anos. Isto indica que a água que bebemos, desde que seja proveniente de alguma fonte de água subterrânea, pode ter-se movimentado no subsolo durante dezenas, centenas ou até milhares de anos até ser captada para nosso consumo. Esse longo tempo de permanência no subsolo significa que a renovação da água subterrânea é muito lenta, o que demonstra a fragilidade do equilíbrio entre a recarga (entrada de água) e a descarga (saída de água), equilíbrio esse que pode ser alterado pela exploração descontrolada da água subterrânea. Além disso, o longo tempo de permanência da água no reservatório subterrâneo promove uma maior interação água-rocha. A água reage quimicamente com os materiais, o que pode afetar sua composição química, tornando a água mais rica em determinados íons dissolvidos.

Muitas pessoas imaginam que a água subterrânea forma verdadeiros rios e lagos subterrâneos, pois alguns livros didáticos trazem esse tipo de representação. Esse conceito só é verdadeiro em regiões onde há ocorrência de rochas calcárias, uma vez que elas são facilmente dissolvidas pela água, e isso promove o aumento das fraturas das rochas, formando galerias, grutas, cavidades subterrâneas e dolinas (depressões formadas por abatimentos subterrâneos, eventualmente com lagos). Essas belas feições, típicas de regiões calcárias, representam o relevo característico cárstico, que não é, em absoluto, regra geral na superfície da Terra, mas sim uma exceção.

## 6.6 O ciclo da água e o ciclo das rochas

O ciclo hidrológico tem um papel importante no ciclo das rochas. A água (líquida, principalmente, e também a sólida) é o principal agente de intemperismo (Tópico “Intemperismo e Pedogênese”) das rochas da crosta terrestre e de erosão dos produtos de intemperismo (Tópico “Sedimentos e Rochas Sedimentares”) e contribui, dessa forma, para a reciclagem de numerosas substâncias químicas. Pela ação da gravidade e da água que escoar na superfície, o material oriundo da decomposição das rochas é constantemente transportado e depositado. Esses

depósitos de sedimentos tornam-se, com o tempo, rochas sedimentares. Essas transformações ocorridas nas rochas e nos materiais delas provenientes não existiriam sem o movimento da água, ou seja, o ciclo hidrológico (**Figura 6.8**).



**Figura 6.8:** Interação entre o ciclo da água e o ciclo das rochas.

Pode-se dizer que o ciclo da água é caracterizado pela interdependência de seus componentes, por sua estabilidade e seu equilíbrio dinâmico. Se um processo é perturbado, todos os outros (ciclo do nitrogênio, ciclo do fósforo etc.) são afetados. Em particular, o ciclo hidrológico pode ser influenciado em graus diversos pela atividade humana. Com efeito, o ser humano

age diretamente sobre o processo de transformação da água de várias formas: a construção de reservatórios, o transporte de água para indústria, a captação de águas freáticas para irrigação, drenagem, correção de cursos d'água, utilização agrícola dos solos, urbanização, etc. são exemplos da intervenção humana com efeitos evidentes no ciclo da água. Como exemplos, pode-se mencionar a extração em grande escala de água subterrânea no estado de São Paulo, por meio de poços e cacimbas, que abaixou o nível médio da água subterrânea e, em alguns casos, promoveu a perda de sustentação de certas áreas, causando o colapso dos grãos do solo, abaixando o relevo e destruindo construções (como em 1986, em Caieiras).

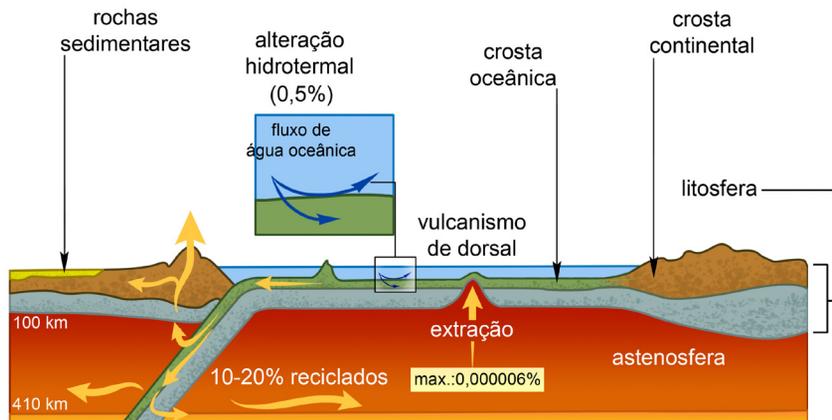
## 6.7 A água e Tectônica de Placas

A água também está presente no interior da crosta e do manto, na estrutura dos minerais constituintes das rochas, e é de grande importância do ponto de vista da evolução dinâmica do planeta. A presença de água diminui a temperatura de fusão dos minerais e, consequentemente, das rochas, e sua deformação e viscosidade podem ser modificadas também. Assim, nas zonas de subducção (Tópico “Tectônica Global”), os materiais da litosfera oceânica sofrem desidratação pela pressão crescente; esta água, junto com a água expulsa da porosidade dos sedimentos levados pela placa, facilita a fusão parcial, quando forma-se magma ácido, que sobe por fissuras em direção à superfície; estes volumes podem ser presos dentro da litosfera, formando câmaras magmáticas, cuja consolidação dará origem aos corpos ígneos plutônicos; por outro lado, se o magma conseguir irromper à superfície, dará origem a um evento ígneo vulcânico (Tópico “Rochas Ígneas”).

A continuidade da subducção também introduz água no manto, contribuindo para a formação de minerais hidratados.

Além destas interações entra a dinâmica interna e a dinâmica externa da Terra por meio da água, deve-se lembrar que a água inserida no manto e na litosfera pode ser expelida novamente ao ambiente externo por meio do vulcanismo, das fumarolas, do hidrotermalismo nas cadeias dorsais oceânicas e demais eventos similares; nestes casos, a água expelida é chamada de água juvenil, pois foi renovada ao passar pela dinâmica interna. Esta água aquecida é um potente agente de intemperismo químico das rochas do assoalho oceânico contribuindo para a modificação da composição química das águas oceânicas.

Existe, portanto, uma interação entre o ciclo interno e o ciclo externo da água: nas zonas de subducção e nas zonas de alteração na região das dorsais meso-oceânicas. (**Figura 6.9**). Os volumes envolvidos são consideráveis, alcançando cerca de 330 milhões de km<sup>3</sup> de água nas fraturas, fissuras e poros da cobertura sedimentar; na litosfera e astenosfera, o volume estimado é de 400 milhões de km<sup>3</sup>.



**Figura 6.9:** O ciclo interno da água e a interação hidrosfera-litosfera em zona de subducção e nas dorsais meso-oceânicas.

## Referências Bibliográficas

- PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., JORDAN, T.H. **Para entender a Terra**. 4. ed. Tradução R. Menegat (coord.) [et al]. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. de; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: IBEP Editora Nacional-Conrad, 2009.
- TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K.; TASA D. **Earth** - An introduction to physical geology. 10. ed., New Jersey: Prentice Hall, 2010. 724p.