

INTRODUÇÃO

O material desta disciplina foi produzido pelo Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) para o projeto Licenciatura em Ciências (USP/Univesp).

Créditos

Coordenação de Produção: Beatriz Borges Casaro.

Revisão de Texto: Marcia Azevedo Coelho, Marina Keiko Tokumaru e Paulo Barroso.

Design Instrucional: Fernanda Franco, Juliana Moraes Marques Giordano, Maria Angélica S. Barrios (estagiária), Melissa Gabarrone, Michelle Carvalho e Vani Kenski.

Projeto Gráfico e Diagramação: Daniella de Romero Pecora, Leandro de Oliveira, Priscila Pesce Lopes de Oliveira e Rafael de Queiroz Oliveira.

Ilustração: Alexandre Rocha, Aline Antunes, Benson Chin, Camila Torrano, Celso Roberto Lourenço, João Costa, Lidia Yoshino, Mauricio Rheinlander Klein e Thiago A. M. S.



Introdução

A meteorologia é a ciência que estuda os processos físicos, químicos e dinâmicos da atmosfera e as interações com os sistemas litosfera, hidrosfera, criosfera e biosfera. Está inserida no contexto das ciências ambientais e é a radiação solar que incide sobre a Terra que fornece a energia para as interações entre os sistemas.

Em um determinado momento e local, o estado da atmosfera é definido como **tempo atmosférico**, ou **tempo**, como iremos chamar aqui. É descrito principalmente pelas seguintes variáveis: temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade, nebulosidade, precipitação, visibilidade e vento. Observando o tempo num determinado intervalo de tempo cronológico, por exemplo, alguns meses ou anos, podemos obter o “tempo médio” ou **clima** de uma determinada região.

O termo meteorologia foi utilizado pelo filósofo grego Aristóteles que, por volta de 350 a.C., em sua obra intitulada *Meteorologica*, descreveu os primeiros conhecimentos sobre o tempo e clima da época, que foram expostos de maneira filosófica e especulativa. Naquela época, todas as observações ocorridas na atmosfera eram chamadas de meteoros, o que explica o termo “meteorologia”. Apenas a partir do século XV quando surgiram os primeiros instrumentos meteorológicos é que a meteorologia teve caráter de ciência natural. Desde então, o desenvolvimento de instrumentos de observação de dados meteorológicos, transmissão, análise e previsão vem avançando.

Um dos maiores avanços ocorreu durante a década de 1950 com o surgimento dos computadores, o que tornou viável a realização de previsões de tempo. Assim, um grande número de equações que descrevem o comportamento da atmosfera puderam ser solucionadas em um curto espaço de tempo. Na década seguinte, em 1960, com o lançamento do primeiro satélite meteorológico, foi possível dar início ao registro e transmissão de informações meteorológicas em todo o globo. Nos últimos 40 anos vêm sendo aprimorados os modelos climáticos.

Os constantes avanços neste tipo de modelagem, bem como do poder computacional, têm possibilitado a realização de simulações mais detalhadas de processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera. Previsões em longo prazo dos efeitos impostos a mudanças nas interações internas que ocorrem no meio ambiente também se tornaram possíveis.

A aplicação da meteorologia é extensa, pois as condições atmosféricas influenciam as atividades humanas, por exemplo, tipo de moradia, vestuário, agricultura, recursos hídricos, estratégias militares, construção civil, saúde, cultura, entretenimento, sensações pessoais, dentre outras.

Esse material tem como objetivo apresentar os conceitos relativos aos fenômenos meteorológicos que ocorrem nas camadas mais baixas da atmosfera, por serem relativamente mais exploradas, possibilitando um maior entendimento para os estudos de tempo e clima. A composição e estrutura da atmosfera estão descritas no texto **Atmosfera terrestre**. No texto **Radiação solar, terrestre e balanço de energia global**, abordaremos os vários processos que ocorrem com a radiação solar no momento em que ela interage com a atmosfera e com a superfície terrestre, bem como o balanço de energia na Terra. As variáveis meteorológicas serão apresentadas da seguinte forma: temperatura, no texto **Temperatura**; umidade, no texto **Umidade do ar**; nebulosidade, visibilidade e precipitação, no texto **Estabilidade atmosférica, nuvens e precipitação** e pressão atmosférica e ventos, no texto **Pressão atmosférica e ventos**. A descrição de como é feita a observação da atmosfera é dada no texto **Dados atmosféricos**. O padrão global de ventos é apresentado no texto **Circulação geral da atmosfera**. Os modelos conceituais adotados para explicar os sistemas atmosféricos relacionados às mudanças no tempo são mostrados no texto **Sistemas atmosféricos**. O texto **Poluição atmosférica** abordará a origem da atmosférica. A classificação dos climas no globo é mostrado no texto **Classificação Climática**. Já o texto **Previsão do Tempo e Clima** apresenta os métodos utilizados nessas previsões. Por fim, o texto **Mudanças Climáticas** discorre, numa escala mais global, sobre as mudanças climáticas.

Rita Yuri Ynoue, Michelle S. Reboita, Nathalie T. Boiaski,
Tércio Ambrizzi e Gylrene A. M. da Silva

ATMOSFERA TERRESTRE

1

Rita Yuri Ynoue
Michelle S. Reboita
Nathalie T. Boiaski
Tércio Ambrizzi
Gyrlene A. M. da Silva

- 1.1** Introdução
 - 1.2** Composição
 - 1.3** Evolução
 - 1.4** Estrutura vertical da atmosfera
- Referências

1.1 Introdução

Nesta primeira aula, veremos que a atmosfera terrestre é formada por uma camada de gases e que estes variaram ao longo da história do nosso planeta. Veremos também que a concentração dos gases na atmosfera varia com a altura, assim como a temperatura do ar, o que caracteriza a estrutura vertical da atmosfera. Também será mostrada a camada da atmosfera mais importante para o estudo do tempo e clima do nosso planeta.

1.2 Composição

A **Tabela 1.1** ilustra as concentrações médias de gases numa atmosfera seca, ou seja, na ausência do vapor d'água e sob condições normais de temperatura e pressão encontradas ao Nível Médio do Mar (NMM). O gás nitrogênio (N_2) ocupa aproximadamente 78% do volume total da atmosfera seca e o gás oxigênio (O_2), aproximadamente 21%. Essas quantidades de N_2 e O_2 na atmosfera são relativamente constantes próximo à superfície da Terra, sendo denominados de gases permanentes, assim como os gases argônio (Ar), neônio (Ne), hélio (He), hidrogênio (H_2) e Xenônio (Xe). As concentrações de alguns gases que compõem a atmosfera não são constantes ao longo do tempo ou espaço. Gases como o vapor d'água (H_2O) e o ozônio (O_3) podem variar significativamente de lugar para lugar ou de um dia para outro, sendo, portanto, denominados de gases variáveis. Como esses gases têm concentrações muito pequenas, são denominados também de gases-traço.

Tabela 1.1: Composição da atmosfera seca próxima à superfície da Terra. / Fonte: Modificada de AYOADE, 1991.

Gás	Volume % (ar seco)
Nitrogênio (N_2)	78,08
Oxigênio (O_2)	20,94
Argônio (Ar)	0,93
Dióxido de carbono (CO_2)	0,03 (variável)
Neônio (Ne)	0,0018
Hélio (He)	0,0005
Ozônio (O_3)	0,00006
Hidrogênio (H_2)	0,00005
Criptônio (Kr)	Indícios
Xenônio (Xe)	Indícios
Metano (Me)	Indícios

Apesar de não ser considerado constituinte da atmosfera seca, o vapor d'água é um gás de extrema importância e está relacionado com a temperatura do ar e a disponibilidade de água na superfície terrestre, portanto, possui composição variável na atmosfera. Em regiões tropicais como na floresta amazônica pode chegar a 4% do volume total dos atmosféricos, mas nas regiões frias como na Antártica fica abaixo de 1%. Quando o vapor d'água passa para o estado líquido, num processo denominado condensação, formam-se pequenas gotas de água. Quando o vapor d'água passa para o estado sólido (sem passar pela fase líquida), num processo denominado ressublimação, formam-se pequenos cristais de gelo. Tanto as gotas de água quanto os cristais de gelo são visíveis, possibilitando a observação de nuvens e nevoeiros. A condensação e a deposição são processos importantes para a conversão de energia na atmosfera, liberando calor para o ambiente. Já os processos de **evaporação** e **sublimação** por sua vez, absorvem energia do ambiente. O vapor d'água também é um importante gás de efeito estufa, pois absorve parte da radiação emitida pela Terra.

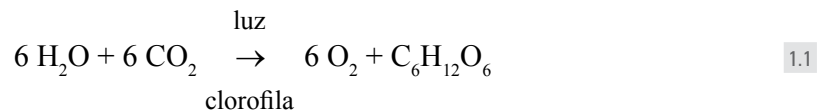
O dióxido de carbono (CO_2) é um componente natural da atmosfera. Atualmente, sua concentração é de aproximadamente 0,03%, entretanto, ao longo da história da Terra, sua concentração apresentou variações. É um importante gás de efeito estufa e, assim como o vapor d'água, absorve parte da radiação emitida pela Terra. Outros gases-traço considerados gases de efeito estufa são o metano (CH_4), o ozônio (O_3), o óxido nitroso (N_2O) e os clorofluorcarbonos (CFCs).

O ozônio é um gás que pode ser encontrado próximo à superfície terrestre, em grandes concentrações em cidades poluídas, por vezes atingindo 150 ppb (partes por bilhão, ou seja, 0,15 ppm), como na região metropolitana de São Paulo. Nesse caso, trata-se de um poluente atmosférico, que irrita os olhos e a garganta, e é prejudicial à vegetação. Entretanto, as maiores concentrações de ozônio são encontradas na alta atmosfera, entre 20 km e 50 km de altura, aproximadamente. A camada de ozônio encontra-se, portanto, na estratosfera. Essa camada filtra a radiação solar, impedindo que a radiação ultravioleta nociva aos seres vivos atinja a superfície da Terra. A camada de ozônio será estudada em mais detalhes nas próximas aulas (**Radiação solar, terrestre e balanço de energia global e Poluição Atmosférica**).

Além dos gases, a atmosfera também contém partículas, como, por exemplo, poeira suspensa por erupções vulcânicas, pelo vento, ou pelos veículos. Partículas de sal provenientes do oceano, microrganismos, como bactérias ou fungos, pólen, fumaça emitida por queimadas ou pelos escapamentos de automóveis. Estas pequenas partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera são denominadas de **aerossóis** e desempenham papel importante no clima terrestre, podendo absorver ou refletir a radiação solar ou agindo como núcleos de condensação para formação de gotas de nuvens.

1.3 Evolução

A evolução da atmosfera da Terra está intimamente ligada à evolução deste planeta. Inicialmente, há indícios de que a atmosfera terrestre era composta basicamente por hidrogênio e hélio, os dois elementos mais abundantes no universo, além de metano e amônia. Estes elementos foram varridos pelo vento solar logo no início da formação da Terra. A atmosfera foi se modificando à medida que a estrutura da Terra foi evoluindo. Os gases emitidos pelos vulcões foram se acumulando na atmosfera, de tal forma que o nitrogênio, vapor d'água e dióxido de carbono fossem os principais componentes da atmosfera. À medida que o planeta foi esfriando, parte do vapor d'água conseguiu condensar-se, formando nuvens e chuva, gerando os rios, lagos e oceanos. A chuva ao longo do tempo não só contribuiu para redução da quantidade de vapor na atmosfera, como também “lavou” parte do dióxido de carbono, visto que este se dissolve na água, tendo sido armazenado em grandes quantidades nos oceanos. Com a redução das concentrações de vapor d'água e dióxido de carbono, a atmosfera foi sendo cada vez mais enriquecida pelo nitrogênio, que é um gás pouco reativo. Com o início da vida na Terra, começou o processo de fotossíntese, que pode ser representado de maneira simplificada pela equação abaixo:



O processo consiste na utilização de energia fotoquímica (luz) para reduzir o CO_2 a um carboidrato ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) na presença de água, liberando oxigênio (O_2). Inicialmente, parte do oxigênio liberado no processo de fotossíntese foi utilizada na oxidação do ferro dissolvido nas águas dos oceanos. Quando começou a ser liberado para a atmosfera, foi possível a formação de uma camada de ozônio e a vida pôde sair dos oceanos para povoar os continentes. O processo de fotossíntese, portanto, resultou em acúmulo de oxigênio e redução de dióxido de carbono na atmosfera. A composição atual da atmosfera, em termos de gases permanentes, foi atingida há algumas centenas de milhares de anos; com o oxigênio e nitrogênio sendo continuamente reciclados entre a atmosfera, biosfera, hidrosfera, criosfera e litosfera. A evolução da humanidade, no entanto, tem modificado a composição dos gases-traço na atmosfera e este assunto será abordado nas aulas **Poluição atmosférica** e **Mudanças climáticas**.

1.4 Estrutura vertical da atmosfera

Até o momento, foi apresentada uma discussão sobre a composição da atmosfera mais próxima à superfície da Terra. Entretanto, um perfil vertical da atmosfera revela que esta apresenta uma estrutura **estratiforme**. Os critérios para a divisão das camadas podem ser diversos: variação da temperatura, composição química dos gases ou por suas propriedades elétricas. Entretanto, antes de analisar esses critérios, é preciso entender como a pressão e a densidade do ar variam com a altura. Estas duas variáveis serão vistas com mais detalhes no texto **Pressão Atmosférica e Ventos**, entretanto, apresentaremos alguns conceitos básicos.

A atmosfera está presa ao planeta devido à sua força de gravidade ou força peso, definida da seguinte forma:

$$\text{Peso} = \text{massa} \times \text{aceleração da gravidade} \quad 1.2$$

A densidade do ar é determinada pela quantidade de massa num determinado volume, ou seja:

$$\text{Densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad 1.3$$

Como as moléculas de ar estão mais comprimidas próximo à superfície, ficando cada vez mais espaçadas à medida que nos afastamos para o espaço, as maiores densidades do ar estão próximo à superfície, diminuindo rapidamente com a altura nos primeiros quilômetros e, depois, diminuindo mais lentamente. A pressão é definida como a força aplicada numa determinada área, ou seja:

$$\text{Pressão} = \frac{\text{força}}{\text{área}} \quad 1.4$$

A **pressão atmosférica** é a força exercida pelo peso do ar sobre uma determinada área (**Figura 1.1**). Em meteorologia é comum usar as unidades **milibar** (mb) ou hectopascal (hPa), definidas como a força de 100.000 N exercida em uma superfície de 1 m². O valor padrão da pressão atmosférica ao NMM é de 1013,25 mb = 1013,25 hPa.

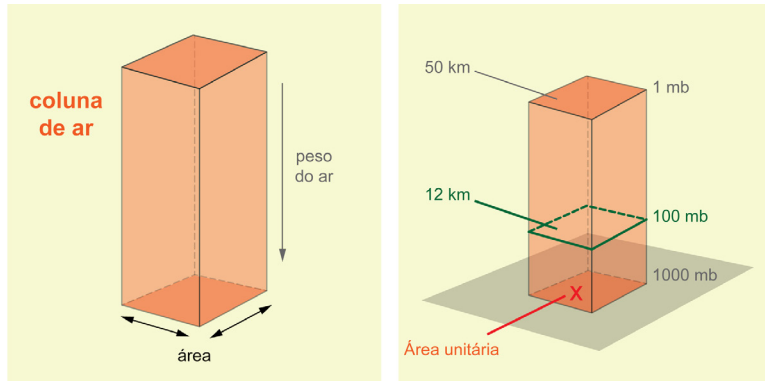


Figura 1.1: Definição de pressão atmosférica e sua variação com a altura.

Como o número de moléculas diminui com a altura, o mesmo ocorre com o peso exercido por estas moléculas numa determinada coluna. Assim, a pressão atmosférica, bem como a densidade, sempre diminuem com a altura, decrescendo rapidamente nos primeiros quilômetros para depois diminuir mais lentamente. A **Figura 1.2** ilustra como ocorre a variação da densidade e da pressão atmosférica com a altitude; ambas diminuem com a altura.

O perfil vertical da temperatura do ar, no entanto, é um pouco mais complexo. Observando a **Figura 1.3**, podemos verificar que a temperatura ora diminui ora aumenta com a altura. Baseada nesta variação pode-se dividir a atmosfera em quatro camadas na vertical.

A primeira camada, mais próxima à superfície, é denominada **troposfera**, do grego *tropein*, que significa mistura. Nesta

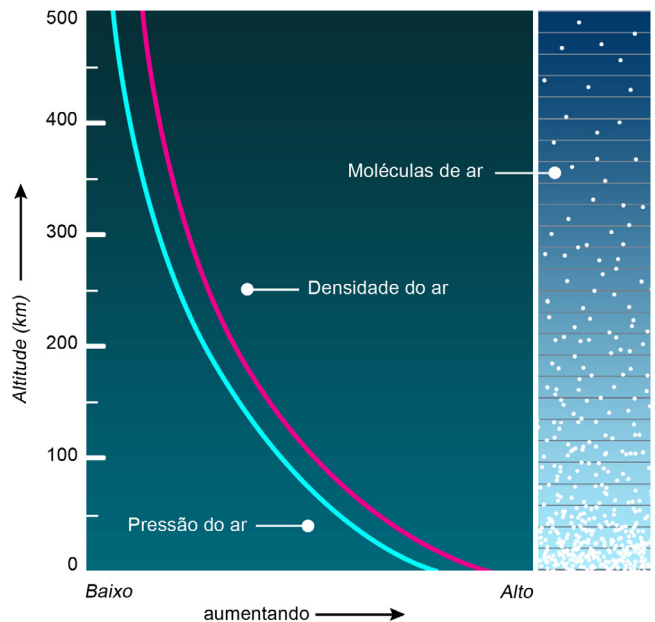
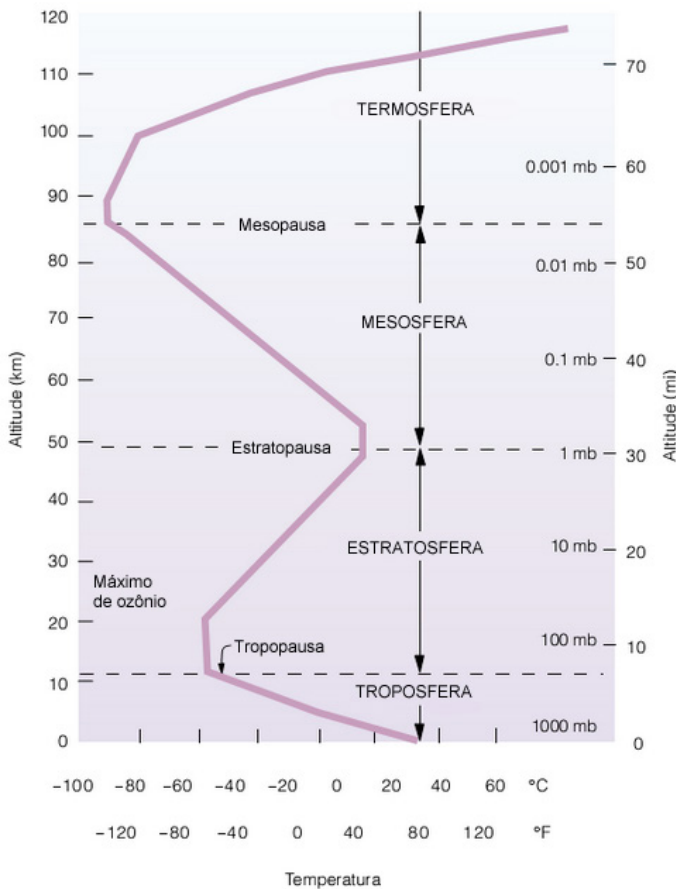


Figura 1.2: Variação da densidade e da pressão atmosférica com a altitude. / Fonte: Modificado de AHRENS, 2000.

camada, a temperatura normalmente decresce com a altura a uma taxa de aproximadamente $6,5\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$. Este decréscimo de temperatura ocorre até aproximadamente 12 km de altura, quando se atinge o limite da troposfera, chegando à **tropopausa**. É nesta primeira camada, troposfera, que os meteorologistas concentram a maior parte de seus estudos. Nela a convecção e mistura vertical são mais pronunciadas devido ao aquecimento na superfície, o que contribui para a instabilidade do ar e, conseqüentemente, para a formação de fenômenos atmosféricos, como nuvens, chuvas, ventos, furacões e tornados. Além disso, é na troposfera que se concentra a biosfera. A tropopausa é a região limite entre a troposfera e a camada seguinte, a **estratosfera**. Sua altura não é constante, pois depende da temperatura do ar e da latitude. Quanto maior a convecção térmica na troposfera maior será o volume misturado de ar nesta camada e, conseqüentemente, haverá uma tendência de que a tropopausa seja “empurrada” para cima, ficando mais elevada. Ou seja, a tropopausa é mais elevada na região equatorial (~16 km) devido a maior disponibilidade de radiação solar e misturas (movimentos) verticais observados na troposfera. Já nos polos a tropopausa se encontra mais baixa, a aproximadamente 8 km acima do solo.



Na estratosfera, a temperatura inicialmente não varia com a altura, é a chamada zona isotérmica. Acima dos 20 km, no entanto, começa a aumentar, produzindo uma inversão térmica até os 50 km, quando se atinge a **estratopausa** caracterizada por outra zona isotérmica. A inversão térmica na estratosfera ocorre devido a absorção de radiação ultravioleta proveniente do Sol pelo ozônio, resultando em aumento da temperatura. Como se trata de uma região estável, há uma tendência de inibição de movimentos verticais. É por esse motivo que os aviões costumam viajar por esta camada.

Figura 1.3: Camadas da atmosfera definidas de acordo com a variação da temperatura com a altura. A linha vermelha indica a variação da temperatura média em cada camada.

Acima da estratopausa encontra-se a mesosfera, onde a temperatura volta a cair com a altura. O ar é bastante rarefeito e a pressão atmosférica é menor que 1 hPa. A queda de temperatura ocorre até a **mesopausa**, a aproximadamente 80 km de altura, quando a temperatura atinge seu menor valor, por volta de -80 °C.

Acima da mesopausa, a temperatura torna a crescer com a altura, definindo a **termosfera**. A temperatura cresce com a altura, pois mesmo com poucas moléculas de oxigênio há absorção de radiação solar e favorecem o aquecimento do ar. A densidade da atmosfera é muito pequena, dificultando o posicionamento de um limite superior para a atmosfera. Pode-se definir um topo da termosfera em aproximadamente 500 km de altura, onde as moléculas podem se deslocar por vários quilômetros antes de colidirem com outra molécula. Nesta região, denominada **exosfera**, as moléculas podem escapar da atração gravitacional da Terra, representando o limite superior da atmosfera.

Outros critérios podem ser utilizados para se definir camadas na atmosfera. Um deles é com relação à homogeneidade da composição química (**Figura 1.4**). Abaixo da termosfera, a composição do ar é relativamente uniforme: 78% de N₂ e 21% de O₂. A esta região homogênea dá-se o nome de **homosfera**. Na termosfera, no entanto, as colisões entre átomos e moléculas são pouco frequentes, levando a formação de camadas, com os elementos mais pesados (N e O) se depositando em sua base e os elementos mais leves (He e H) fluando no topo. Esta região é denominada **heterosfera**.

A respeito da classificação da atmosfera através das propriedades elétricas dos gases temos a **ionosfera**. Esta camada possui grande quantidade de íons e elétrons livres.

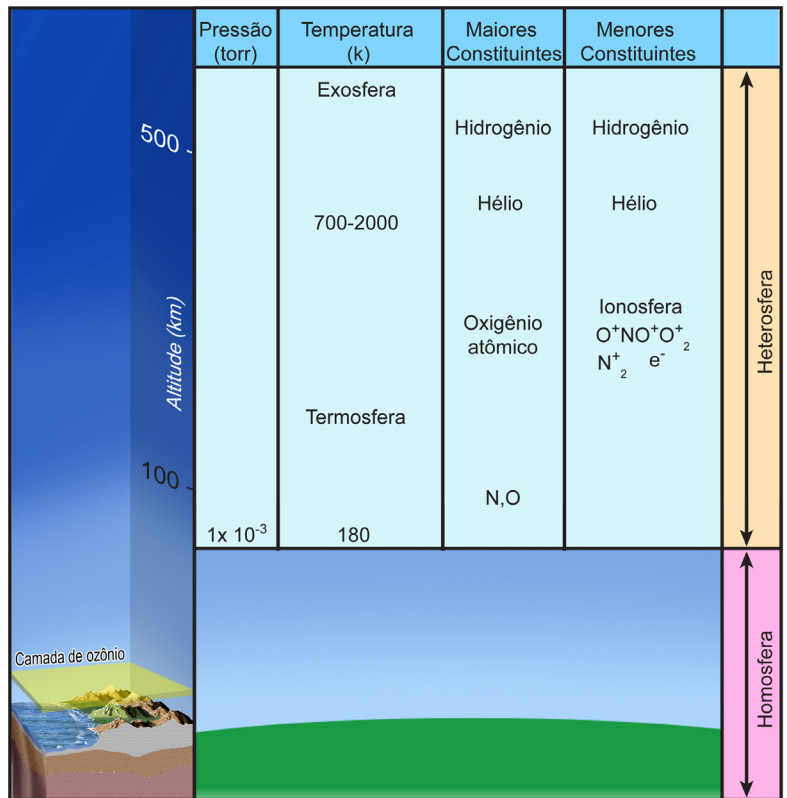


Figura 1.4: Camadas da atmosfera baseadas na composição e propriedades elétricas. / Fonte: AHRENS, 2000.

Normalmente, seu limite inferior se encontra a 60 km de altura, estendendo-se até o topo da atmosfera. Assim, a ionosfera se encontra basicamente na termosfera e tem um papel importante na propagação de ondas de rádio AM.



Para mais detalhes sobre a Ionosfera consulte o recurso Introdução à Ionosfera disponível em www.sarmiento.eng.br/Ionosfera.htm.

Pelo que vimos, a atmosfera terrestre possui diferentes características, desde a superfície até centenas de quilômetros acima. Entretanto, a troposfera e a estratosfera são as camadas mais importantes para os estudos de tempo e clima.

Referências

- AHRENS, C. D. **Meteorology today**: an introduction to weather, climate, and the environment. 9. ed. Belmont: Brooks/Cole, 2000.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 3. ed. São Paulo: Bertrand do Brasil, 1991. 332 p.

Glossário

Condensação: Mudança de fase da água do estado gasoso para líquido.

Densidade do ar: Massa/Volume; isto é, quantidade de massa num determinado volume.

Deposição: Mudança de fase da água do estado gasoso para sólido.

Estratiforme: Dividida em várias camadas.

Evaporação: Mudança de fase da água de estado líquido para gasoso (vapor).

Peso: Massa × Aceleração da gravidade.

Pressão: Força/Área; isto é, força aplicada por unidade de área.

Sublimação: Mudança de fase da água de estado sólido para gasoso.