

A ATMOSFERA TERRESTRE: COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA

Anderson Alberto C. Dias

Fundação José Carvalho; Rod BA 093 n^os/n km 42, 48120-000, Pojuca, BA, Brasil

A. V. Andrade-Neto e M. S. R. Miltão

*Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana; Avenida Transnordestina,
s/n, Novo Horizonte, Campus Universitário,
44036-900, Feira de Santana, BA, Brasil*

Neste artigo pretendemos descrever de forma introdutória alguns aspectos importantes da atmosfera terrestre. Em particular descreveremos a sua composição, os principais gases e radiação que a formam, bem como a sua estrutura, i.e., a sua classificação em camadas específicas. Faremos também uma descrição do efeito estufa, fenômeno natural fundamental para a manutenção da vida no nosso planeta.

I. INTRODUÇÃO

No estudo da origem, evolução e estrutura, bem como do tempo e do clima da atmosfera, a Física Aplicada à Atmosfera analisa as propriedades e características dos fenômenos que ocorrem nas camadas atmosféricas, utilizando as Teorias e Leis Gerais do Campo do Saber da Física, visando a descrição e compreensão dos eventos atmosféricos.

Em linhas gerais podemos definir os fenômenos atmosféricos como as manifestações da natureza que ocorrem na atmosfera de um planeta e que estão associadas com a origem, evolução e estrutura da matéria e radiação lá existente. Entre os processos físicos que propiciam a ocorrência desses fenômenos pode-se destacar: transferência de massa e energia, movimento do ar, variações de calor e umidade da atmosfera, força de Coriolis, descargas elétricas, variações magnéticas, manifestações radiativas e ionizantes, dentre outros.

Existe uma classe muito grande de fenômenos atmosféricos e entre estes fenômenos mais conhecidos destacam-se:

- Aerossóis;

- Hidrometeoros (chuva, formação de nuvens, granizo, neve, gota de água);
- Frente-frias e Frente-quentes;
- Ciclone tropical (furacão);
- Ciclone extratropical;
- Ciclone subtropical;
- Tornado;
- Eletrometeoros (raio, trovão).

Os fenômenos mais energéticos, que comumente ocorrem na atmosfera são os ciclones, furações e os tornados. Ciclones, tornados e furações, são diferenciados, principalmente, pela energia associada a cada fenômeno, pela velocidade dos seus ventos, por sua duração e local onde se formam. Os tornados e os ciclones são responsáveis por grandes prejuízos todos os anos, principalmente nos Estados Unidos, devido ao seu grande poder de destruição, além de causar inúmeras mortes. Apesar de acontecer com uma frequência bem menor que nos EUA, no Brasil há também ocorrência de tornados, principalmente na região Sul do país, podendo acontecer também na região sudeste.

As investigações relacionadas com tais fenômenos são realizadas principalmente pelas áreas da Meteorologia, Climatologia, Eletrodinâmica Atmosférica, Estrutura da Atmosfera, Radiação Atmosférica, Física das Nuvens e Dinâmica Atmosférica, sub-divisões da Física Aplicada à Atmosfera.

A Física Aplicada à Atmosfera, dessa forma, desenvolve a ação supradisciplinar da multidisciplinaridade cruzada, de maneira que, em tal sub-área, o Campo do Saber da Física é utilizado pelas disciplinas relativas a atmosfera (Geografia, Geofísica, Física do Oceano), através da transferência de métodos comuns de um saber para o outro, onde apenas estas disciplinas são alteradas em seus conteúdos e não a Física, com o fito de descrever os fenômenos atmosféricos.

II. ATMOSFERA TERRESTRE

Chama-se atmosfera terrestre a camada composta por radiação, gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra e se estende por centenas de quilômetros. Os limites inferiores da atmosfera são, obviamente, as superfícies da crosta terrestre e dos oceanos. Contudo, os seus limites superiores não são bem definidos porque, com o aumento da altitude, a atmosfera vai se tornando cada vez mais tênue, em relação ao seu conteúdo de matéria, até que ela se confunda com o meio interplanetário. Para se ter uma idéia de quão rarefeita materialmente a atmosfera se torna à medida que se afasta da superfície terrestre, basta saber que 99% de sua massa está contida numa camada de $\approx 32km$. Para efeito de comparação lembremos que o raio da Terra é $\approx 6300km$.

O conhecimento da composição e comportamento da atmosfera possui uma grande e fundamental relevância para os processos biológicos já que processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera protegem os organismos da exposição à radiação ultravioleta em níveis perigosos, além de que a atmosfera contém os gases e os componentes da radiação necessários para os processos vitais na Terra como, por exemplo, respiração e fotossíntese.

A constituição da atmosfera de qualquer planeta depende do modo como o planeta e a sua atmosfera se originaram e, também, dos processos químicos e físicos que sempre ocorrem, acrescentando ou retirando certos gases da atmosfera, como erupções vulcânicas que expõem gases para a atmosfera, reações químicas que ocorrem no solo, escapamento de gases que ocorrem na parte superior da atmosfera para o espaço exterior, ou ainda da razão da incidência de radiação, como nas perturbações solares e, no caso da Terra, devido ao aparecimento da vida humana cuja presença introduziu grandes modificações na atmosfera.

A. Composição da atmosfera

Em nosso estudo da atmosfera terrestre vamos considerar que a mesma deve ser constituída de matéria e radiação. Estabelecemos tal constituição para a atmosfera terrestre, pois não só a matéria mas, também, a radiação presentes são conseqüências de vários aspectos específicos do planeta Terra: sua origem, sua dimensão, a densidade do planeta, sua posição relativa ao Sol (trajetória), seu campo elétrico, seu campo magnético; enfim, propriedades que a Terra tem e que a diferenciam de outros planetas que, por sua vez, inevitavelmente, terão constituições de matéria e radiação distintos para suas respectivas atmosferas.

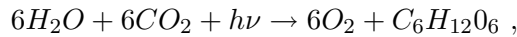
A composição da atmosfera, no que tange à matéria, pode variar bastante com a altitude. Outro fator complicador nessa determinação é que componentes materiais normalmente ausentes podem, eventualmente, ser introduzidos na atmosfera. Eles podem ter origem em processos naturais (erupções vulcânicas, por exemplo) ou ser resultantes de atividades humanas. Desse modo, quando falamos em composição material da atmosfera nos referimos ao ar limpo e seco. Nessas condições, os elementos mais importantes que compõem o ar terrestre estão listados na tabela 1. Vemos que o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%) ocupam quase 99% do volume do ar seco e limpo. Contudo, há gases que, apesar de sua participação relativa ser muito pequena, desempenham um papel fundamental. Assim, o dióxido de carbono, o ozônio e o vapor d'água, mesmo ocorrendo em pequenas concentrações são fundamentais em fenômenos meteorológicos ou mesmo para a manutenção da vida, conforme veremos neste trabalho.

Componente	Concentração por volume (porcentagem)
Nitrogênio (N_2)	78,09
Oxigênio (O_2)	20,95
Argônio (Ar)	0,93
Dióxido de Carbono (CO_2)	0,035
Neônio (N)	$1,8 \times 10^{-3}$
Hélio (He)	$5,54 \times 10^{-4}$
Metano (CH_4)	$1,7 \times 10^{-4}$
Criptônio (Kr)	$1,0 \times 10^{-4}$
Hidrogênio (H_2)	$5,0 \times 10^{-5}$
Xenônio (Xe)	$8,0 \times 10^{-6}$
Ozônio (O_3)	$1,0 \times 10^{-6}$

Tab. I: Composição do ar limpo e seco.

Apesar de sua participação percentual muito pequena, a presença de vapor de água, ozônio e gás carbônico tem um papel fundamental ao absorver a radiação infravermelha emitida pelo solo e, por esse fato, percebe-se que tais gases influenciam de forma contundente na temperatura da Terra controlando e ajudando a manter a média da mesma. Esse fenômeno, denominado efeito estufa, será discutido na Seção 4. Eles também são importantes em fenômenos meteorológicos, o que justifica uma discussão mais detalhada sobre esses gases.

DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2): Esse gás, também conhecido como gás carbônico, apesar de constituir apenas 0,03% da atmosfera é essencial à vida no planeta. Ele é um dos componentes para a realização da fotossíntese, que é o processo pelo qual as plantas transformam a energia solar em energia química e usam essa energia para, a partir da combinação de dióxido de carbono (CO_2), retirado do ar, e água (H_2O), retirada do solo, produzir açúcares e liberar gás oxigênio (O_2), através da reação:



onde $h\nu$ representa a energia da radiação luminosa.

Outra importância do gás carbônico é que ele é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, fenômeno natural imprescindível para a existência da vida terrestre, pois se o mesmo não ocorresse a temperatura média do planeta seria de $-18^\circ C$, ao invés dos atuais $+15^\circ C$. O problema é que o teor de gás carbônico na atmosfera terrestre vem aumentando em decorrência das atividades humanas, principalmente através da queima de combustíveis fósseis (gasolina, diesel, carvão mineral e vegetal) e de queimadas de vegetação. Esse crescimento sistemático é mostrado na figura 1, com dados obtidos no observatório climatológico de Mauna Loa, no Havaí. A flutuação anual observada na figura decorre da diferença de retirada do CO_2 pelas plantas, através da fotossíntese, no verão e no inverno. No verão há uma maior realização de fotossíntese, logo há uma diminuição no teor desse gás na atmosfera. Lembremos que os dados referem-se ao hemisfério norte.

VAPOR D'ÁGUA: Esse é um dos gases mais variáveis da atmosfera pois sua quantidade depende muito das condições climáticas locais, principalmente da disponibilidade de água. Assim, nos trópicos úmidos pode constituir quase 4% do volume da baixa atmosfera, enquanto sobre os desertos sua participação tem valores próximos de zero. Mesmo assim, ele desempenha um papel importante na preservação da vida no planeta, pois sem vapor d'água não há nuvens ou chuvas. Devido às diferenças de pressão e temperatura, o ar é forçado a subir. O vapor d'água nele presente se condensa ao encontrar temperaturas mais baixas, formando as nuvens e transferindo calor para a atmosfera superior. Dessa forma, ele alimenta as chuvas e tempestades, assim como outros fenômenos atmosféricos, como tufões e os furacões, cujas previsões são de extrema importância para a segurança do ser humano. Além disso, ele participa também do efeito estufa ao absorver o calor irradiado pela superfície terrestre, mantendo-a aquecida.

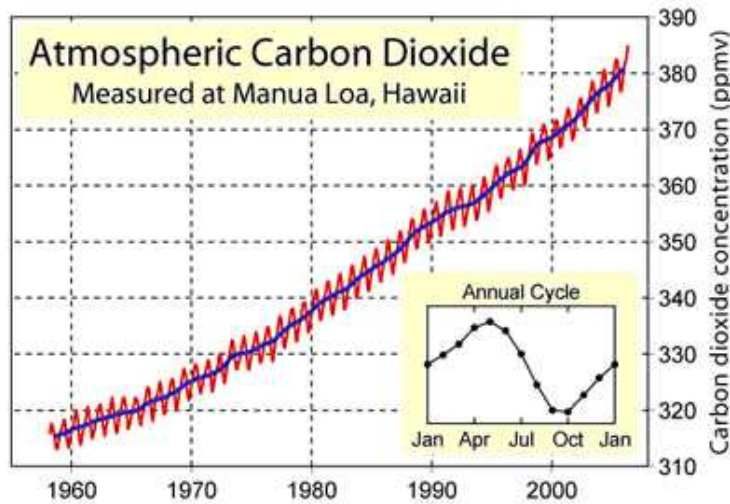
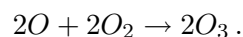
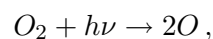


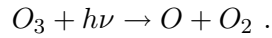
Fig. 1: Aumento da concentração de CO_2 na atmosfera. Dados do observatório climatológico de Mauna Loa, Hawaii. Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Keeling-Curve>

Sob as condições de temperatura existentes na superfície terrestre, o vapor de água condensa-se de maneira que a sua concentração no ar depende exclusivamente da temperatura e da proximidade com as massas líquidas, os oceanos e lagos por exemplo. Hipoteticamente, se a temperatura fosse superior que a atual, os oceanos se evaporariam numa quantidade maior e a composição da atmosfera seria severamente alterada pela adição de uma enorme quantidade de vapor de água e a atmosfera certamente não apresentaria as características vigentes.

OZÔNIO: O ozônio, forma triatômica do oxigênio O_3 , encontra-se em toda a atmosfera mas sua maior concentração está entre 16 e 30 km de altitude, no interior da estratosfera, na denominada camada de ozônio. Sua formação resulta de uma série de processos que envolvem a absorção de radiação solar, mais especificamente a radiação ultravioleta. Moléculas de oxigênio são dissociadas em átomos de oxigênio após absorverem essa radiação. Os átomos de oxigênio, resultantes dessa dissociação, podem se ligar a outras moléculas de oxigênio, dando origem a duas moléculas de ozônio de acordo com as reações:



De modo semelhante à sua formação, o ozônio também utiliza radiação ultravioleta decompondo-se em O_2 e O :



Assim, a radiação ultravioleta é absorvida tanto na formação quanto na destruição do ozônio na atmosfera. Como a radiação ultravioleta é prejudicial aos seres vivos, podendo provocar danos no ácido desoxirribonucléico (DNA), no qual estão contidas as informações genéticas, vemos que a camada de ozônio é essencial para a preservação da vida na Terra.

Por sua vez, a composição da atmosfera terrestre, no que tange à radiação, também depende da altitude. Na figura 2 estão expressas as componentes de radiação características da atmosfera terrestre, de acordo com a sua altura, originadas no Sol. Vemos que vários componentes da radiação atingem a superfície do planeta.

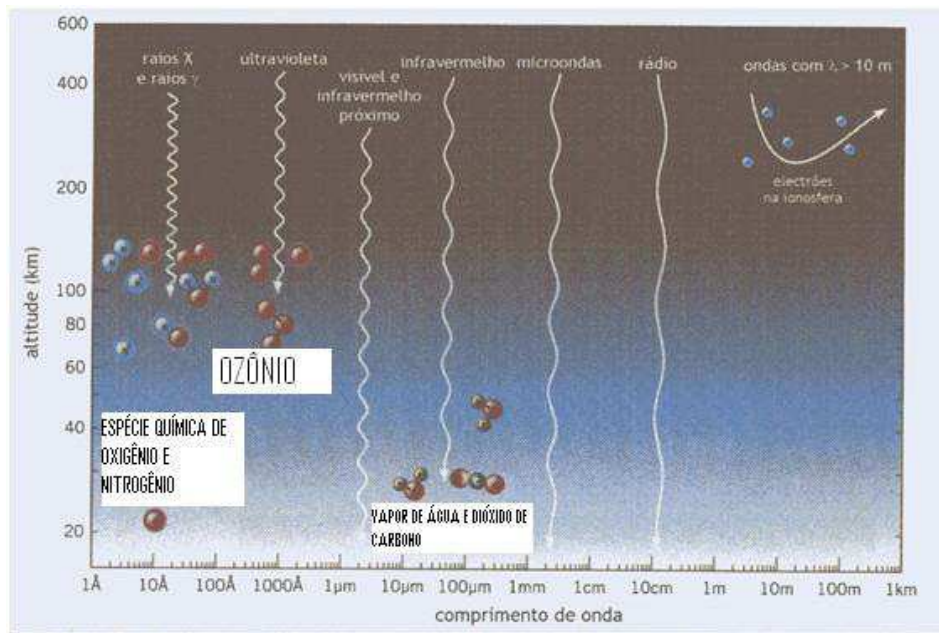


Fig. 2: Composição da radiação atmosférica terrestre advinda do Sol. Fonte: [http : //prof.s.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html](http://prof.s.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Atmosfera/Composio_Atmosfera.html)

Além disso, a interação da radiação com a matéria também é um fator importante para a própria caracterização dos constituintes de radiação da atmosfera terrestre, na medida em que temos processos físicos de absorção, reflexão e refração de tais componentes, conforme a figura 3. Ademais, temos elementos de radiação que se originam em processos naturais (como

em erupções vulcânicas que, devido à temperatura do magma expelido irradiam calor, por exemplo; ou oriundos de fenômenos eletrometeoros), bem como em atividades humanas.



Fig. 3: Esquema da radiação da Atmosfera terrestre. Fonte: http://www.coladaweb.com/biologia/efeitoestufa1_arquivos/image004.jpg

Para uma melhor compreensão da radiação eletromagnética presente na atmosfera, faremos em seguida uma breve descrição do espectro eletromagnético.

A radiação eletromagnética consiste em um campo eletromagnético oscilante que se propaga no espaço¹. Podemos classificar essa radiação de acordo com sua frequência (ou seu comprimento de onda). Em ordem decrescente de comprimento de onda temos a seguinte classificação: ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, raios X e radiação gama.

A quase totalidade da energia radiante que atinge a atmosfera tem como origem, direta ou indiretamente, o Sol, o qual emite radiação em praticamente todo o espectro, mas em quantidades bastante diferentes para diferentes comprimentos de onda. Assim 44% de toda energia emitida pelo Sol se concentra na faixa visível (entre 400 e 700nm). O restante é dividido da seguinte forma: a radiação ultravioleta contribui com 7%, enquanto o infravermelho próximo com 37% e o infravermelho médio com 11%. Menos de 1% da radiação emitida pelo

¹ Para uma discussão elementar sobre campo eletromagnético ver referência 2.

Sol está localizada na região acima do infravermelho (microondas e ondas de rádio) e abaixo do ultravioleta (raios X e raios gama). Desse modo, discutiremos brevemente as radiações mais importantes que participam da composição da atmosfera terrestre.

LUZ VISÍVEL: Chamamos de luz visível a faixa do espectro eletromagnético com comprimentos de onda no intervalo entre 400 e $700nm$ e que pode ser captada pelo olho humano. O espectro visível pode ser decomposto nas cores do arco-íris e, para cada cor, é associada uma frequência (ou comprimento de onda). A luz violeta tem comprimento de onda de $400nm$ enquanto a luz vermelha, no outro extremo do espectro visível, possui comprimento de onda de $700nm$. Apesar de ser uma fração muito pequena do espectro eletromagnético, grande parte da energia emitida pelo Sol (44%) se situa na faixa da luz visível, conforme vimos acima. Os gases que formam a atmosfera terrestre praticamente não absorvem nesse intervalo. Assim, a atmosfera é moderadamente transparente à luz visível a qual atingirá a superfície terrestre quase sem ser absorvida. Na superfície terrestre parte dessa radiação será refletida e parte será absorvida que, por sua vez, será reemitida em forma de infravermelho.

RADIAÇÃO INFRAVERMELHA: É a radiação situada logo após o final do espectro visível e está situada entre $0,7\mu m$ e $1000\mu m$.

Baseado na capacidade de produzir e observar essa radiação costuma-se classificá-la em três regiões distintas: infravermelho próximo, médio e longínquo.

Infravermelho Próximo: Com intervalo entre $0,7$ e $1,5\mu m$, essa radiação possui basicamente as mesmas propriedades da luz visível, com a diferença de que não é detectada pelo olho humano. Dessa forma, ela pode ser produzida por qualquer fonte luminosa e é detectada com os mesmos dispositivos utilizados para o estudo da luz visível como, por exemplo, fotocélulas.

Infravermelho médio e longínquo: Com intervalo entre, respectivamente, $1,5$ a 10 e 10 a 1000 micrômetros, essas radiações precisam de técnicas especiais para ser produzidas.

Toda radiação pode ser absorvida pela matéria e transformada em calor. Contudo, esse efeito de aquecimento é mais acentuado para a radiação infravermelha do que para qualquer outro tipo de radiação eletromagnética. No caso específico da atmosfera é a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra que provoca o efeito estufa conforme veremos na Seção 4.

RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA: Essa radiação está localizada na região do espectro eletromagnético referente aos comprimentos de onda entre 100 e $400nm$. De acordo com a intensidade que a radiação ultravioleta é absorvida pelo oxigênio e ozônio e, também pelos efeitos fotobiológicos costuma-se dividir a região UV em três intervalos designados UVC, UVB e UVA

os quais possuem as seguintes características:

UVA - Com intervalo entre 100 e 280nm, essa radiação é completamente absorvida pelo O_2 e O_3 presentes na estratosfera, fato que é de grande importância já que o UVA é potencialmente muito perigoso para os seres vivos.

UVB - Com intervalo entre 280 e 320nm é fortemente absorvido pelo O_3 . Essa radiação provoca grandes danos à saúde humana e é a responsável por queimaduras e câncer de pele.

UVC - Com intervalo entre 320 e 400nm é pouco absorvida na estratosfera. Ela é importante para a sintetização da vitamina D no organismo. Contudo, excesso de exposição a essa radiação pode causar queimaduras além de, a longo prazo, provocar envelhecimento precoce. Daí a importância de se evitar exposição ao Sol entre as 10h e 16h, principalmente sem proteção adequada como filtro solar.

III. CLASSIFICAÇÃO DAS CAMADAS DA ATMOSFERA DE ACORDO COM A TEMPERATURA

A Temperatura da atmosfera terrestre é determinada, principalmente, por dois fatores: a proximidade em relação ao solo e a interação da radiação com as moléculas presentes na atmosfera.

Observa-se que a temperatura da atmosfera varia entre camadas em diferentes altitudes sendo, portanto, um dos parâmetros de classificação das próprias camadas. Segundo essa classificação, a atmosfera terrestre é constituída de cinco camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera, conforme a figura 4. Os contatos entre elas são áreas de descontinuidade e possuem o sufixo “pausa”, após o nome da camada subjacente. Assim, por exemplo, a tropopausa é a camada de transição entre a troposfera e a estratosfera

A. Troposfera

A troposfera é a primeira camada terrestre, de baixo para cima, e se estende da superfície da Terra até a base da estratosfera. Ela possui uma altitude média de 11km (20km no equador e 8km nos pólos) sendo a camada atmosférica mais delgada. Apesar disso, ela contém cerca de 90 por cento de toda a massa atmosférica

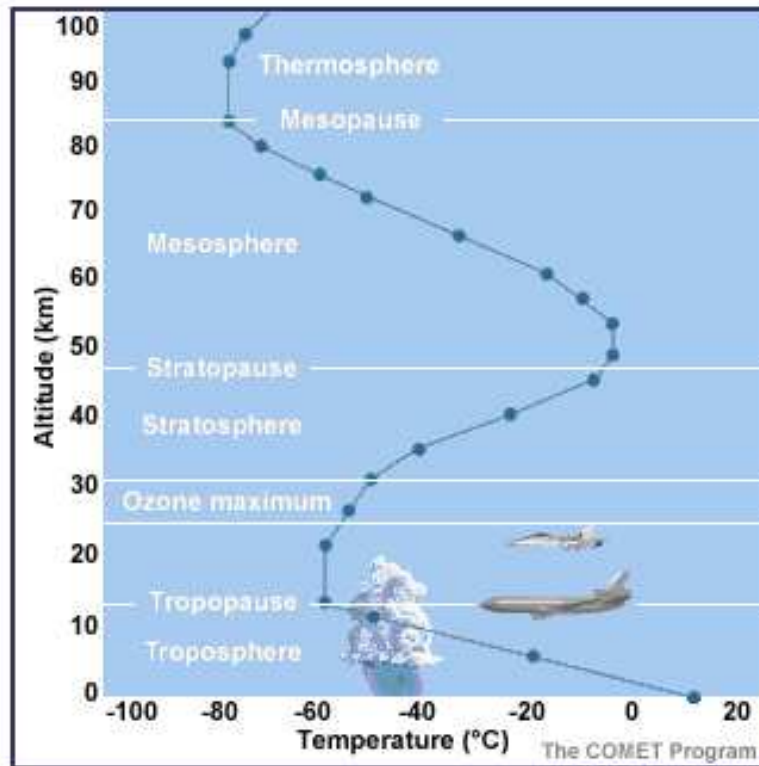


Fig. 4: Classificação das camadas da atmosfera segundo a temperatura. Fonte: [http : //www.pilotfriend.com/training/flight_raining/met/images/3.gif](http://www.pilotfriend.com/training/flight_raining/met/images/3.gif)

A temperatura da troposfera diminui com o aumento da altitude (vide figura 4). A taxa de variação vertical da temperatura (gradiente térmico) da troposfera é de $6,5^{\circ}C/km$. Isso significa que, em média, a temperatura decai $6,5^{\circ}C$ a cada quilômetro. Essa tendência de redução da temperatura ocorrerá até atingir-se a tropopausa, que é região onde a temperatura na troposfera é mínima (cerca de $-55^{\circ}C$) e está localizada a uma altura média em torno de 17 km no equador.

Essa região é denominada de “armadilha fria”, pois é onde o ar ascendente chega ao seu lugar limite, ou seja, ao chegar na tropopausa o ar ascendente será espalhado para os lados pois não consegue ultrapassá-la, porque nessa região o ar é mais leve e mais quente, o que impede a passagem do ar ascendente para a camada superior. Isso é importante para a dinâmica e a química da troposfera, para a formação das nuvens e condições meteorológicas. Essa ascendência do ar ocorre porque o ar quente é mais leve do que o ar frio. Assim, quando a superfície terrestre é aquecida pela luz do Sol, o ar que se encontra próximo à superfície da Terra

aquece e torna-se mais leve do que o ar em maiores altitudes, ocorrendo então o fenômeno de convecção do ar. O processo de convecção mantém a continuidade, enquanto houver a ascensão do ar quente proveniente da superfície, e o rebaixamento do ar frio para a superfície.

Por esta razão, é difícil para as gotículas de água e para os compostos químicos atravessarem esta barreira invisível da temperatura na tropopausa. Desse modo, a maioria da química do ar e das alterações meteorológicas como chuvas, geadas e outras precipitações ocorrem na troposfera. Constata-se que, com a impossibilidade da ascensão da água às regiões superiores da troposfera, há conseqüentemente a impossibilidade da formação de nuvens nessas camadas atmosféricas, pois as nuvens são constituídas de gotículas de água.

A altura da tropopausa à superfície terrestre, varia conforme as condições climáticas da troposfera, a temperatura do ar, a latitude, além de outros fatores. Caso haja na troposfera uma instabilidade climática, ou seja, uma agitação do clima com muitas correntes de convecção, a tropopausa tende a se elevar. Com o aumento da quantidade do volume de ar da troposfera, o ar acaba “empurrando” a tropopausa para cima. Ao subir, a temperatura da tropopausa diminui, pois o ar acima dela está mais frio. A tropopausa tem a sua maior altitude nas regiões tropicais, em relação ao solo, pelo fato de nessas regiões o ar apresentar maiores temperaturas. Quando a tropopausa encontra-se mais alta, a temperatura dos seus componentes tende a diminuir, chegando a atingir -80°C no equador, a sua menor temperatura.

A radiação presente na troposfera se encontra na faixa da luz visível, microondas, ondas de rádio e raios ultravioletas. Conforme vimos, os raios ultravioletas se dividem em três tipos: UVA, UVB e UVC. Porém, na troposfera só há presença da radiação UVA, que não sofre absorção durante a sua entrada na atmosfera e da radiação UVB, de forma parcial. A ausência da radiação UVC e a absorção de uma parte da radiação UVA será justificada mais à frente.

B. Estratosfera

A estratosfera se caracteriza pelos movimentos de ar no sentido horizontal, e fica localizada entre 7 e 17 até 50 km de altitude aproximadamente, sendo a segunda camada da atmosfera, compreendida entre a troposfera e a mesosfera. Sua temperatura aumenta à medida que aumenta a altura (de -50 a 10°C). A estratosfera é muito estável, praticamente sem convecção ou qualquer dos fenômenos violentos que se observam na troposfera. É uma região calma, e

por esse motivo, é a camada mais adequada para o tráfego aéreo, quando comparado com a instabilidade da troposfera.

Os compostos existentes na superfície terrestre (gases, vapores), não conseguem alcançar a estratosfera, pois eles podem ser decompostos por gases atmosféricos, ainda na troposfera (principalmente pelos oxidantes, OH , NO_3 , ozônio), eliminados pela luz solar; removidos por deposição seca ou úmida e por fim, impedidos pela tropopausa de seguir adiante o seu percurso, para a camada posterior.

A variação do comportamento da temperatura com o aumento da altitude, entre a troposfera e a estratosfera, provoca um estado de lentidão na transferência de ar entre essas duas camadas. Na troposfera, as transferências verticais ocorrem entre várias horas até vários dias, entretanto na estratosfera a transferência das misturas de elementos ocorrem num prazo que vai de meses a anos.

A primeira conseqüência é que o teor em vapor de água na estratosfera é muito baixo. As proporções de misturas típicas entre essas duas camadas são drasticamente desiguais. Enquanto que na estratosfera, essas misturas são encontradas em ordem de 2 a 6 ppm (partes por milhão), na baixa troposfera essa quantidade se eleva a uma ordem de 1.000 a 40.000 ppm e na alta troposfera a 100 ppm. Dessa forma, é quase impossível a formação de nuvens, implicando necessariamente numa queda significativa de temperatura para que os cristais de gelo se formem. Essas condições são encontradas nas regiões polares, onde podem ocorrer a existência de nuvens estratosféricas de gelo. A formação das nuvens estratosféricas polares é provocada pelo esfriamento da atmosfera superior e pelo aquecimento da superfície terrestre, conseqüência do efeito estufa.

Conforme já dito, é na estratosfera que está localizada a camada de ozônio, que se estende entre 25 e 50 km.

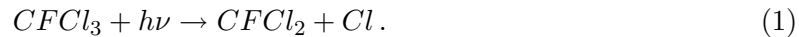
O ozônio (O_3) é o principal responsável pelo aquecimento da estratosfera, pois absorve os raios ultravioletas através de reações fotoquímicas, impedindo a passagem das radiações nocivas e, com isso, contribuindo para o crescimento da temperatura na camada. O ozônio desempenhando esse papel torna-se um verdadeiro filtro solar da Terra, permitindo a vida no nosso planeta. Essa molécula está constantemente em formação, porém, também em constante decomposição. Surpreendentemente, a radiação ultravioleta que ele absorve vinda do Sol, é de extrema importância para a sua construção, pois essa mesma radiação decompõe o gás oxigênio (O_2), liberando assim dois exemplares de oxigênio monoatômico, que depois irá se combinar

com outras moléculas de oxigênio, concebendo assim a nova molécula de ozônio, conforme vimos na subseção 2.1.

Devido ao seu papel fundamental na garantia de existência na vida terrestre, a sua destruição é considerada como um dos maiores problemas ambientais deste século. Mas, como se dá a destruição da camada de ozônio?

Na década de 1970 os cientistas americanos Mario Molina e F. Rowland aventaram a hipótese de que o cloro (Cl), originado de compostos clorofluorcarbonetos ($CFC's$), poderia destruir o ozônio presente na estratosfera. Os $CFC's$ são substâncias derivadas dos hidrocarbonetos nos quais átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro e flúor. Eles são gases muito utilizados em substâncias refrigerantes em geladeiras e condicionadores de ar bem como propelentes em aerossóis.

Os $CFC's$ são compostos muito estáveis, logo o seu tempo médio de residência na atmosfera é bastante longo, cerca de 70 anos. Esse tempo é suficiente para que eles alcancem a estratosfera onde são decompostos pela radiação ultravioleta, como segue:

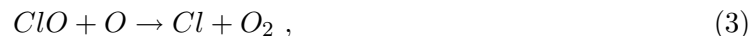


A decomposição dos CFC's, (nesse exemplo um triclorofluorometano $CFCl_3$) é um processo de heterólise (quebra assimétrica, por fotólise, de uma ligação covalente) que libera um átomo de cloro (Cl), com um elétron livre, e um diclorofluorometano excitado (ionizado) ($CFCl_2$).

Como resultado dessa decomposição, onde são formados radicais livres como o cloro, tem-se reações com o ozônio destruindo-o através das seguintes etapas de reações:



O monóxido de cloro, ClO , formado na reação acima, reage com um átomo livre de oxigênio (O) formando O_2 e liberando um átomo livre de cloro (Cl):



que por sua vez pode voltar a reagir com o ozônio, como na reação (2).

Na primeira etapa, reação (2), o átomo de Cloro ao se desprender da molécula de CFC's rompe o O_3 formando ClO e O_2 . Na segunda etapa, reação (3) o cloro se desprende do oxigênio ao reagir com um átomo livre de oxigênio e, assim, pode participar de outro ciclo.

Uma outra possibilidade de ataque à camada de ozônio é dada pela reação abaixo:



Na outra possibilidade, reação (4) o ozônio é destruído ao encontrar-se com um átomo livre de oxigênio. Note-se que temos a competição entre duas reações que removem o ozônio da estratosfera, as reações (2) e (4).

Observe que o átomo livre de cloro, formado na reação (3) acima, está pronto para decompor mais uma molécula de ozônio provocando assim um decréscimo nessa camada de ozônio.

O conhecimento desse processo levou ao estabelecimento do Protocolo de Montreal, o qual, em 1977, definiu metas para o fim da produção e comercialização dos CFC's, o que efetivamente vem acontecendo.

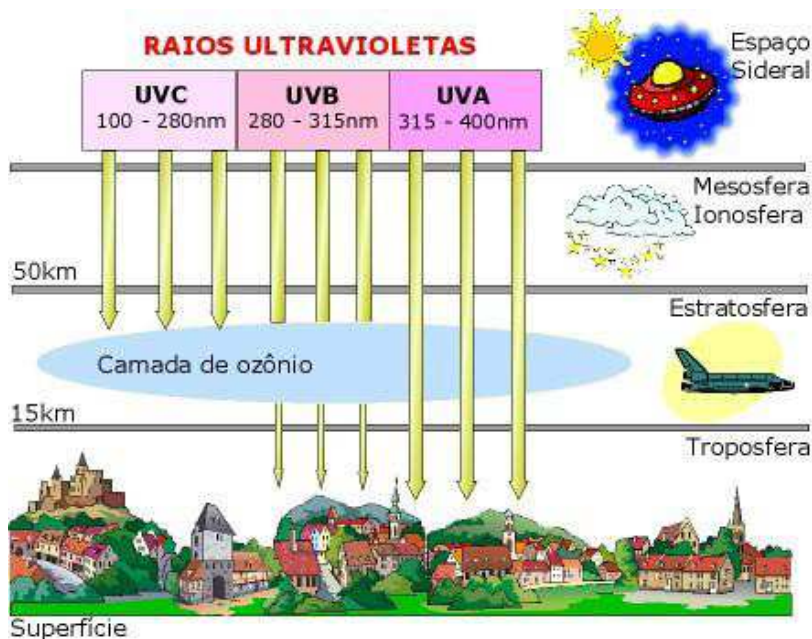


Fig. 5: Raios Ultravioletas na Atmosfera Terrestre. Fonte: http://solamigo.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=121&Itemid=182

A radiação presente na estratosfera se encontra na faixa da luz visível, infravermelha, mi-

croondas, rádio e radiação ultravioleta. Podemos notar na figura 5 que a camada de ozônio absorve por completo a radiação UVC, impedindo a sua passagem para a estratosfera além de absorver de forma parcial a radiação UVB.

C. Mesosfera

A mesosfera é, dentre todas as camadas, a que apresenta as mais baixas temperaturas as quais podem chegar a valores menores que $100^{\circ}C$ negativos.

A partir dos $50km$ de altura, onde está localizada a estratopausa, a temperatura volta a ter o comportamento da troposfera, ou seja, a temperatura diminui com o aumento da altitude (figura 4).

A parte da base inferior é a mais quente da mesosfera, pois absorve calor da camada contígua inferior (a estratosfera). Assim, o declínio da temperatura com o aumento da altitude nessa camada ocorre devido à baixa concentração de moléculas e da redução do calor advindo da camada de ozônio da estratosfera. Contudo, mesmo com a baixa concentração, as moléculas dessa camada oferecem resistência suficiente aos objetos que entram na atmosfera, atraídos pela força gravitacional terrestre.

As chamadas “estrelas cadentes” são objetos que, quando penetram na atmosfera terrestre, colidem com as moléculas de ar presentes na mesosfera. Essas colisões em altas velocidades acarretam na liberação de calor que incendeiam esses materiais. O calor gerado pela resistência do ar em diversas rochas vindas do espaço que colidem com a Terra faz com que os objetos sejam incendiados e dêem origem às estrelas cadentes. Esses fenômenos são chamados de meteoros e as rochas de meteoróides.

A radiação na mesosfera (vide figura 2) encontra-se na faixa da luz visível, infravermelha, microondas, ultravioleta (os três tipos) (vide figura 5).

D. Termosfera

Após a mesopausa, mas sem limite superior definido, está a termosfera. Sua temperatura é inicialmente constante mas depois cresce de forma rápida com a altitude. Esse aumento se deve à absorção de radiação de ondas curtas ($\lambda \sim 200nm$) por elementos iônicos e atômicos,

e a temperatura chega a cerca de $1200^{\circ}C$. Contudo, o número de moléculas nessa camada é tão reduzido que o conceito de temperatura fica quase sem sentido. Lembremos que, na interpretação molecular de um gás, temperaturas são definidas em termos da velocidade média das moléculas. Na verdade, em termos da velocidade média quadrática que é a raiz quadrada da velocidade quadrática média, temos

$$v_{mq} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

onde R é a constante universal dos gases, M é a massa molecular em Kg por mol e T é a temperatura absoluta.

Como as moléculas dos gases da termosfera se movem com velocidades altas, a temperatura é alta. Contudo, como a densidade é muito pequena, poucas moléculas colidem com um corpo estranho; logo muito pouca energia é transferida. Assim, a temperatura de um corpo nessa região é definida mais pela quantidade de radiação absorvida do que pela temperatura do ar. Alguns autores dividem essa camada em duas: ionosfera e exosfera.

A radiação eletromagnética existente na mesosfera (vide figura 2) encontra-se nas faixas de toda a luz visível, infravermelha, microondas, raios x e ultravioleta (os três tipos) (vide figura 5).

1. Ionosfera

A ionosfera é a parte inferior da termosfera e estende-se de 89 a 550km. Nessa região há uma grande absorção de radiação de ondas curtas (ultravioletas e raios x) o que leva a ionização dos elementos aí presentes e, assim, elétrons livres também, o que leva a criação do plasma ionosférico. Esse plasma pode refletir ondas de rádio utilizadas em radiodifusão.

2. Exosfera

É a parte superior da termosfera. Ela estende-se a partir de aproximadamente 550km. Devido a essa grande altitude, o ar se torna extremamente rarefeito de maneira que colisões

entre moléculas é extremamente rara. É nesta região onde os satélites artificiais orbitam a Terra.

Como na exosfera não há registro de absorção da radiação que chega por lá, ou seja, não participa do processo de filtração seletiva da radiação, como a estratosfera, a radiação será toda aquela citada nas camadas anteriores (vide figura 2).

IV. EFEITO ESTUFA

A atmosfera desempenha um papel fundamental na manutenção da temperatura média da Terra em um valor adequado à vida. Isso é possível através do efeito estufa. Mas, o que é esse efeito? O efeito estufa, basicamente, consiste na absorção, por alguns gases presentes na atmosfera (chamados gases de efeito estufa), de raios infravermelhos (comprimento de onda (λ) entre 0,7 e 100 μm) refletidos pela superfície terrestre. Dessa forma, o calor fica aprisionado na atmosfera e, conforme já citado, sem esse efeito a temperatura média da Terra seria de $-18^{\circ}C$ ao invés dos atuais $+15^{\circ}C$.

Como ocorre o efeito estufa? da radiação que chega à Terra, apenas a faixa visível, parte do infravermelho, parte da faixa das microondas e parte das ondas de rádio atingem a superfície terrestre quase sem absorção.

Da radiação solar total que chega à Terra, cerca de 55 por cento atinge à superfície (vide figura 3). Desse total, 25 por cento chega à superfície diretamente, enquanto cerca de 26 por cento atinge a superfície via espalhamento e 4 por cento é refletida pela superfície (continentes e oceanos). Desse modo, da radiação solar total que chega à Terra, cerca de 51 por cento é absorvida pela superfície terrestre enquanto 4 por cento é refletida por essa.

O restante da radiação total é refletida ou retro-espalhada para o espaço (6 por cento pelos constituintes de matéria da atmosfera e 20 por cento pelas nuvens) enquanto cerca de 19 por cento é absorvida pelas nuvens e outros constituintes materiais da atmosfera.

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é absorvida e em seguida reemitida para a atmosfera. Essa radiação emitida está situada no infravermelho (com comprimento de onda λ entre 1 e 30 μm) a qual, ao ser absorvida pelos gases de efeito estufa, produzem o aquecimento da atmosfera. Desse modo, a maior fonte de calor para a atmosfera (rigorosamente, para a troposfera) é a superfície terrestre. Como a atmosfera, no que tange à matéria, é muito mais

densa nas altitudes menores, será nessa região que acontecerá maior absorção da radiação infravermelha emitida pela Terra. Isso explica o comportamento térmico da troposfera, que apresenta um decréscimo da temperatura com o aumento da altitude.

Esses processos, que são característicos do Planeta Terra, propiciam a configuração dos componentes de radiação que são próprios da atmosfera terrestre.

Os principais gases de efeito estufa são o vapor d'água e o gás carbônico. O vapor d'água, sozinho é responsável por 85 por cento do efeito estufa natural. Outros gases de efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os clorofluorcarbonetos (CFCs).

Um dos grandes problemas atuais da humanidade é que a quantidade desses gases na atmosfera vem aumentando devido a atividades antrópicas, o que pode provocar um aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, um aquecimento do planeta cujas conseqüências podem ser trágicas.

V. CONCLUSÕES

A atmosfera é um sistema extremamente complexo onde ocorrem simultaneamente vários processos físicos e químicos que são fundamentais para a vida na Terra, que existe graças a um delicado equilíbrio de processos que acontecem no nosso planeta.

Do estudo dos componentes que formam a atmosfera e da sua interação com a superfície terrestre (crosta e oceanos), verifica-se que a atmosfera contém os elementos essenciais para a manutenção da vida. Assim, por exemplo, o oxigênio é essencial na respiração animal e vegetal. O carbono, presente na atmosfera sob a forma de CO_2 , é incorporado aos seres vivos e à cadeia alimentar através da fotossíntese. Além disso, temos componentes da radiação, como a luz visível que participam desses processos vitais.

Outro papel, não menos fundamental, desempenhado pelo processos físicos da atmosfera é o de filtrar radiações nocivas à vida bem como servir de manto térmico, através do efeito estufa, da Terra, o que garante uma amena temperatura média de $15^\circ C$ ao nosso planeta.

[1] Meteorologia Básica. Notas de Aulas. Disponível em <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>.

[2] A.V. Andrade-Neto, Caderno de Física da UEFS **04**, 23 (2006).

- [3] Goody, Richard M. and Walker, J. C. G. *Atmosferas Planetárias*. Editora Edgar Blücher, (1975).
- [4] Tolentino, Mario; Rocha-Filho, Romeu C. e da Silva, Roberto Ribeiro. *O azul do planeta. Um Retrato da Atmosfera*. Editora Edgar Blücher, (1975).

SOBRE OS AUTORES -

Anderson Alberto C. Dias - Licenciando em Física pela UEFS, é Professor da Fundação José Carvalho.

e-mail: alberttodias@yahoo.com.br

Antônio Vieira de Andrade-Neto - Doutor em Física pela UNICAMP, é Professor Adjunto do Departamento de Física da UEFS.

e-mail: aneto@uefs.br

Milton Souza Ribeiro Miltão - Doutor em Física pela UFRJ e Especialista em Educação pela UFBA, é Professor Adjunto do Departamento de Física da UEFS.

e-mail: miltaaa@ig.com.br