A collage of several Earth globes and a sun-like planet. The sun is on the left, glowing orange and red. The globes are arranged in a path across the top of the slide, showing different atmospheric and temperature patterns. One globe is a standard blue and white Earth, another is a blue and green Earth, and others show color gradients representing temperature or atmospheric density. The background is a dark space with a nebula-like pattern.

# ACA-115

# Introdução a Ciências Atmosféricas

## **Os Movimentos da Atmosfera**

**por Profa. Jacyra Soares e Prof.  
Carlos Morales  
(revisado por Augusto Pereira)**

# Conteúdo

- 1. Escala dos movimentos atmosféricos e principais forças;***
- 2. Equilíbrio hidrostático e geostrófico;***
- 3. Divergência e convergência;***
- 4. Circulação geral da atmosfera;***
- 5. Circulações locais;***
- 6. Turbulência atmosférica.***

# 1. ESCALAS DOS MOVIMENTOS ATMOSFÉRICOS

Tradicionalmente, as Ciências Atmosféricas se dividem em dois ramos: a "METEOROLOGIA" e a "CLIMATOLOGIA".

- A **METEOROLOGIA** estaria ligada principalmente aos estudos dos fenômenos atmosféricos *em si*, e as respectivas variações no tempo, isto é, suas origens, desenvolvimento e dissipação.
- A **CLIMATOLOGIA**, por outro lado, estaria mais ligada com as propriedades "médias" de "longos" períodos, dos elementos meteorológicos que determinam o clima das diversas regiões da terra.

A **METEOROLOGIA**, por sua vez, é tradicionalmente dividida em três disciplinas básicas:

- a) Meteorologia Física;
- b) Meteorologia Sinótica;
- c) Meteorologia Dinâmica;

Na **METEOROLOGIA FÍSICA** estuda-se, por exemplo, a composição e estrutura da atmosfera, os processos de transferência de energia (calor e radiação) na atmosfera, a formação de nuvens e da precipitação, eletricidade atmosférica, fenômenos óticos e acústicos, e diversos outros processos físico-químicos que ocorrem na atmosfera.

A **METEOROLOGIA SINÓTICA** está relacionada principalmente com a descrição, análise e previsão do tempo. Na sua origem, a meteorologia sinótica era baseada em métodos empíricos de análise e previsão que foram desenvolvidos no início do século passado, e principalmente após a 2ª Guerra Mundial, quando foram instaladas diversas redes de estações meteorológicas que enviavam os dados de observações simultâneas (isto é “sinóticas”) para os centros de previsão. Atualmente, a meteorologia sinótica utiliza os conhecimentos gerados em todas as disciplinas das Ciências Atmosféricas, principalmente da Meteorologia Dinâmica.

A **METEOROLOGIA DINÂMICA** também está ligada ao estudo dos movimentos atmosféricos e sua evolução temporal, porém suas ferramentas analíticas são os princípios da "Mecânica dos Fluidos". Novamente, essa divisão apresentada não é rígida, sendo que a inter-relação entre essas três disciplinas é bastante grande.

***O que é a “escala” de um fenômeno atmosférico ?***

A escala de um determinado fenômeno meteorológico se refere às suas dimensões espaço/temporal "típica".

A menor escala que tem importância meteorológica é a chamada **MICRO-ESCALA**. Os fenômenos que ocorrem nessa escala tem dimensões espaciais de metros a centenas de metros e duração da ordem de segundos a minutos.

Nessa categoria estão as nuvens, quando consideradas individualmente, e fenômenos turbulentos, que são bastante afetados pelas características da superfície tais como as trocas de calor e umidade entre o solo e os primeiros metros mais baixos da atmosfera.

Na micro-escala, estuda-se, por exemplo, os processos de formação de gotas de nuvem e de chuva, a dispersão de poluentes, e as interações no sistema solo-planta-atmosfera.



Limite entre  
goticulas de nuvem  
e gotas de chuva

$$r = 100$$

$$V = 70$$

Nucleo de Condensacao

$$r = 0.1$$

$$n = 1.000.000$$

$$v = 0.0001$$

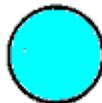
Goticula de  
nuvem  
grande

$$r = 50$$

$$n = 1000$$

$$V = 27$$

Goticula de nuvem Tipica



$$r = 10$$

$$n = 1.000.000$$

$$V = 1$$

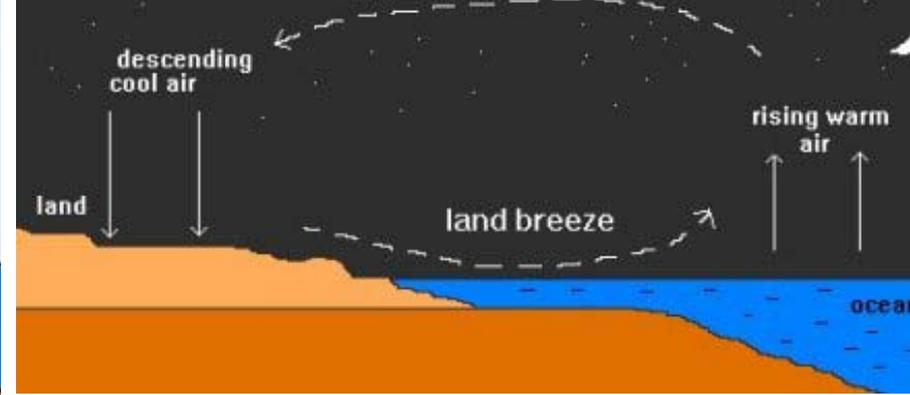
Gota de Chuva tipica,  $r = 1000$ ,  $n = 1$ ,  $V = 650$

Unidades: raio  $r$  ( $\mu\text{m}$ ) e velocidade terminal  $V$  ( $\text{cm s}^{-1}$ )

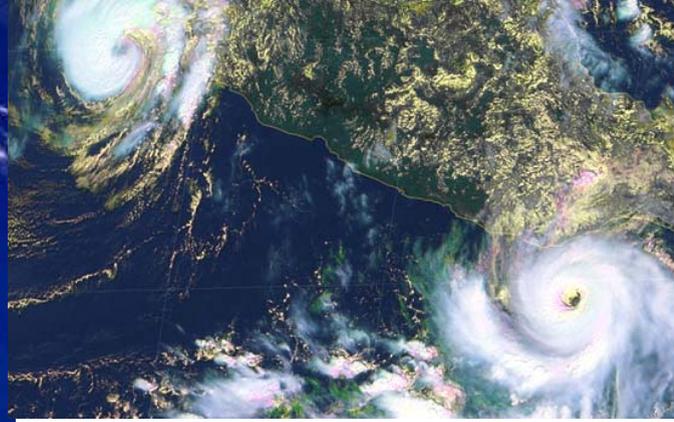
Os fenômenos na escala de **MESOESCALA**, têm dimensões espaciais da ordem de 2 km até cerca de 200 km. A duração característica é da ordem de 1 hora a poucas horas.

Nessa categoria estão enquadrados, por exemplo, os tornados, tempestades isoladas, linhas de instabilidade, conjuntos ou sistemas de nuvens, "ilhas de calor", além das brisas marítima e terrestre e de vale-montanha.

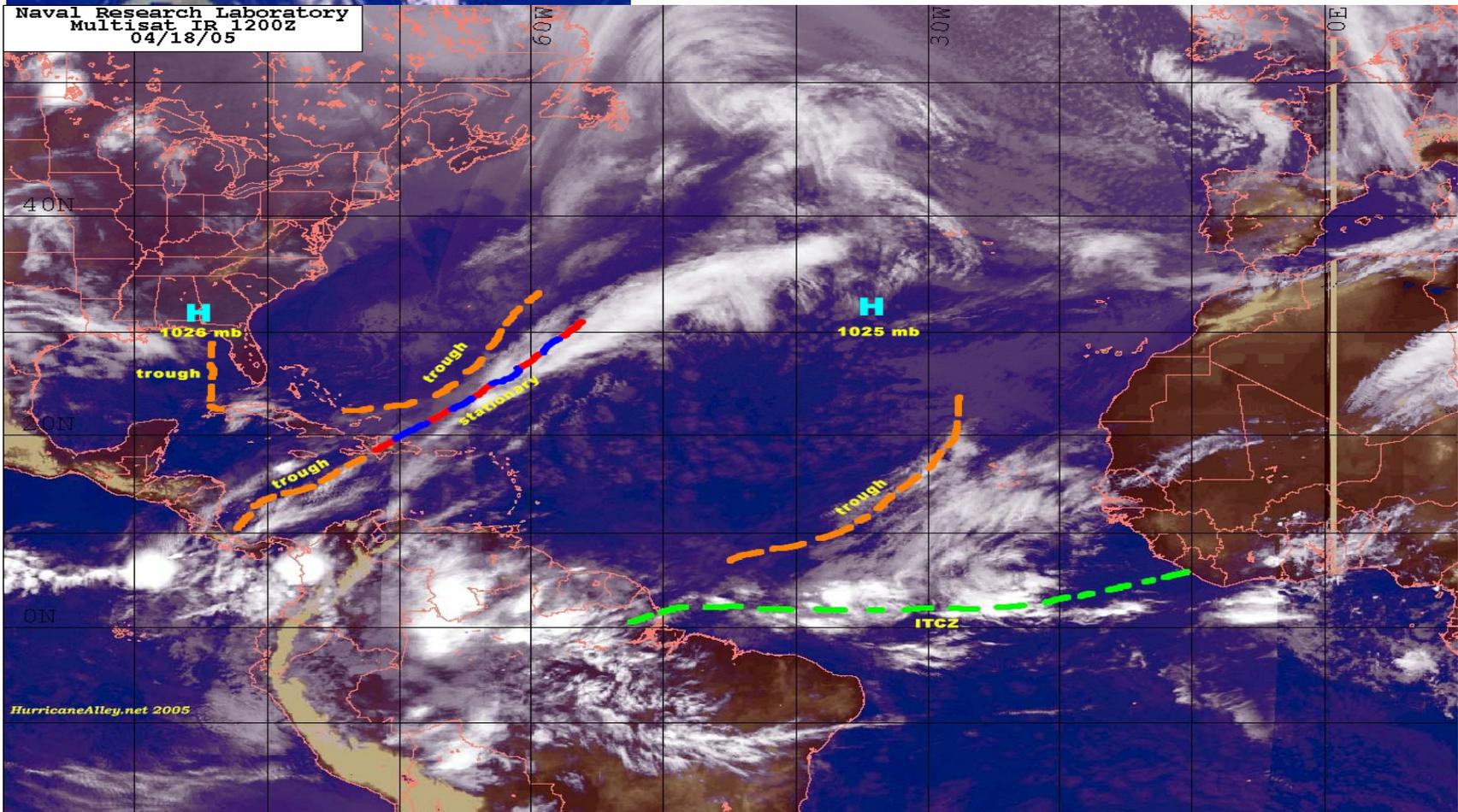
Esses sistemas são muito importantes para o conhecimento regional do tempo, e estão muito ligados às características geográficas da região (montanhas, proximidade de oceano ou lagos, florestas, cidades, etc.).



Os fenômenos meteorológicos que mais afetam o tempo no dia a dia se encontram na chamada **GRANDE ESCALA**. Esses sistemas têm dimensões maiores que algumas centenas de quilômetros e duração da ordem de um dia a semanas. Nela se enquadram os furacões, as frentes frias, os ciclones e anticiclones, e as "ondas longas associadas aos ventos de oeste". Esses fenômenos têm também um importante papel na determinação das características climáticas e sazonais nas diversas regiões do globo.

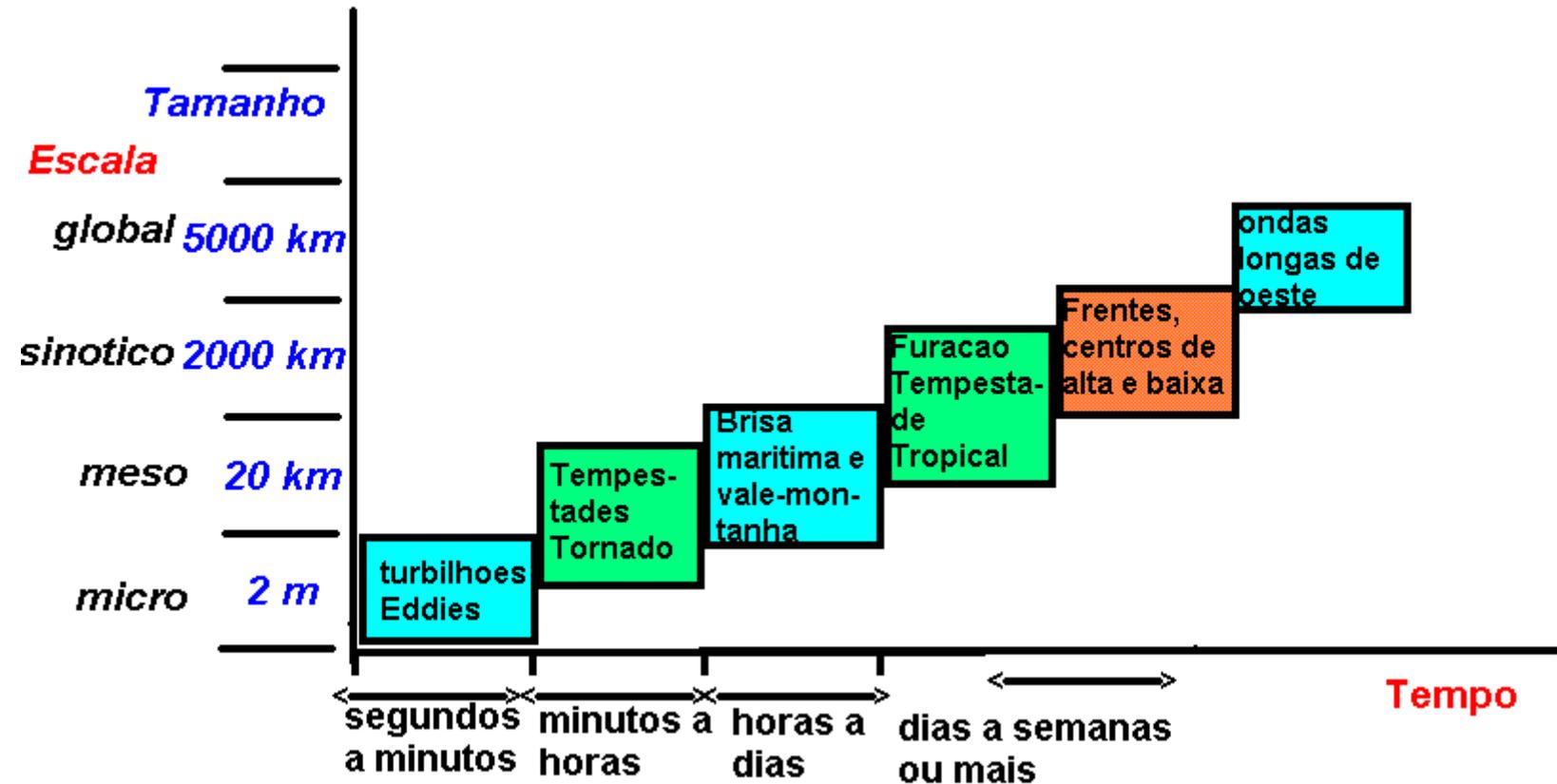


Naval Research Laboratory  
Multisat IR 1200Z  
04/18/05



HurricaneAlley.net 2005

# Escalas Espaciais e Temporais dos Fenômenos Meteorológicos



Após essa introdução à questão da escala em meteorologia, segue abaixo uma introdução aos principais **forças** que provocam e modificam os movimentos na atmosfera.

Inicialmente, essas forças serão consideradas individualmente. Posteriormente, elas serão consideradas conjuntamente, levando ao que chamamos de "balanços" entre elas.

Finalmente, são apresentadas algumas idéias que explicam a circulação geral da atmosfera, ou seja, um “**modelo conceitual**” que explica as características observadas nos campos de pressão e do vento numa escala global.

# AS PRINCIPAIS FORÇAS NA ATMOSFERA

**Força é a causa do movimento.**

*Um corpo permanece em repouso ou em movimento uniforme, sem mudar sua velocidade ou direção, a menos que uma força externa atue nesse corpo (**Primeira Lei de Newton**)*

# O que é um corpo na atmosfera?

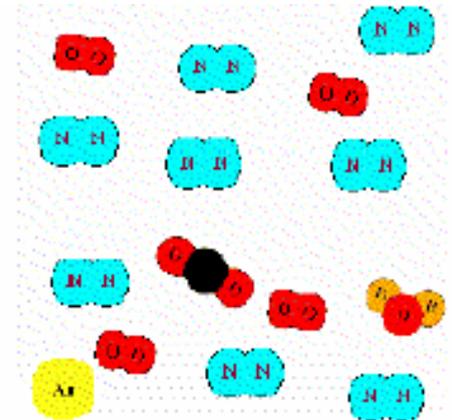
a) Uma molécula individual?



b) A atmosfera como um todo?



c) Um aglomerado de moléculas?



# TODAS AS ALTERNATIVAS ESTÃO CORRETAS!

Parece estranho aplicar as Leis do movimento para algo como a atmosfera, pois não a vemos como um corpo ou mesmo como um conjunto de corpos. Em geral, vemos a atmosfera como um fluido contínuo.

Ao invés de manter um formato, partes da atmosfera estão continuamente se deformando e se movimentando. Mesmo assim, cada “parte” da atmosfera obedece as Leis de movimento.

Considera-se, em geral, uma “parte” de ar suficientemente grande para incluir várias moléculas mas suficientemente pequena para que cada “parte” se mova como um único objeto.

Meteorologistas chamam tal objeto imaginário de ***“parcela de ar”***.

**Força em um corpo = massa do corpo \* aceleração**

O efeito de uma força é causar aceleração (dv/dt).

Considere:

Uma força atuando em um dado volume de ar:

***Força por unidade de volume =  
massa por unidade de volume \* aceleração***

E se houver mais de uma força?

***Somam-se todas as forças***

## ***Aceleração na atmosfera***

Na atmosfera, em geral, a aceleração das parcelas de ar é pequena. Sob várias circunstâncias a aceleração do ar é tão pequena que pode ser desprezada.

O ar que se move com uma determinada velocidade, em dada direção, tende a continuar a se mover com essa velocidade, nessa direção, por pelo menos algum tempo.

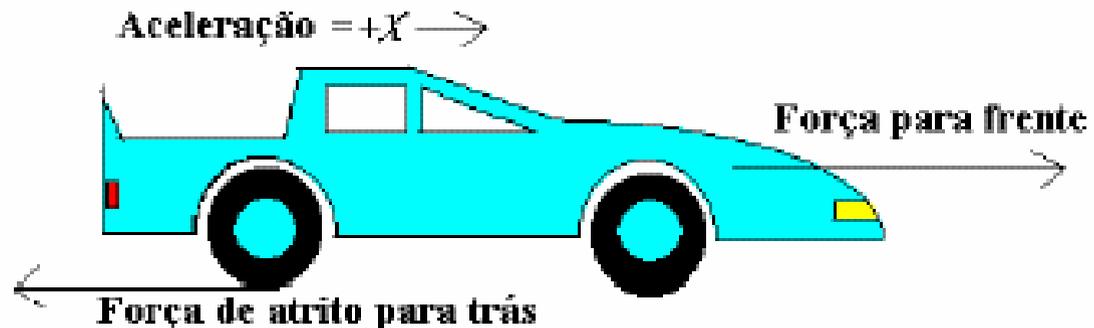
## ***O que isso significa em termos das Leis do Movimento?***

Significa que pode haver muitas forças atuando, mas na atmosfera, elas se somam de modo que a resultante seja aproximadamente nula.

## *Balanço de forças*

Para um carro viajar com uma certa velocidade, o motor deve fornecer uma força que o impulsione para frente.

Se essa força é maior que os efeitos combinados da resistência do ar e do atrito com a estrada, o carro acelera. Se essa força é mais fraca, o carro desacelera.



Na realidade é necessário acelerar ou desacelerar de tal modo que a resistência do ar e o atrito sejam tão grandes (ou tão pequenos) que a força fornecida pelo motor, de tal modo que a velocidade do carro seja constante (não tenha aceleração).



Na atmosfera o efeito é similar. Na maior parte do tempo o ar está em movimento por causa de 2 ou mais forças que se balanceiam.

Dessa maneira, quando ocorre um balanço entre 2 forças, isso significa que uma força está atuando em uma direção e a outra de mesma intensidade mas em direção exatamente oposta. Então, a direção da força é tão importante quanto sua intensidade, ou seja, a Força tem intensidade e direção.

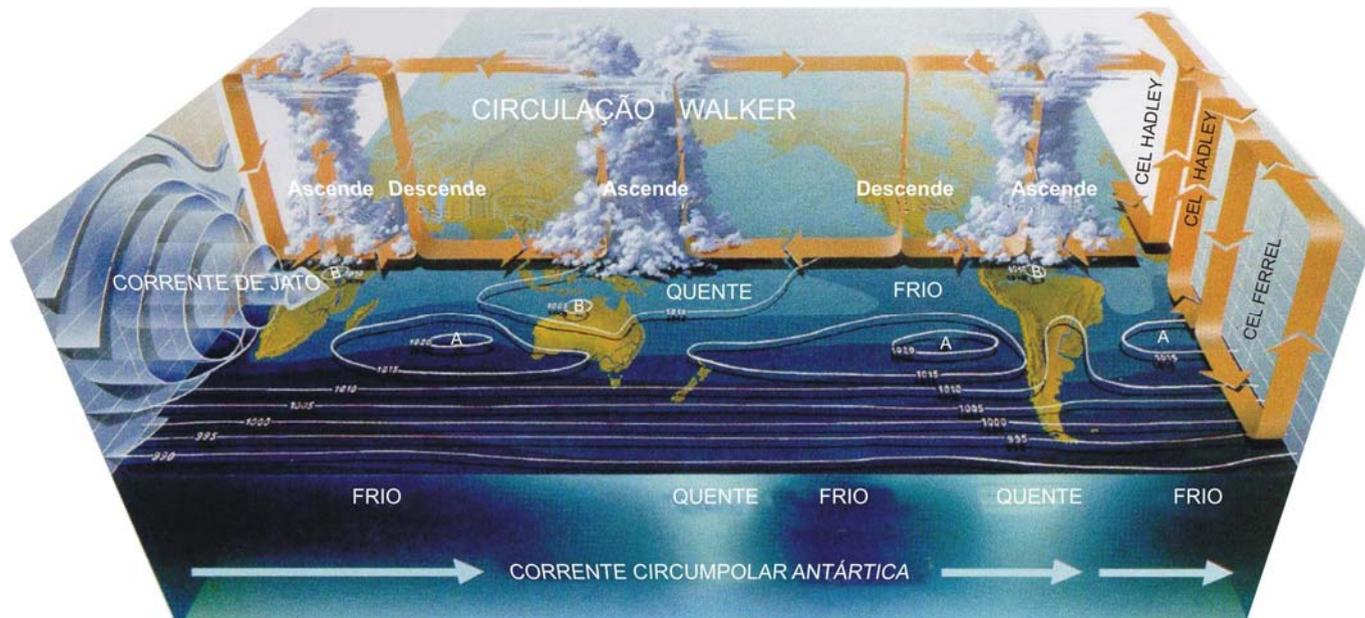
## ***O que causa o movimento do ar ?***

A principal causa para a ocorrência dos movimentos do ar (o vento) é a energia solar. Há *um processo de conversão de energia térmica em energia cinética e potencial*. Inclusive, muitas vezes a atmosfera é estudada como sendo uma "máquina térmica" (como uma caldeira) que transforma energia em trabalho.

Na verdade, o aquecimento da atmosfera pela energia solar é feito principalmente de maneira indireta. A superfície da Terra absorve a energia solar, se aquece e transmite esse calor para as camadas mais baixas da atmosfera

Posteriormente esse calor é transportado para as regiões mais altas da atmosfera a partir dos movimentos verticais do ar (*convecção*) ou para outras regiões por meio de transportes horizontais (*advecção*).

São, principalmente, as diferenças de absorção da energia solar nas várias regiões da Terra que determinam o movimento do ar. Essas diferenças podem ser provocadas, por exemplo, pelas diferenças de latitude, inclinação do terreno ou diferentes capacidades térmicas da superfície.



De acordo com a ***Primeira Lei de Newton***, para um corpo (a parcela de ar) mudar seu estado de movimento, deve existir um desequilíbrio de forças que atuam sobre esse corpo. Existem basicamente duas classes de forças que afetam a atmosfera:

(i) aquelas que existem independente do estado de movimento do ar; e

(ii) aquelas que aparecem somente após existir o movimento.

Na primeira categoria estão aquelas provocadas por "*campos*", como por exemplo a "força do campo gravitacional" e a "força do campo de pressão".

Na segunda estão aquelas que aparecem como uma "reação" ao movimento, como, por exemplo, a "força de atrito" e "força de Coriolis".

# FORÇA DA GRAVIDADE

Gravidade é a força mais “óbvia” que todos sentimos. A gravidade sempre aponta “para baixo”, em direção ao centro da Terra. A gravidade é forte o suficiente para causar uma mudança de velocidade (aceleração) de cerca de 9,8 metros por segundo, independentemente da massa do objeto.



A força da gravidade, que faz com que todos os corpos sobre a Terra sejam atraídos para o centro dela, modifica somente a componente vertical do vento.

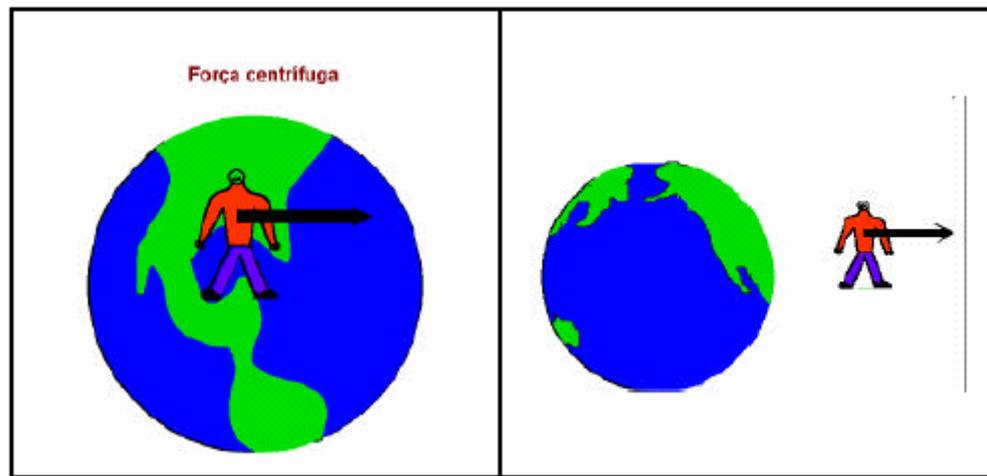
Sua intensidade, de acordo com a **Segunda Lei de Newton**, é proporcional à massa da parcela de ar , sendo que a “constante de proporcionalidade” é a “aceleração da gravidade (g)” ( $F=ma$  ou  $mg$ ).

O sentido dessa força é sempre “de cima para baixo”.

# FORÇA CENTRÍFUGA

Exatamente agora você está sobre uma Terra que gira rapidamente. Por esse motivo tudo na Terra sente uma força aparente chamada *Força Centrífuga*. ( $F = mV^2/r$ )

Se fosse possível “desligar” a força da gravidade, a força centrífuga faria tudo “voar” da Terra para o espaço.



Em meteorologia, em geral, combina-se o efeito da Força da Gravidade (em direção ao centro da Terra) com a Força Centrífuga (muito mais fraca que a Força da Gravidade e em direção “para fora” da Terra) em uma única força, para dentro da Terra, mas não exatamente em direção ao centro da Terra, chamada **GRAVIDADE**.

# FORÇA DE ATRITO

Atrito é uma força que só existe se o ar estiver em movimento.

Apesar de poder existir forças de atrito na atmosfera superior, elas são muito fracas.

O único lugar onde o atrito é sempre importante é perto da superfície. Em geral, o efeito do atrito maior entre 1 e 2 km de altura (*camada limite atmosférica*).

Perto do solo, objetos tão pequenos como grama ou ondas do oceano ou tão grandes como árvores ou prédios desaceleram o ar.

Dessa forma, a força de atrito depende da velocidade das parcelas e das características da superfície.

# FORÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO (FGP)

A FORÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO, surge devido à variação espacial (denominado de gradiente) no campo da pressão. O conceito de pressão atmosférica vem da Teoria Cinética dos Gases, e pode ser definida como sendo a força exercida pela colisão das moléculas do ar, em seus movimentos aleatórios, sobre uma superfície qualquer.

A pressão de um gás não está relacionada somente com o grau de "empacotamento" (em termos científicos, a densidade) das moléculas do gás, mas também com o grau de "agitação" térmica (a temperatura) dessas moléculas. A equação que relaciona pressão, densidade e temperatura é a conhecida "Lei dos Gases". Assim, por exemplo, mantendo-se a densidade de uma parcela de ar constante, um aumento na temperatura do gás irá implicar num aumento de sua pressão.

A atmosfera pode ser considerada um gás ideal.

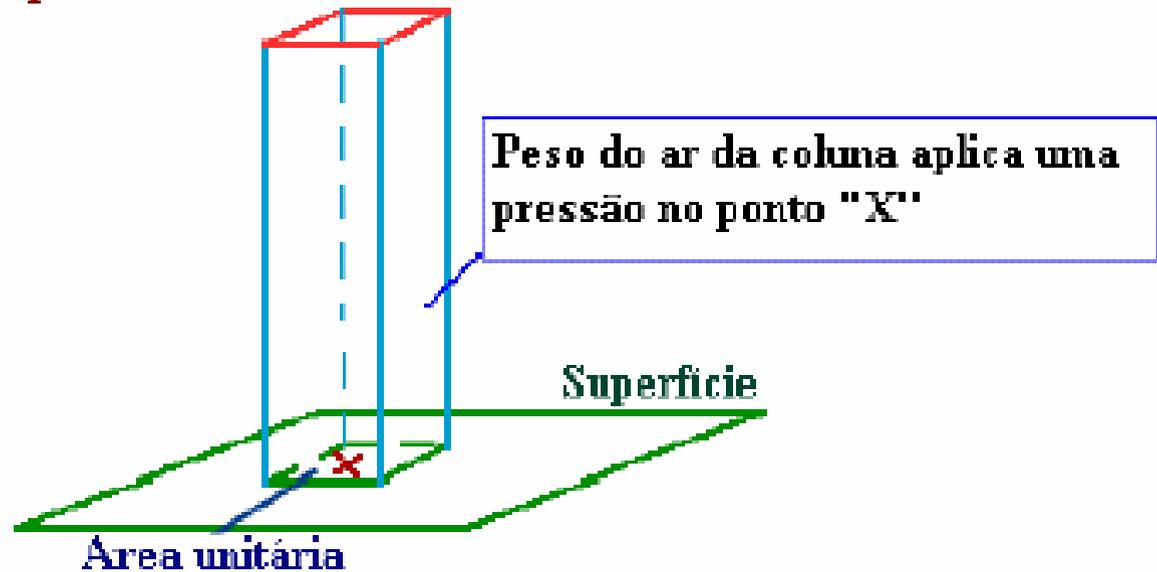
Dessa forma:

$$P = \rho R T$$

onde  $P$  é a pressão exercida pelo gás,  $R$  é uma constante do gás,  $\rho$  é a densidade (massa/volume) e  $T$  é a temperatura do gás.

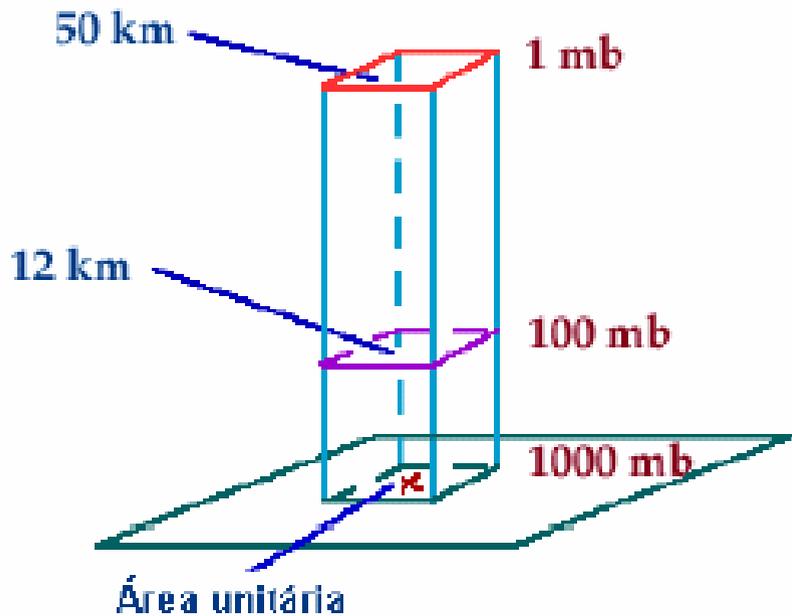
Dessa forma, a pressão da atmosfera pode ser alterada pelo aumento ou diminuição da densidade ou da temperatura.

Topo da atmosfera



Pressão atmosférica é definida como a força, por unidade de área, exercida contra a superfície pelo peso do ar acima dessa superfície.

Meteorologistas, em geral, usam como unidade de pressão atmosférica o milibar (mb) e a pressão média ao nível do mar é de 1013,25 milibares (hoje em dia usamos Pascal  $1 \text{ mb} = 100 \text{ Pa} = 100 \text{ N/m}^2$ )

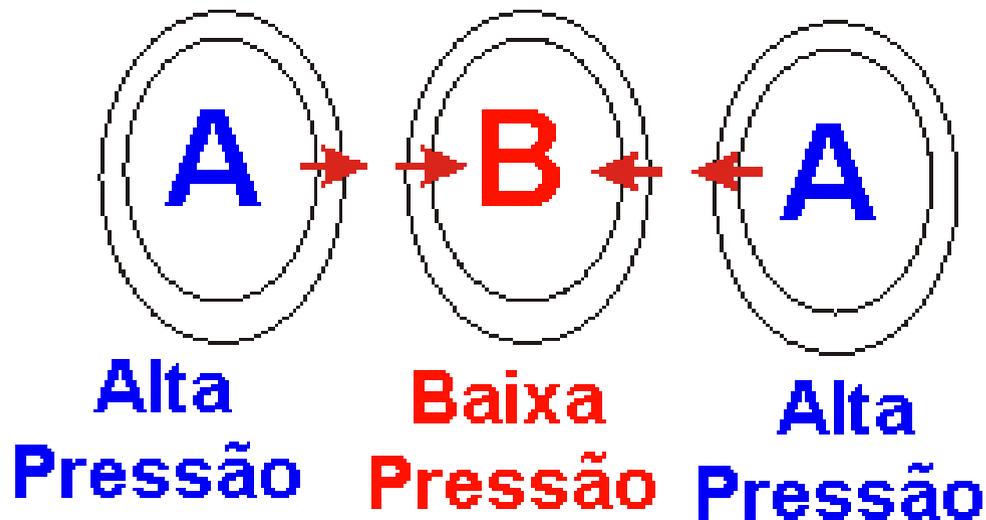


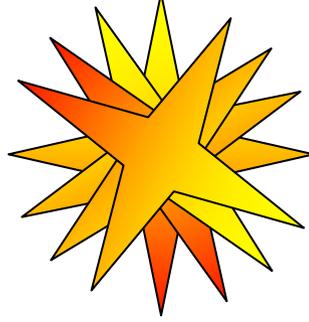
A pressão do ar é praticamente zero no topo da atmosfera e aumenta rapidamente em direção ao solo.

No desenho, a pressão no ponto X aumenta (diminui) quando o peso do ar acima aumenta (diminui).

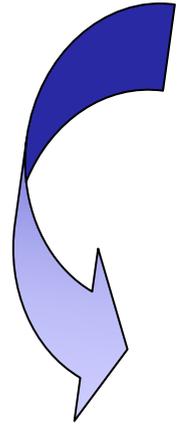
Normalmente com o aquecimento do ar ele se expande, diminuindo assim sua densidade.

Logo a diminuição de densidade provoca uma queda na pressão. Se esse efeito ocorrer em uma região e não ocorrer em outra região próxima, vai resultar no aparecimento de um gradiente de pressão. O gradiente de pressão, por sua vez, vai provocar uma circulação, com ar se dirigindo da região de alta pressão para a região de baixa pressão.

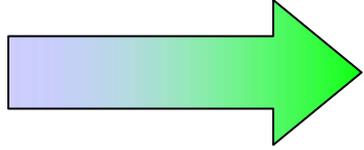




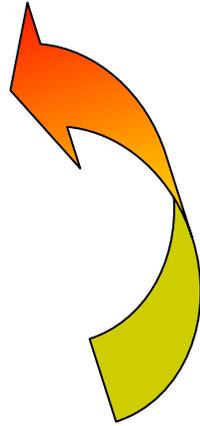
**Ar Frio sobre  
o mar  
Alta Pressão**



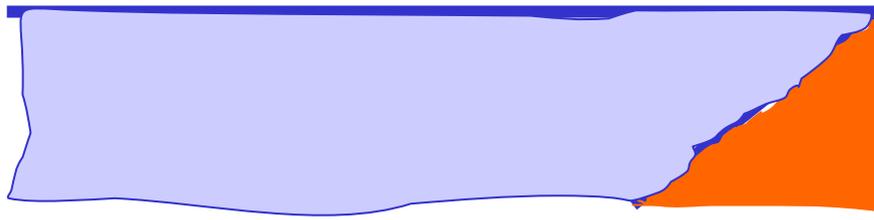
**Brisa**



**Ar Quente  
sobre a terra  
Baixa Pressão**



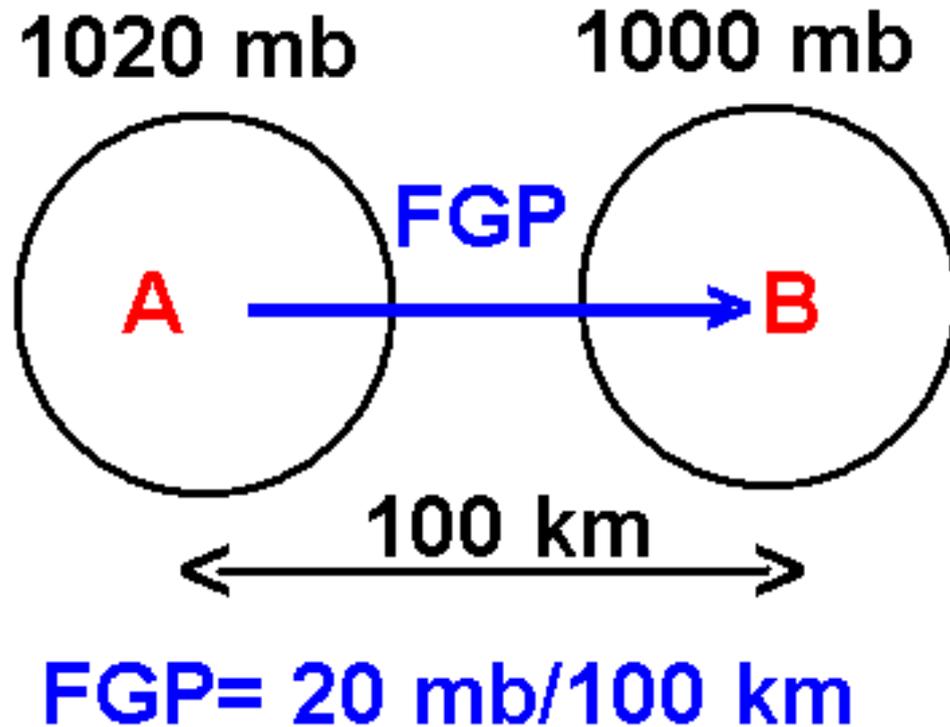
**Maritima**



**MAR**

**Continente**

A direção da **FGP** é sempre dirigida da **ALTA** pressão para a **BAIXA** pressão e sempre **PERPENDICULAR** às isóbaras (linhas de igual pressão). A magnitude depende do gradiente de pressão.



# ***FORÇA GRADIENTE VERTICAL DE PRESSÃO***

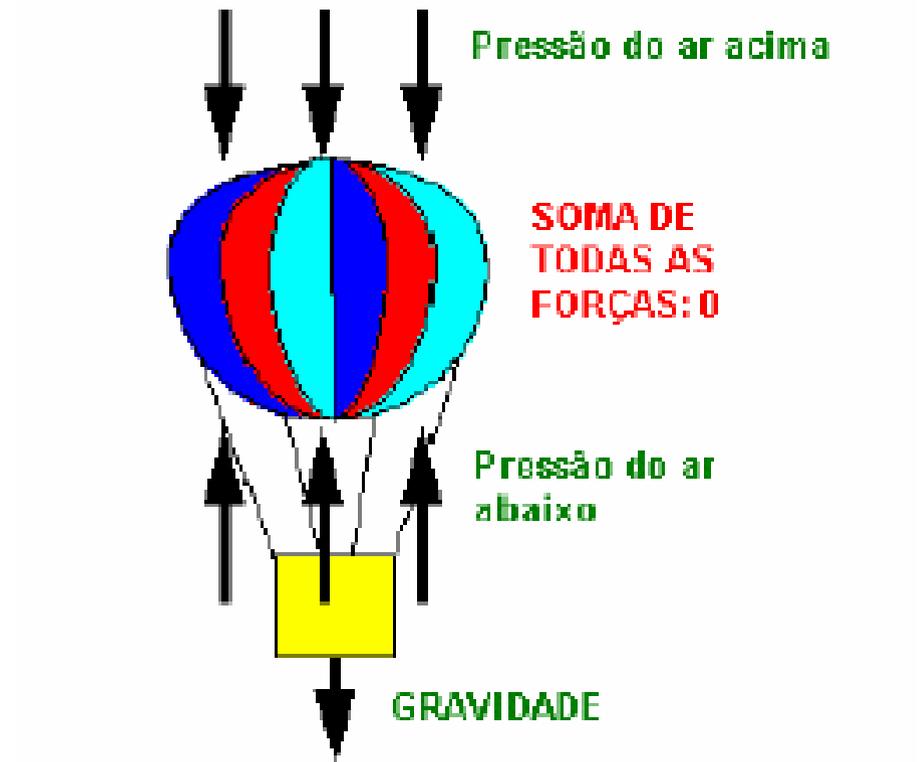
Note algo interessante relacionado a um objeto caindo: *ele passa através do ar.*

Mas se todos os corpos sentem a gravidade, o que está “segurando” o ar? Por que o ar não cai todo em direção ao solo?

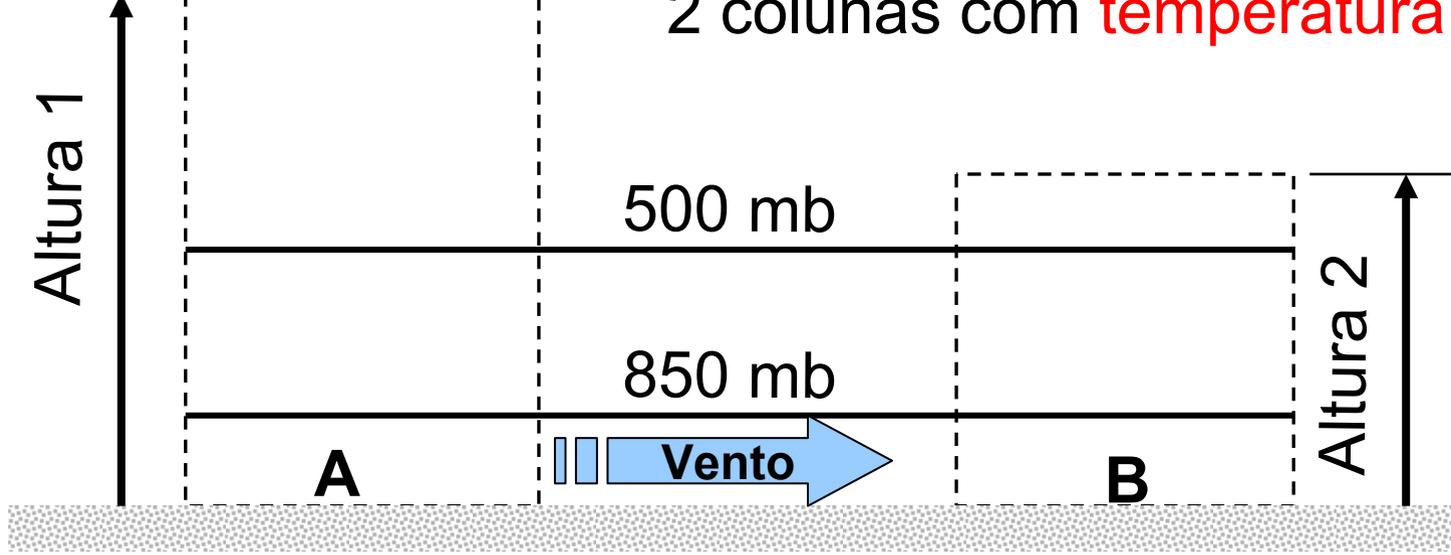
*Porque existe uma força que balanceia a gravidade, que é Força gradiente vertical de pressão.*

Imagine uma parcela de ar dentro de um balão imaginário - balão sem peso. A pressão do ar no topo do balão (parcela de ar) é só um pouco menor que a pressão do ar abaixo do balão, empurrando o balão para cima.

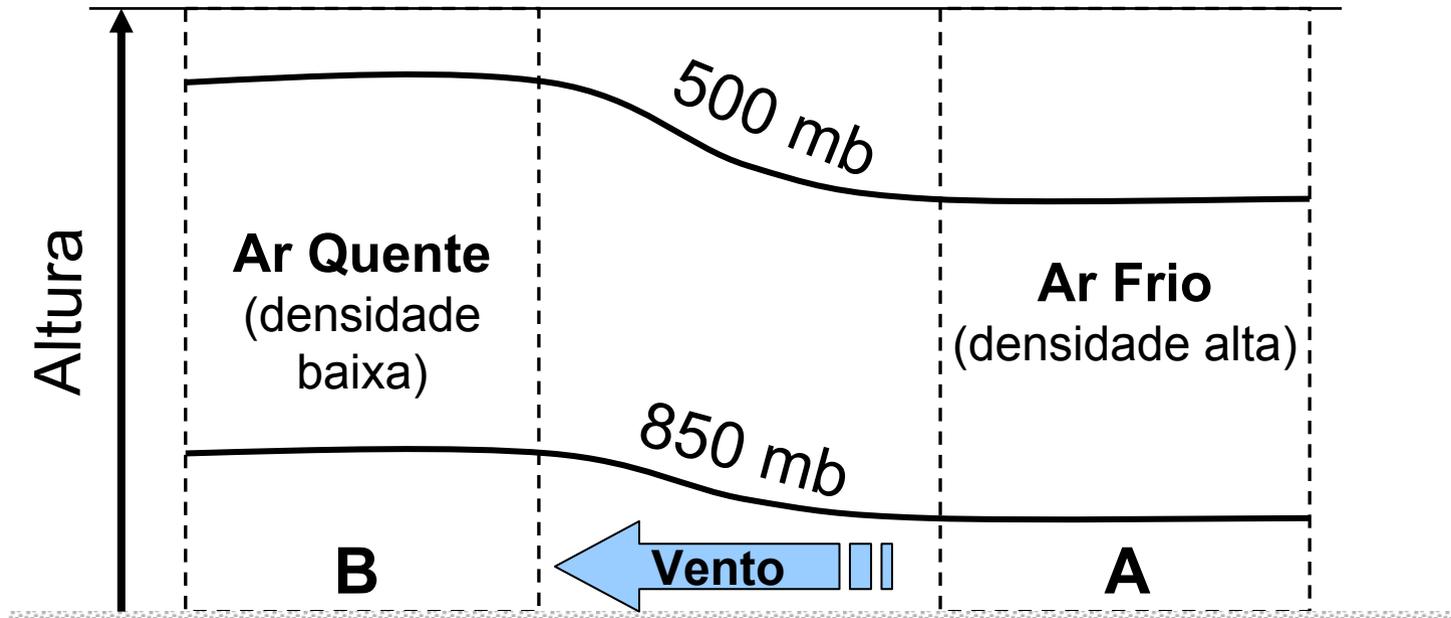
Esse “excesso” de força para cima é suficiente para balancear a gravidade, de tal forma que o balão flutua em equilíbrio, exatamente como o ar em volta dele.



2 colunas com temperatura igual



2 colunas com altura igual



# ***FORÇA GRADIENTE HORIZONTAL DE PRESSÃO***

A Força Gradiente Horizontal de Pressão (FGHP) é uma força bastante importante na atmosfera

Variações horizontais da pressão do ar são muito menores que as variações verticais de pressão (cerca de 10.000 vezes menores) mas não há uma força de gravidade horizontal para balancear a FGHP.

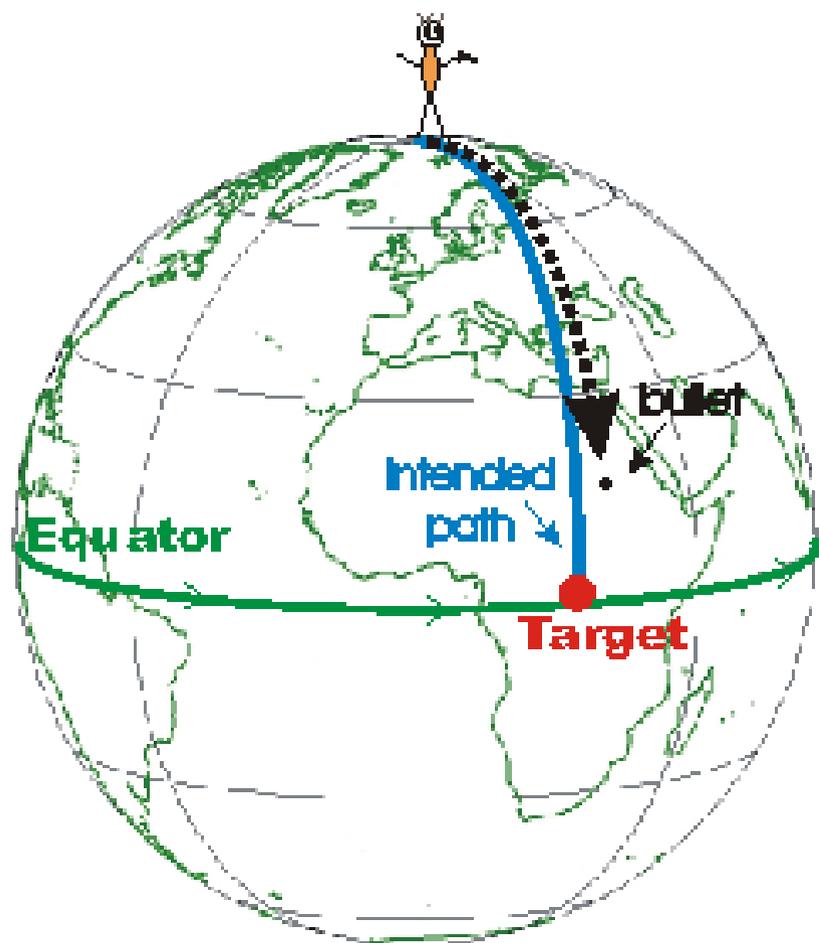
Dessa forma, a FGHP geralmente força o ar a se mover, gerando vento.



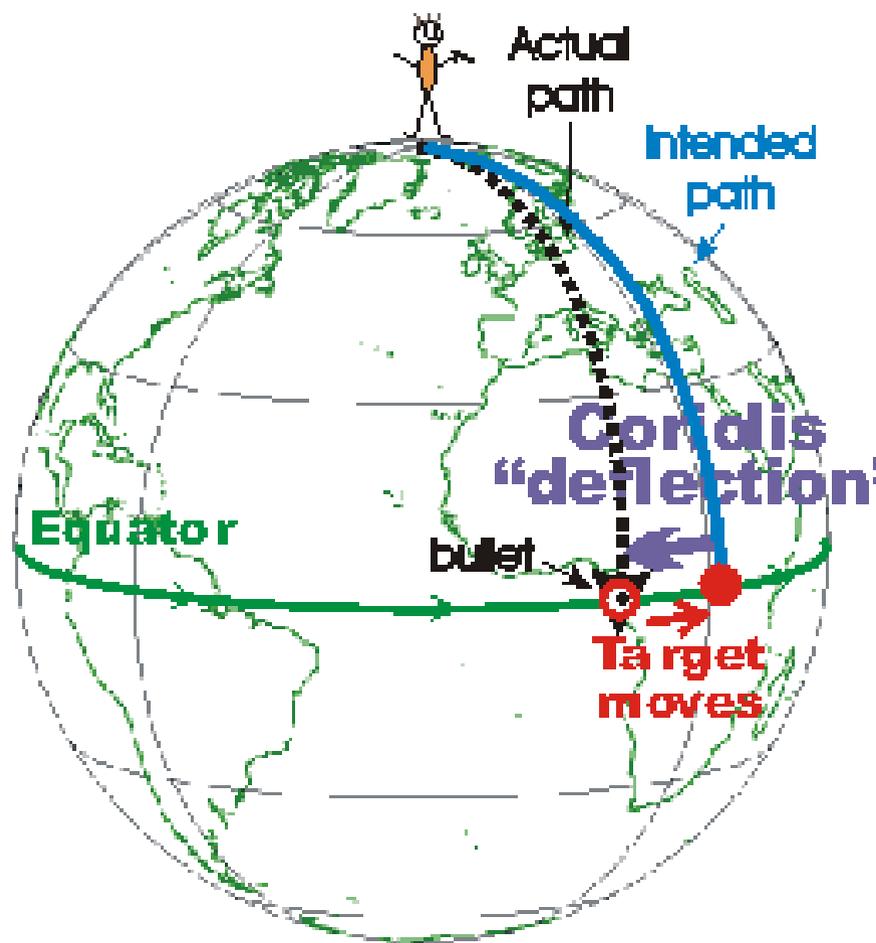
# FORÇA DE CORIOLIS

A força de Coriolis só aparece após a parcela de ar entrar em movimento e é devido ao fato de que os ventos (aqui entendido como o movimento do ar "em relação à Terra") são observados em um referencial fixo na superfície.

Como a terra é um referencial "não inercial", para um observador na superfície, isso vai implicar no aparecimento de uma "**força fictícia**", que é a força de Coriolis.

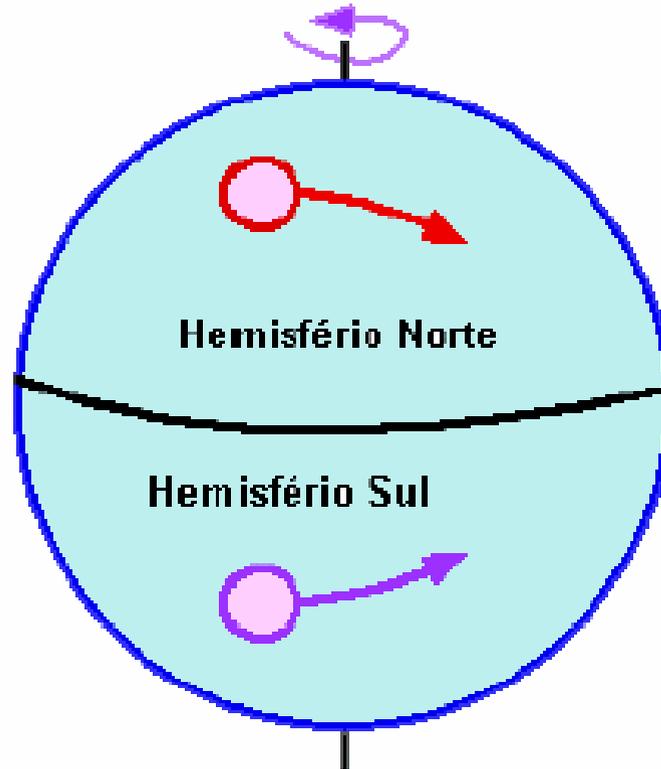


Rotating Earth



Rotating Earth

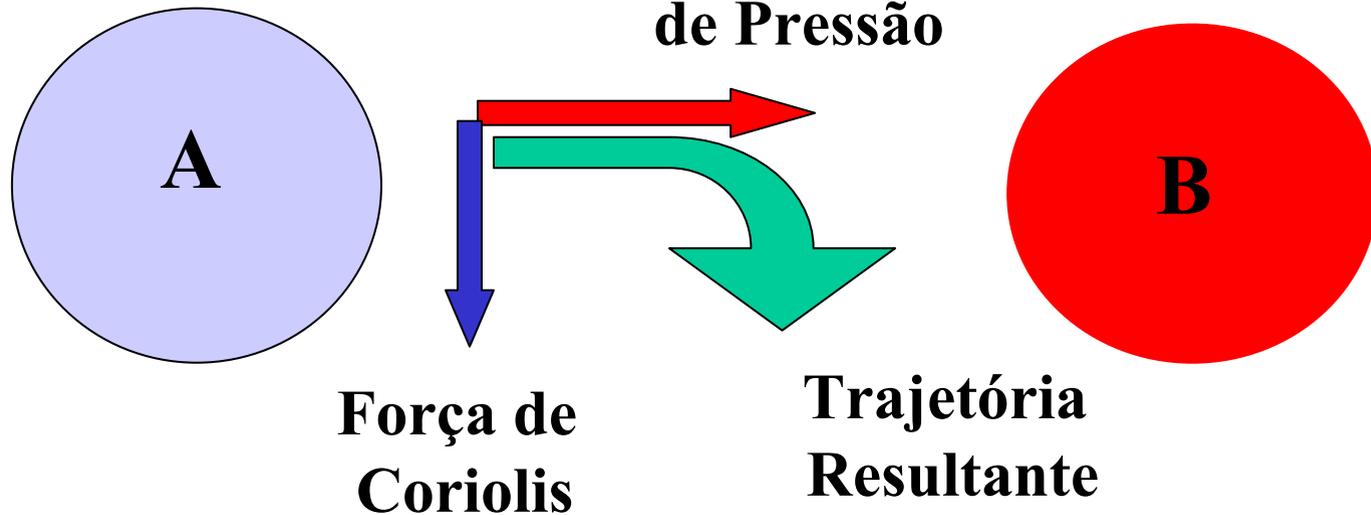
Rotação da terra



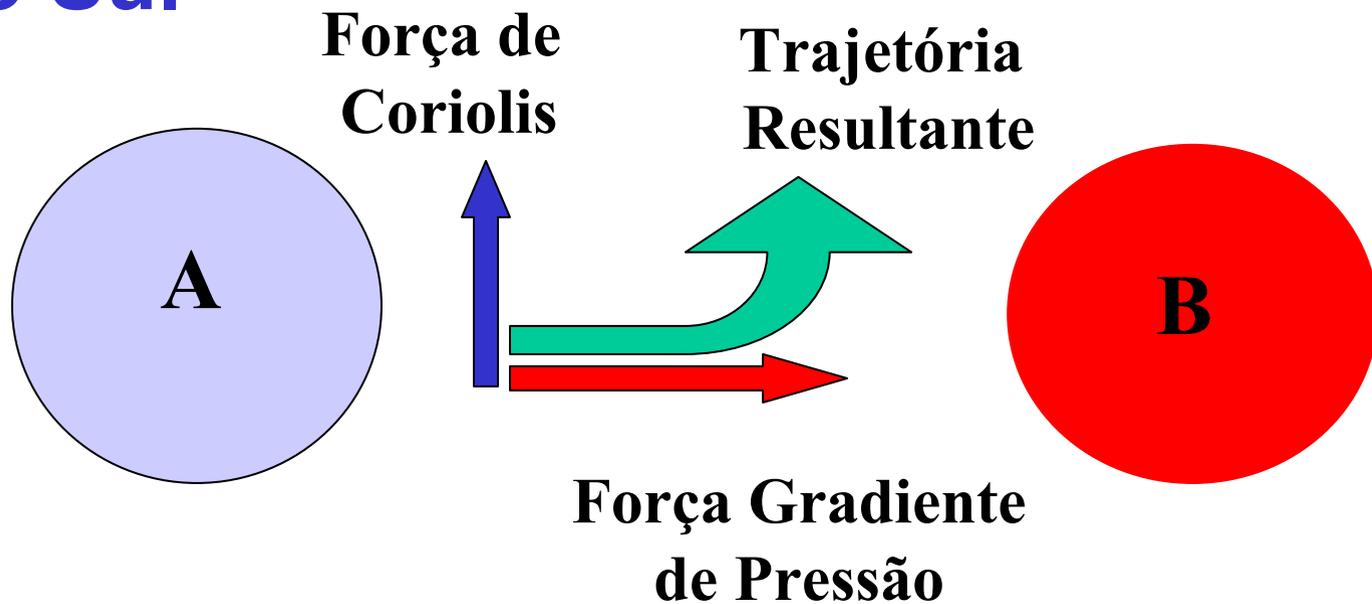
No Hemisfério Norte,  
objetos defletem para a  
direita

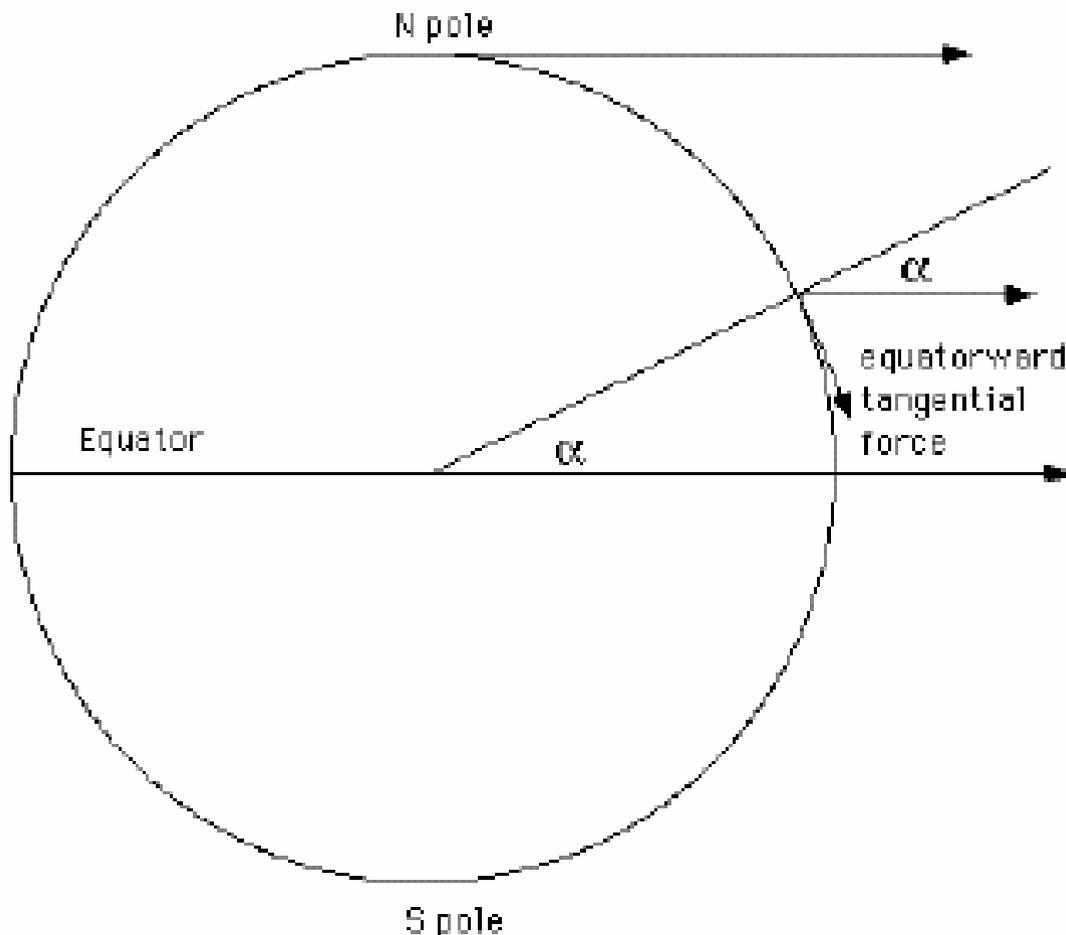
No Hemisfério Sul,  
objetos defletem para a  
esquerda

# Hemisfério Norte



# Hemisfério Sul





$$FC = 2\Omega Vg \sin \alpha$$

onde  $\Omega$  é a taxa de rotação da Terra,  $Vg$  é o vento geostrofico e  $\alpha$  é a latitude do local

**FIM**