

# METEOROLOGIA EM TÓPICOS

VOLUME 5

ORGANIZADORES:  
GLAUBER LOPES MARIANO  
ANDRÉ BECKER NUNES

Meteorologia em tópicos – volume 5

# **Meteorologia em tópicos:**

## **Volume 5**

**1ª Edição**

**Organizadores:**

Glauber Lopes Mariano

André Becker Nunes

**Pelotas-RS – Fevereiro de 2017**

**DR LTDA**

## Meteorologia em tópicos – volume 5

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação:

M589 Meteorologia em Tópicos: volume 5 /  
Organizado por Glauber Lopes Mariano e  
André Becker Nunes – Pelotas: Clube dos Autores,  
2017.

263p.: il. color.  
Vários autores/colaboradores

ISBN 978-85-68891-04-9

1. corrente de jato. 2. energia. 3. paleoclima.  
4. fotoquímica. 5. Modelagem química. I. Mariano,  
Glauber Lopes e Nunes, André Becker;  
organizadores.

Meteorologia em tópicos – volume 5

# **Meteorologia em tópicos:**

## **Volume 5**

**1ª Edição**

### **Organizadores:**

Glauber Lopes Mariano

André Becker Nunes

### **Autores /colaboradores:**

Ericka Voss Chagas Mariano

Glauber Lopes Mariano

Gustavo Copstein Cuchiara

Jonas da Costa Carvalho

Lucas Carvalho Vieira Cavalcante

Ludmila Pochman de Souza

Marcelo Felix Alonso

Maria Luciene Dias de Melo

Matheus José Arruda Lyra

Natalia Fedorova

Vladimir Levit

## Meteorologia em tópicos – volume 5

## SUMÁRIO

**APRESENTAÇÃO** ..... 7

**CAPÍTULO 1 - Corrente de jato e fenômenos associados**11

Natalia Fedorova

Matheus José Arruda Lyra

**CAPÍTULO 2 – Energia e Meteorologia** .....69

Vladimir Levit

Lucas Carvalho Vieira Cavalcante

**CAPÍTULO 3 - Paleoclimatologia: Reconstruindo o passado**..... 133

Maria Luciene Dias de Melo

**CAPÍTULO 4 - Reações fotoquímicas na troposfera e estratosfera**..... 171

Ericka Voss Chagas Mariano

Glauber Lopes Mariano

Marcos Antônio Lima Moura

**CAPÍTULO 5 - Modelagem numérica da qualidade do ar:  
Revisão de conceitos e aplicação no estado do Rio Grande  
do Sul ..... 201**

Marcelo Felix Alonso  
Jonas da Costa Carvalho  
Ludmila Pochman de Souza  
Gustavo Copstein Cuchiara

**Sobre os autores.....257**

## APRESENTAÇÃO

A série Meteorologia em tópicos chega ao volume 5 mantendo o seu propósito inicial de abordar assuntos das mais diversas áreas da Meteorologia com pouca bibliografia em língua portuguesa ou assuntos com pouco aprofundamento nas graduações em meteorologia diante do vasto conteúdo e tecnologias que devem ser estudadas em geral em 04 anos.

Lembro que o objetivo principal da série de livros *Meteorologia em tópicos* não é fazer com que alunos de graduação, de meteorologia ou outra área afim, assimilem o conteúdo apresentado nos volumes e se dêem por satisfeitos, mas sim estimular os estudos iniciais dos conteúdos apresentados e fornecer, sempre que possível, referências bibliográficas adicionais para prosseguimento desses estudos.

Esse volume chega nas mãos dos leitores envolvendo as áreas de meteorologia sinótica (corrente de jato), fontes de energias, paleoclimatologia, química da atmosfera (análise de reações fotoquímicas e modelagem numérica). Capítulos escritos por professores da Universidade Federal de Alagoas e da Universidade Federal de Pelotas bem como colaboradores destas e de outras instituições.

Citando como exemplo dois dos capítulos abordados nesse volume, referentes à paleoclimatologia e fontes de energia, percebe-se tratar de assuntos que, apesar de usualmente abordados dentro dos cursos de meteorologia em todo o

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Brasil possuem pouquíssimas informações, principalmente em nossa língua materna.

Por fim, espero que essa série de livro possua vida longa e se espalhe como fonte de referência para universidades e leitores em geral.

Boa leitura.

**Professor Dr. Glauber Lopes Mariano**  
**Instituto de Ciências Atmosféricas**  
**Universidade Federal de Alagoas**

## Meteorologia em tópicos – volume 5

***Política editorial:*** Os dados, conceitos e textos publicados, bem como a exatidão das referências bibliográficas, são de inteira responsabilidade dos autores.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

## CAPÍTULO 1

### CORRENTE DE JATO E FENÔMENOS ASSOCIADOS

*Natalia Fedorova*  
*Matheus José Arruda Lyra*

#### 1.1 Introdução

No século XX, durante a Segunda Guerra Mundial na região próxima ao Japão, vários pilotos em seus aviões relataram situações estranhas quando sentiram que entraram numa “parede” e o avião não avançava mais para frente (RIEHL, 1969). Somente com o recebimento e análise detalhada dos novos, nesta época, dados de radiossondagem foi resolvido o mistério destes acontecimentos. Estas “paredes” foram criadas pelas correntes de ventos muito fortes e os aviões foram “parados” em virtude de existência de ventos fortes na direção contrária do deslocamento do avião. Posteriormente estas foram chamadas *correntes de jato*.

Estas correntes são formadas em altos níveis de troposfera, próximo da tropopausa, devido a grandes gradientes meridionais de temperatura. Nestas regiões, a componente zonal do vento de oeste atinge seus valores máximos. Estas correntes acompanham intensas invasões de

ar frio e quente com zonas frontais e, conseqüentemente, são associadas com intensas mudanças de tempo. Assim, as correntes de jato têm papel muito importante para todos os tipos de previsões meteorológicas.

Neste capítulo são descritos os principais métodos da identificação das localizações das correntes de jato, tanto pelos dados convencionais quanto pelos dados de satélite. Depois serão apresentadas as informações sobre a estrutura e os tipos das correntes de jato. Estudos mostraram, também, que as correntes de jato influenciaram na formação de vários fenômenos adversos (DEAN, 1971; UCCELLINI e JOHNSON, 1979; UCCELLINI et al. 1987; CARLSON, 1991; BLUESTEIN, 1993; DJURIC, 1994). As ligações das correntes de jato com precipitações intensas no nordeste do Brasil (NEB) são discutidas em vários estudos, por exemplo, Pontes da Silva, 2008; Pontes da Silva et al., 2011; Milhahn Júnior, 2013. Por isso, no final do capítulo, serão relatados alguns fenômenos adversos para aviação, ligados com correntes de jato, e também, serão descritas as ligações destas correntes com complexos convectivos de mesoescala.

### **1.2 Definição e identificação de corrente de jato**

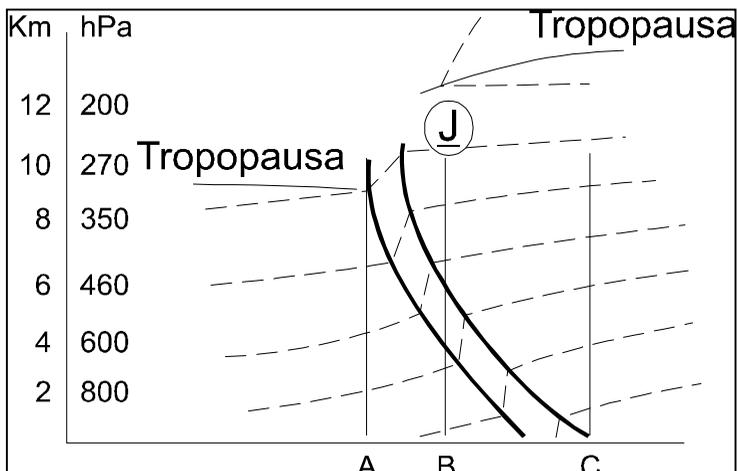
#### **1.2.1 Definição de corrente de jato**

A corrente de jato (CJ) é um escoamento do ar em altos níveis da troposfera e em baixos níveis da estratosfera, que apresenta velocidade de vento igual ou maior do que 30 m/s

(108 km/h; 58 nós). Nestas regiões a distribuição vertical de temperatura apresenta inversão, isoterma ou  $\gamma$  (lapse rate)  $< 0,2^{\circ}\text{C}$ . Os gradientes de vento na vertical são aproximadamente 5 m/s por 1 km e 10m/s por 100 km no plano horizontal. O comprimento da corrente de jato é de alguns milhares de quilômetros e sua profundidade de alguns quilômetros (ZVEREV, 1968; PALMEN e NEWTON, 1969; REITER, 1969; DJURIC, 1994; FEDOROVA , 1999).

A corrente de jato se localiza próximo da região inferior da tropopausa, entre a divisão de massa de ar quente e fria, na parte acima da zona frontal (Figura 1). Esta figura mostra a zona de forte baroclínica (Mudança de vento geostrófico com altura, sendo assim, a força de baroclinia está relacionada com a força dos gradientes de temperatura horizontais) na troposfera entre os pontos A e C, zona frontal e localização do centro do eixo da corrente de jato (C), situada sobre a vertical (B).

A linha do vento máximo na parte central da corrente de jato chama-se *eixo da corrente de jato*. A superfície que atravessa os pontos das seções verticais do vento máximo chama-se *superfície do vento máximo*.



**Figura 1.** Seção vertical de temperatura (linhas tracejadas) com localização da superfície frontal (duas linhas grossas) e cento do eixo da corrente de jato (C).

**Fonte:** Palmen e Newton (1969).

### 1.2.2 Identificação da corrente de jato nos mapas de velocidade do vento

A Corrente de jato se identifica nos mapas de velocidade do vento pela área com velocidades iguais ou maiores do que 30 m/s. Como a altura da tropopausa muda de acordo com latitude, o eixo da corrente de jato varia de localização referente à uma determinada altura. A tabela 1 apresenta estas alturas em quilômetros. Além disso, nesta tabela são observados em quais níveis de pressão e temperatura potencial podem ser encontrados os eixos da corrente de jato. Ou seja, na região equatorial, para localização de corrente de

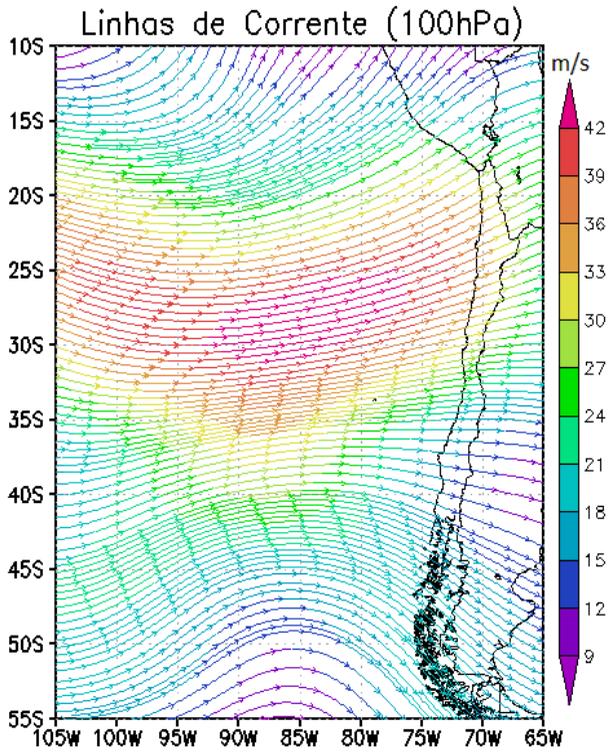
jato, devem ser utilizados os mapas de vento no nível de 100 hPa ou 390K. Todavia, nas regiões polares, as correntes de jato serão vistas nos mapas de vento no nível de 300 hPa ou 310K.

**Tabela 1.** Alturas do eixo de corrente de jato em diferentes latitudes em km, hPa e temperatura potencial ( $\Theta$ ).

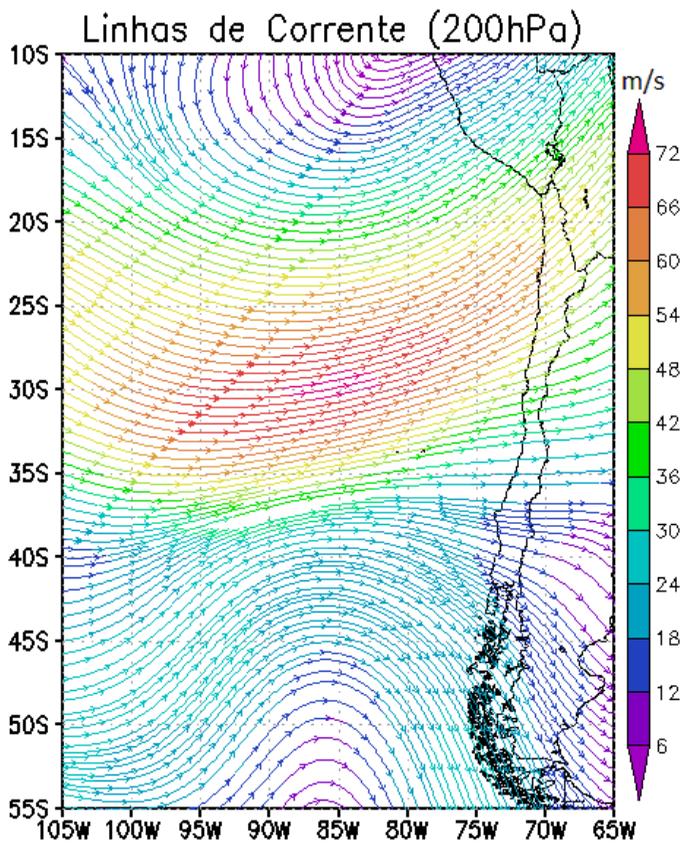
**Fonte:** Fedorova (2008).

| <b>Alturas</b> | <b>Região equatorial</b> | <b>Latitudes medias</b> | <b>Regiões polares</b> |
|----------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| H (km)         | 20                       | 13                      | 9                      |
| P (hPa)        | 100                      | 200                     | 300                    |
| $\Theta$ (K)   | 390                      | 350                     | 310                    |

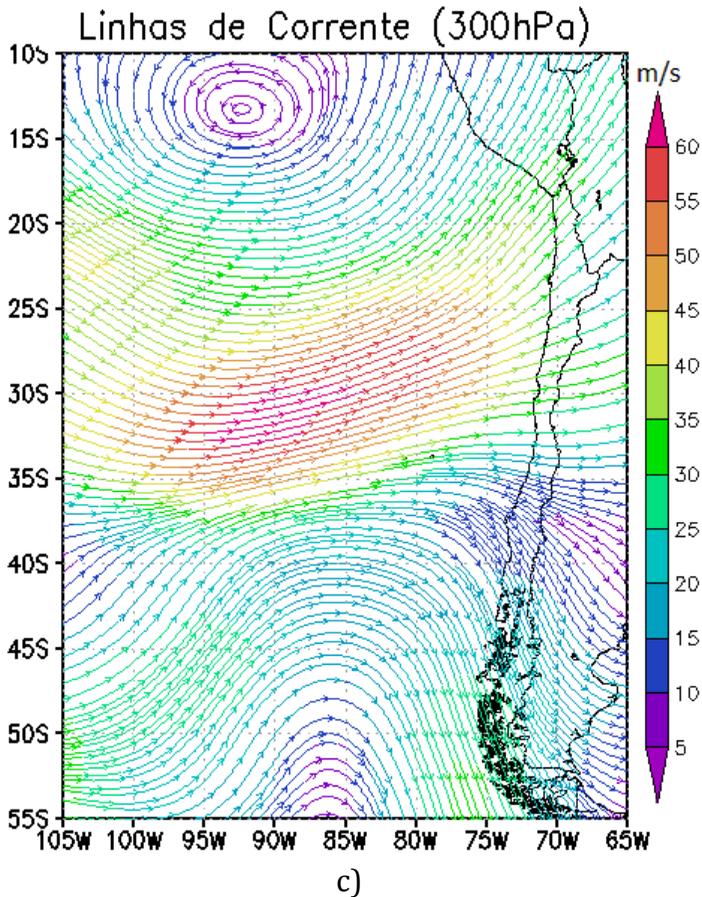
A localização da corrente de jato, mas nos níveis de 100, 200 e 300 hPa no dia 29 de maio de 2016 às 06UTC está apresentada na Figura 2. Pode ser visto que a corrente de jato, observada no nível de 300 hPa, encontra-se entre as latitudes de 38 e 23°S, aproximadamente. No nível de 200 hPa entre as latitudes de 38 e 20°S e no nível de 100 hPa entre as latitudes de 35 e 18°S.



a)



b)

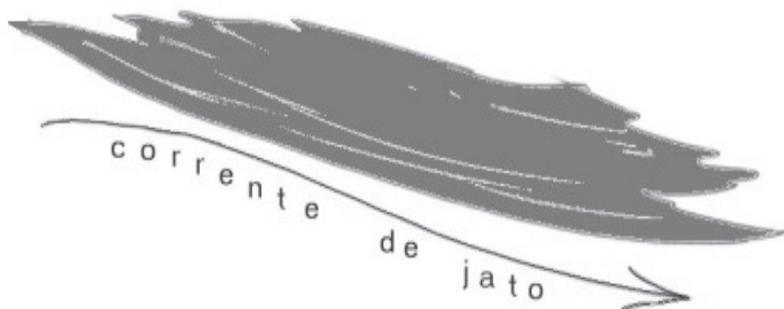


**Figura 2.** Mapas de linhas de corrente nos níveis de 100 (a), 200 (b) e 300 hPa (c) com correntes de jato.

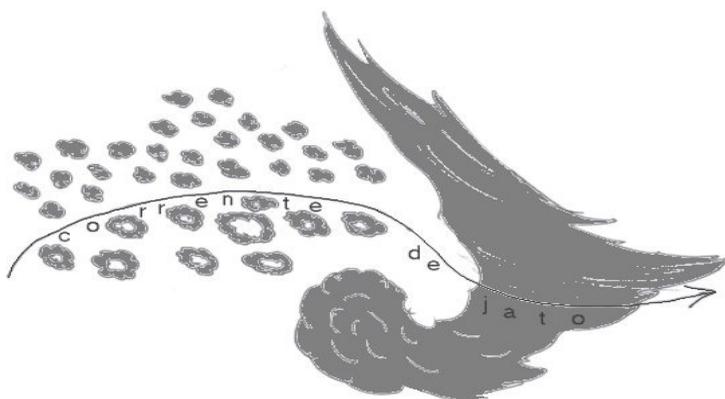
### **1.2.3 Identificação da corrente de jato nas imagens de satélite**

As correntes de jato nas imagens de satélite são identificadas pelo tipo de nebulosidade e pela mudança do tipo de nebulosidade. As seguintes características da nebulosidade são as principais para a identificação das correntes de jato:

- Grandes regiões de nuvens Cirrus (Ci), escudos de Ci com bordas agudas;
- Estrutura linear de nuvens Ci, estriadas ao longo da corrente de jato;
- Estrutura linear perpendicular à corrente de jato, faixas transversais dentro das faixas de Ci;
- Mudança do tipo de nebulosidade e/ou células convectivas nos dois lados da corrente de jato;
- Linhas de sombra (imagem no canal visível) prolongadas ao longo da corrente de jato.



a) Posição da corrente de jato relativamente às grandes regiões de nuvens Ci, no Hemisfério Sul (HS).



b) Posição da corrente de jato no HS relativamente ao vórtice ciclônico e mudança do tipo de células.

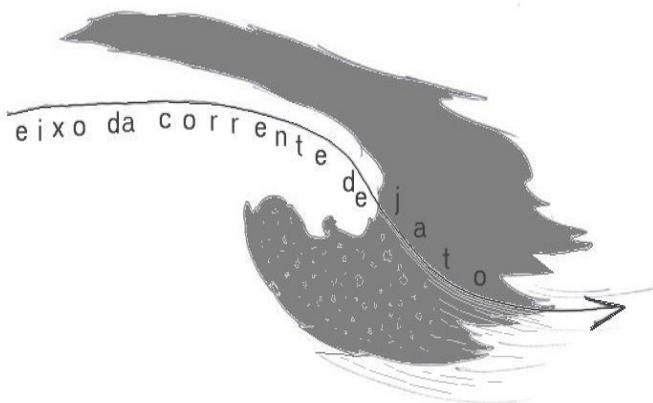
- No lado quente: células abertas e as nuvens Cumulus (Cu) e Cumulonimbus (Cb);

## Meteorologia em tópicos – volume 5

- No lado frio: células fechadas e as nuvens Cirrostratus (Cs) e Altostratus (As).

c) Posição da corrente de jato no vórtice ciclônico do HS e mudança de textura das nuvens nos dois lados da corrente de jato:

- No lado equatorial: textura deslustrada;
- No lado polar: textura granular.



**Figura 3.** Esquemas da nebulosidade nas imagens de satélite para a identificação das correntes de jato.

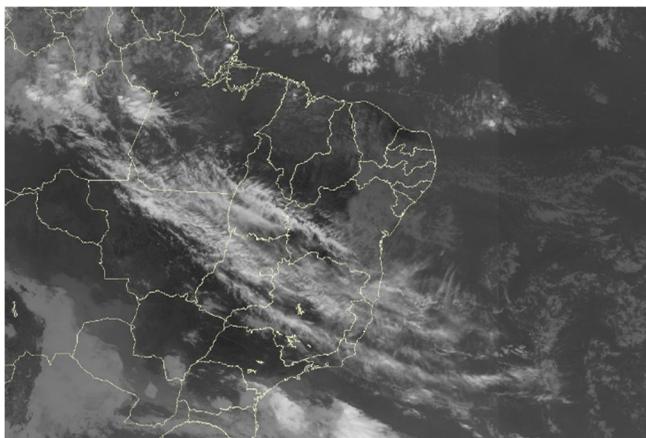
**Fonte:** Fedorova (2008).

A seguir são apresentados exemplos das diversas situações das correntes de jato nos mapas das linhas de

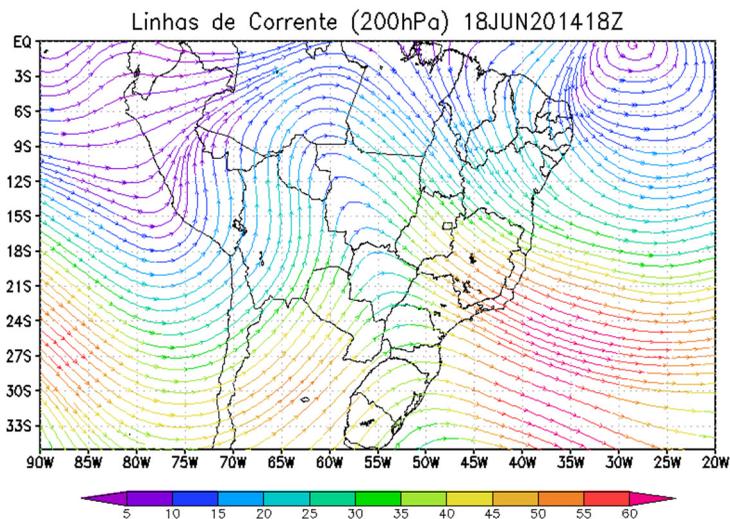
## Meteorologia em tópicos – volume 5

corrente no nível de 200 hPa e imagens de satélite no canal infravermelho na América do Sul e oceanos adjacentes.

A corrente de jato, identificada pela imagem de satélite no dia 18/06/2014 15:00UTC (Figura 4a), cruza o Nordeste do Brasil (NEB) no sul da Bahia. As linhas de corrente, neste caso um pouco mais tarde, às 18 UTC, confirmam esta localização da corrente com núcleo deslocado para o oceano (Figura 4b). A nebulosidade da corrente de jato é identificada pela estrutura linear de nuvens Ci, estriadas ao longo e perpendicular (faixas transversais dentro das faixas de Ci) a corrente de jato.



a)



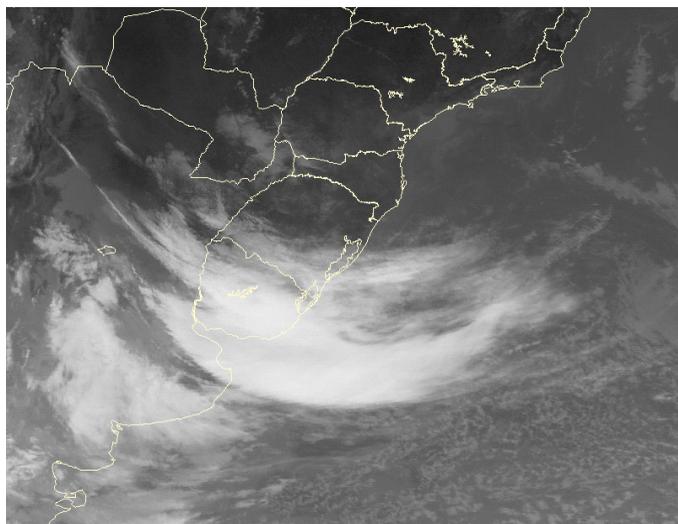
b)

**Figura 4.** Posição da corrente de jato relativamente às grandes regiões de nuvens *Ci*, no HS, no dia 18/06/2014. a) Imagem do canal IR às 15:00 UTC e b) Mapa das linhas de corrente em 200hPa às 18:00UT.

**Fonte:** Autores (2016).

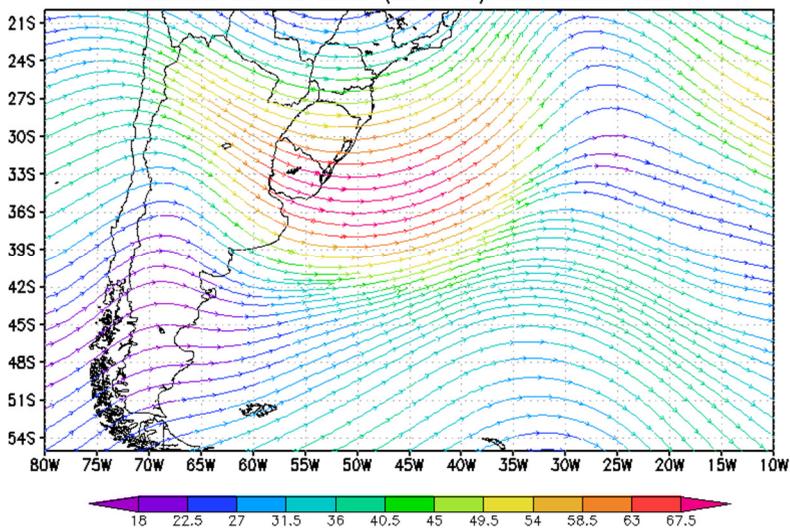
A situação com a corrente de jato no sul do Brasil está apresentada na Figura 5a para o dia 25/07/2016. A nebulosidade da corrente de jato com curvatura anticiclônica é vista bem acentuada com escudos de *Ci* e bordas agudas sobre o sul do Rio Grande do Sul e Uruguai. As linhas de correntes confirmam a posição da corrente de jato nesta região. As nuvens *Ci* na imagem de satélite estão estriadas ao longo da corrente de jato.

# Meteorologia em tópicos – volume 5



a)

Linhas de Corrente (200hPa) 25JUL201612Z

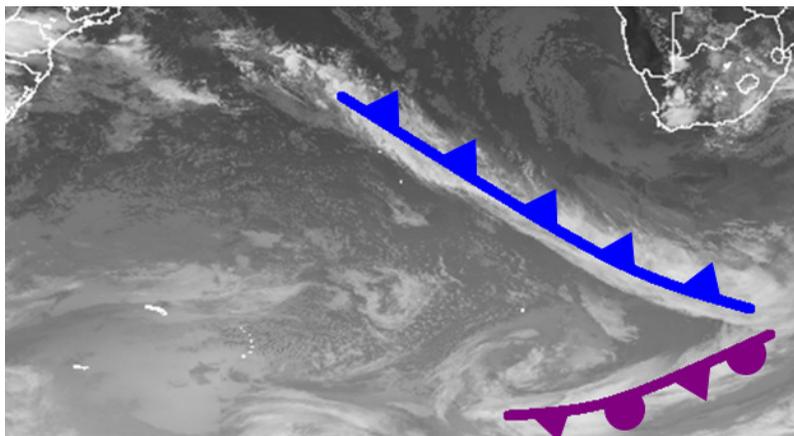


b)

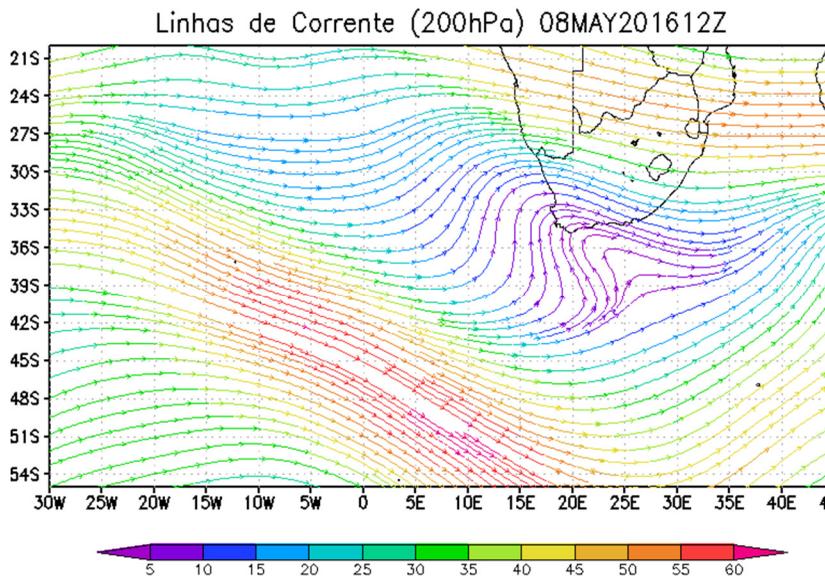
**Figura 5.** Posição da corrente de jato relativamente às grandes regiões de nuvens *Ci*, no HS, no dia 25/07/2016. a) Imagem do canal IR às 15:00 UTC e b) Mapa das linhas de corrente em 200hPa às 12:00UTC.

**Fonte:** Autores (2016).

A corrente de jato ao sul da África no dia 08/05/2016 é vista ao longo da frente fria e na imagem de satélite está identificada pela borda nítida da nebulosidade no lado sul da banda das nuvens. As nuvens *Ci* estão estriadas ao longo da corrente de jato (Figura 6a) e a posição da corrente de jato é confirmada pelo mapa das linhas de corrente (Figura 6b).



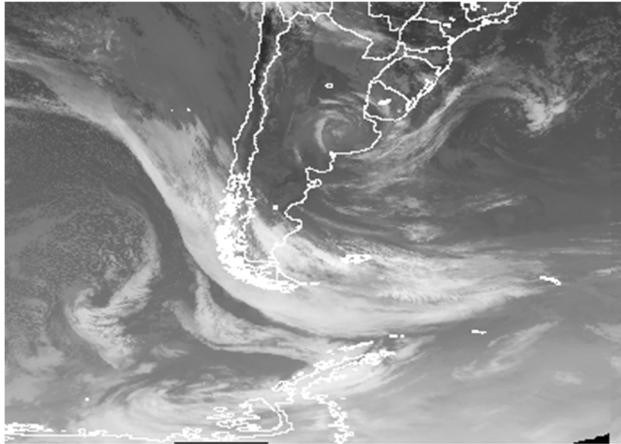
a)



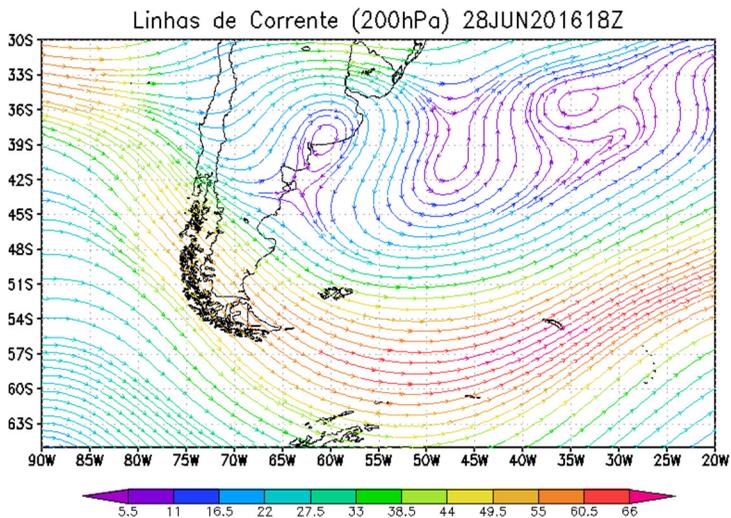
b)

**Figura 6.** Posição da corrente de jato no HS relativamente ao vórtice ciclônico e mudança do tipo de células no dia 08/05/2016. a) Imagem do canal IR às 14:45 UTC e b) Mapa das linhas de corrente em 200hPa às 12:00UTC.

A corrente de jato no sul da América do Sul e oceanos adjacentes no dia 28/06/2016 pode ser identificada pela borda nítida da nebulosidade de Ci com bordas agudas e com curvatura anticiclônica (Figura 7).



a)

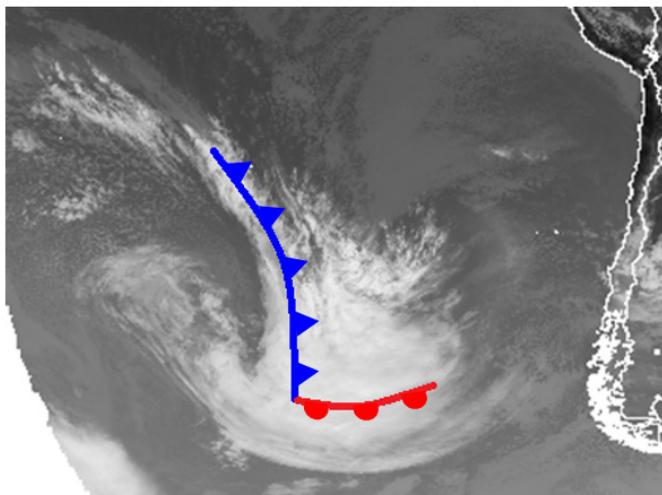


b)

**Figura 7.** Posição da corrente de jato no HS no dia 28/06/2016. a) Imagem do canal IR às 15:00 UTC e b) Mapa das linhas de corrente em 200hPa às 18:00UTC.

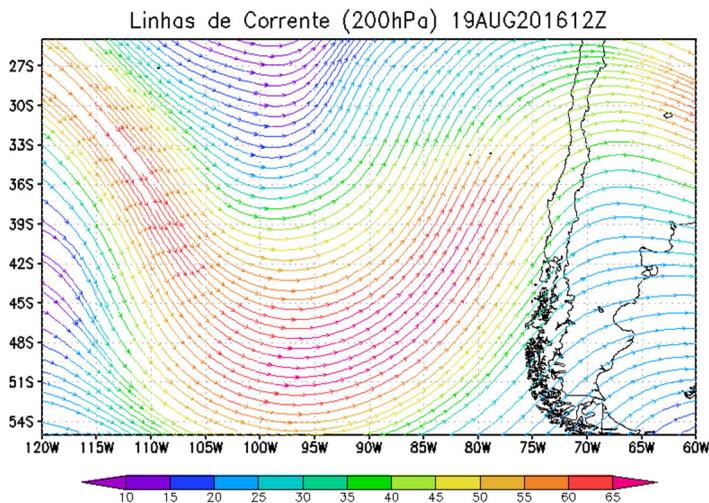
## Meteorologia em tópicos – volume 5

A corrente de jato no ciclone baroclínico extratropical no Sul do Pacífico no dia 19/08/2016 (Figura 8a) na região da frente quente coincide com a região de grande quantidade das nuvens Ci com bordas agudas com curvatura anticiclônica. Na frente fria, a corrente de jato muda sua curvatura para ciclônica, o que é visto tanto nas imagens de satélite quando no mapa das linhas de corrente. Próximo do ponto de oclusão, a corrente de jato separa a frente oclusa do setor quente do ciclone. Esta separação é vista pela mudança da textura das nuvens com nebulosidade granulosa com nuvens convectivas na frente oclusa (parte oeste do ciclone).



a)

## Meteorologia em tópicos – volume 5



b)

**Figura 8.** Posição da corrente de jato no vórtice ciclônico do HS e mudança de textura das nuvens nos dois lados da corrente de jato para o dia 19/08/2016. a) Imagem do canal IR às 15:00 UTC e b) Mapa das linhas de corrente em 200hPa às 12:00UTC.

**Fonte:** Autores (2016).

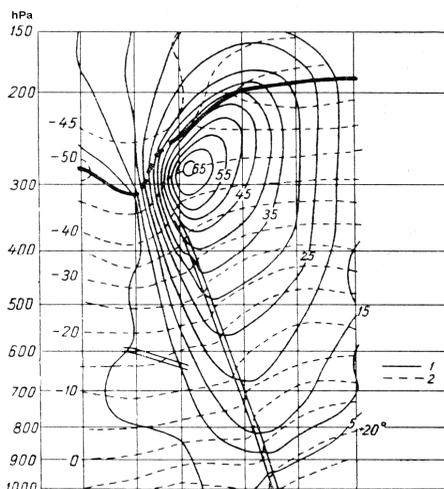
### 1.3 Estrutura de corrente de jato

O esquema da seção vertical em torno do eixo da corrente de jato mostra a estrutura assimétrica dos campos de vento e de temperatura em torno do eixo (Figura 9). As isotermas mostram a queda brusca de temperatura ao longo da superfície frontal do lado da massa de ar quente (no lado direito da figura) para o lado da massa de ar fria (no lado

esquerdo da figura). Próximo da tropopausa, a distribuição de temperatura é mais complicada, porque a altura da tropopausa no ar frio é menor do que no ar quente. Nos níveis em que a troposfera está em uma massa de ar e a estratosfera em outra, ocorre o nivelamento da temperatura (Figura 9: Entre 200-250 hPa; Figura 10: Aproximadamente em 280 hPa) e nos níveis mais altos o gradiente de temperatura inverte seu sinal).

A zona frontal no ar superior caracteriza-se pelo aumento da velocidade do vento até o nível da mudança do gradiente horizontal de temperatura, nível de nivelamento de temperatura. Próximo deste nível, forma-se a zona de máxima velocidade do vento e a corrente de jato. Ou seja, o eixo da CJ localiza-se no nível onde as isotermas são horizontais. Na figura 9 o eixo da corrente de jato está localizado na altura de 280 hPa e a máxima velocidade de vento atinge 65 m/s. A área de corrente de jato, ou área com velocidade de vento maiores do que 30 m/s, se estende entre os níveis de 180 hPa e 490 hPa. Ou seja, o escoamento do ar da corrente de jato se localiza entre estes níveis. O eixo da corrente de jato fica no lado quente da zona frontal no ar superior, próximo e sob a tropopausa.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

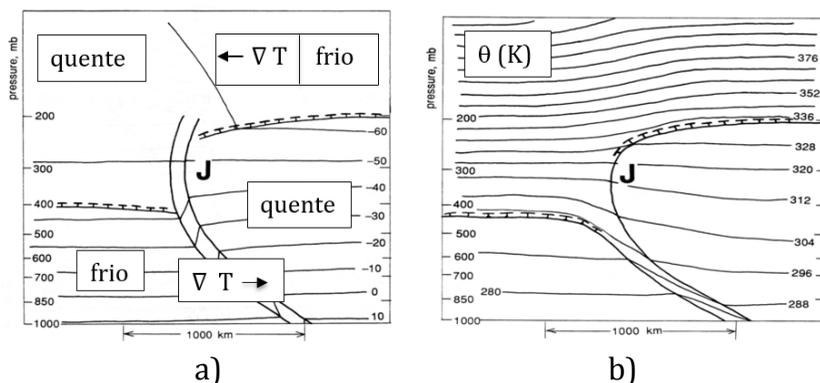


1. — Isotacas (m/seg);
2. - - - Isotermas (°C);
3. — Tropopausa;
4. Superfície frontal (Linhas paralelas)

**Figura 9.** Seção vertical em torno do eixo da corrente de jato para o Hemisfério Norte na latitude de 50°N.

**Fonte:** Zverev (1968).

Na figura 10, o gradiente do vento é visto pelo gradiente das isotacas; no lado polar (com massa mais fria) este gradiente é maior do que no lado equatorial (com massa mais quente). Perto desta região, com elevados gradientes de velocidade de vento, localiza-se a tropopausa; mas nesta região ela não é bem visível no campo de temperatura e pode ser chamada como interruptora de tropopausa (na figura esta área é mostrada como uma linha grossa tracejada).



**Figura 10.** Sessões verticais de temperatura (a) e temperatura potencial (b) em torno do eixo da corrente de jato.

**Fonte:** Adaptado de Djuric (1994).

A ligação entre o ar da estratosfera e o da troposfera pode ser visto pela vorticidade potencial ( $P$ ), calculada pela seguinte equação em função de  $z$  (SHAKINA, 1985; DJURIC, 1994):

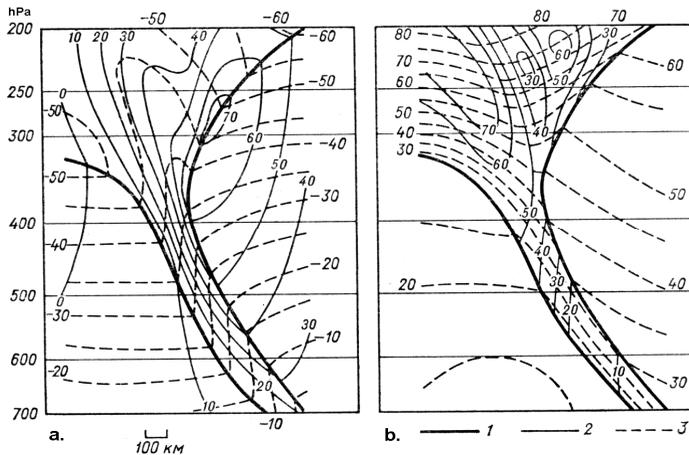
$$P = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial z} (\zeta + f) \quad (1)$$

Onde  $\zeta$  é a vorticidade relativa,  $\theta$  é a temperatura potencial,  $f$  é o parâmetro de Coriolis e  $\rho$  a densidade de ar. A unidade da vorticidade potencial é PVU (onde  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ). Os valores próximos de 1,5 (Entre 0 e 2) PVU, são

## Meteorologia em tópicos – volume 5

geralmente associados ao ar da troposfera e valores maiores com ar da estratosfera.

A figura 11 apresenta as sessões verticais perpendiculares ao eixo da corrente de jato em relação à tropopausa.



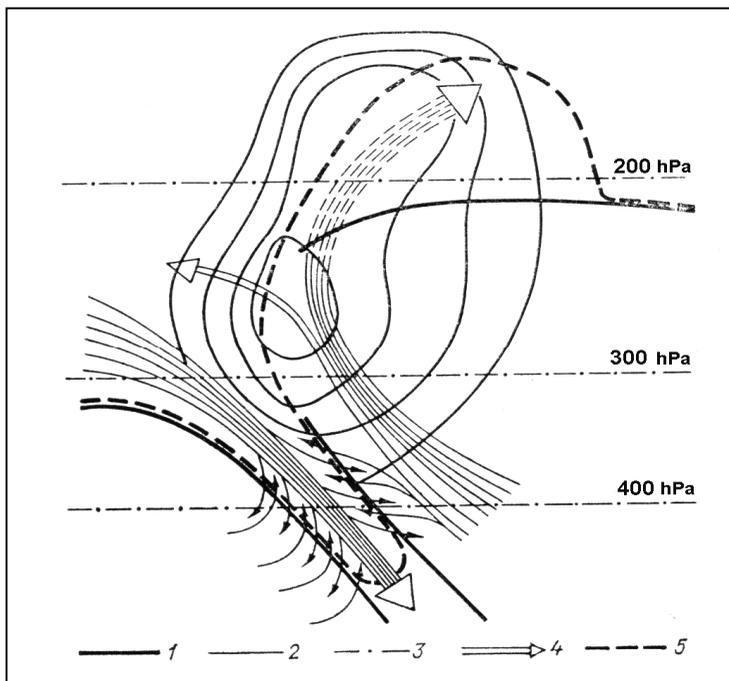
1. — Superfície frontal e tropopausa;
- a) 2. — Isotacas (nós); 3. ---- Isotermas ( $^{\circ}\text{C}$ )
- b) 2. — Isolinhas ( $\Theta-300$ )  $^{\circ}\text{K}$ ;
3. ---- Isolinhas de vorticidade potencial ( $10^6\text{Ks}^{-1}\text{hPa}$ ).

**Figura 11.** Sessões verticais perpendiculares ao eixo da corrente de jato.

**Fonte:** Shakina (1985).

Os resultados da análise isentrópica mostram que os movimentos descendentes ocorrem dentro da superfície

frontal (Figura 12). Os movimentos ascendentes são observados no lado quente da corrente de jato. Lembrando que a vorticidade potencial separa o ar de troposfera da estratosfera, a mesma figura mostra o levantamento da tropopausa no lado quente (SHAKINA, 1985). Este processo pode ser visto pela posição das isolinhas de vorticidade potencial. Ou seja, as zonas frontais, junto com correntes de jato, contribuem para troca de ar entre troposfera e estratosfera.



**Figura 12.** Sessão vertical de corrente de jato e movimentos verticais. (continua na próxima página)

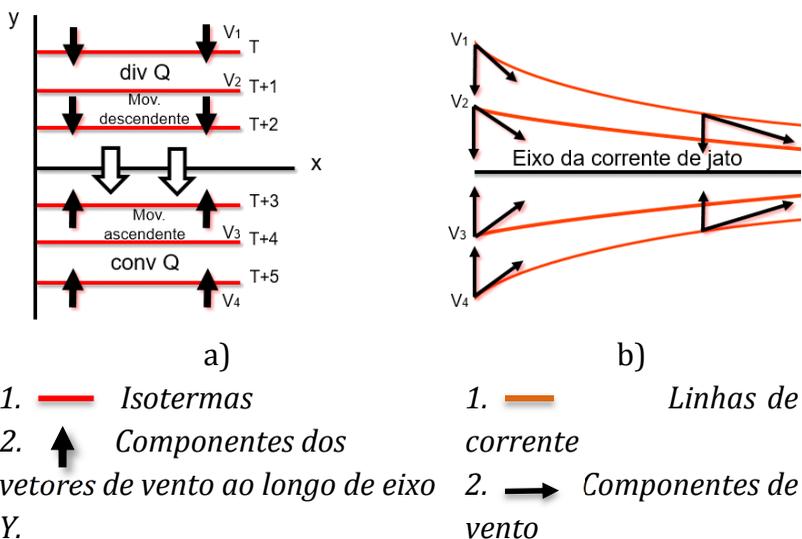
1. — *Tropopausa e fronteiras da superfície frontal.*
2. — *Isotacas.*
3. - . - *Isóbaras.*
4.  $\implies$  *Direções das circulações transversais.*
5. --- *Isolinhas de vorticidade potencial P.*

**Fonte:** Shakina (1985).

#### 1.4 Circulações na corrente de jato

A análise dos movimentos verticais na entrada da corrente de jato, onde é observada a confluência de correntes de ar, mostra os movimentos verticais diferentes nos dois lados do eixo de corrente de jato (Figura 13).

A figura 13a mostra a componente Y do vetor do vento V e vetor Q. A figura 13b mostra as linhas de corrente para o mesmo caso de variação de temperatura e vento. A confluência de Q provoca os movimentos ascendentes, já a difluência de Q, os movimentos descendentes (BLUESTEIN, 1993; DJURIC, 1994). Por isso, nas figuras 13 e 14 são vistos os movimentos descendentes no lado frio da corrente de jato e os movimentos ascendentes no lado quente. Na saída da corrente de jato, devido da divergência das correntes de ar, os movimentos verticais são contrários.



**Figura 13.** Sessões horizontais na entrada da corrente de jato.

**Fonte:** Adaptado de Djuric (1994).

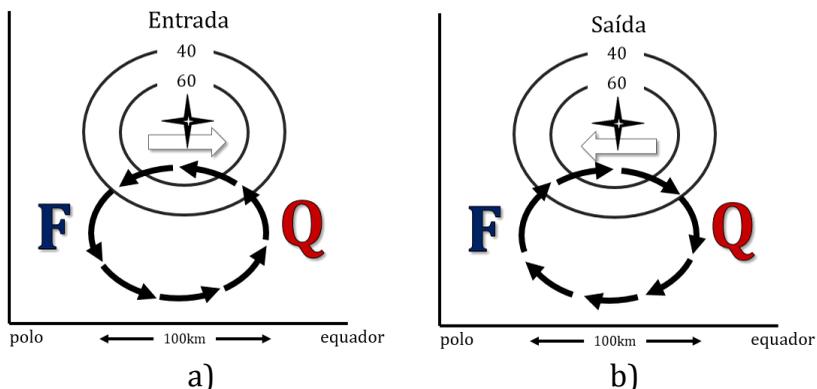
O movimento nas regiões da entrada e saída da corrente de jato tem alguma componente ageostrófica devido às mudanças de velocidade. Na entrada da corrente de jato, há convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis; há uma aceleração ageostrófica da parcela de ar, pois a mesma se move para o centro do jato implicando numa componente ageostrófica do vento negativa, sendo direcionada para direção do polo. Se uma parcela de ar entra em um eixo da corrente de jato, a velocidade do vento aumenta e surge a componente ageostrófica. Esta parcela

ganha energia cinética e perde energia potencial. Por isso, a componente ageostrófica está dirigindo a parcela para uma altura menor e a parcela está saindo do eixo do jato. Fora do eixo de jato a velocidade do vento diminui, a parcela perde energia cinética e ganha energia potencial, e a componente ageostrófica dirige a parcela para as alturas maiores.

Na região da saída do jato, havendo convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, ocorre desaceleração ageostrófica, a parcela de ar recebe uma componente ageostrófica positiva direcionada para o equador.

A circulação na entrada do jato é termicamente direta (Figura 14a): com movimento ascendente de ar quente no lado equatorial e movimento descendente de ar frio no lado polar. A circulação térmica na saída do jato é indireta (figura 14b): movimento descendente de ar quente no lado equatorial e movimento ascendente de ar frio no lado polar.

Na entrada da corrente de jato ocorre uma aceleração da parcela de ar implicando numa componente ageostrófica do vento negativa, sendo direcionada para menores alturas geopotenciais em direção ao polo (Figura 15a).

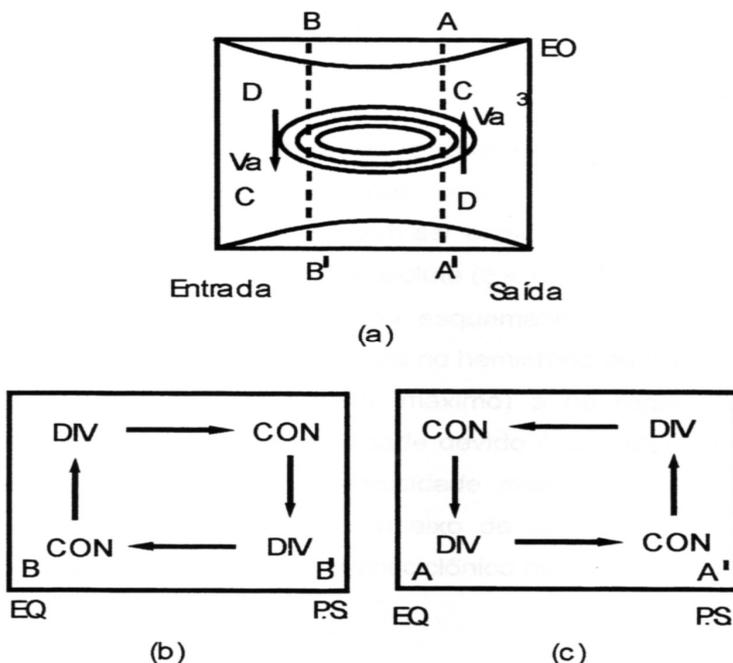


**Figura 14.** Sessões verticais de movimentos verticais na entrada (a) e na saída (b) de corrente de jato com a circulação direta (a) e a circulação indireta (b).

- ✦ *Estrela é eixo da corrente de jato.*
- *Isotacas (40 e 60 em m/s)*
- ↻ *Circulações devido a corrente ageostrófica.*
- ⇨ *Vetor de  $Q$ .*

**Fonte:** Adaptado de Djuric 1994.

Na saída da corrente de jato ocorre o oposto, uma parcela desacelera e a componente ageostrófica positiva se direciona para o equador. Por isso, na corrente de jato do hemisfério sul, os movimentos ascendentes são observados no lado norte da entrada do jato (circulação direta) e no lado sul da saída da mesma (circulação indireta) (Figura 15b, c). Os movimentos descendentes ocorrem nas regiões opostas: são observados no lado sul da entrada do jato (circulação direta) e no lado norte da saída (circulação indireta).



**Figura 15.** Seção horizontal da corrente de jato no hemisfério sul (a) e sessões verticais perpendiculares ao eixo de corrente de jato na entrada (b) e na saída (c).

**Fonte:** Adaptado de Guedes (1985).

## 1.5 Tipos e climatologia da Corrente de jato

### **1.5.1 Correntes de Jato Subtropical e Polar**

Os dois principais tipos de correntes de jatos são observados nos Hemisférios Norte e Sul: *Correntes de Jato Subtropical* e *Polar* (Figura 16). Estas correntes são observadas em torno de todo o globo. A corrente de jato polar se localiza entre as massas de ar polar e Ártica/Antártica. A corrente de jato subtropical é observada entre as massas tropical e polar (PALMEN e NEWTON, 1969; PEZZI et al., 1996; FEDOROVA, 1999).

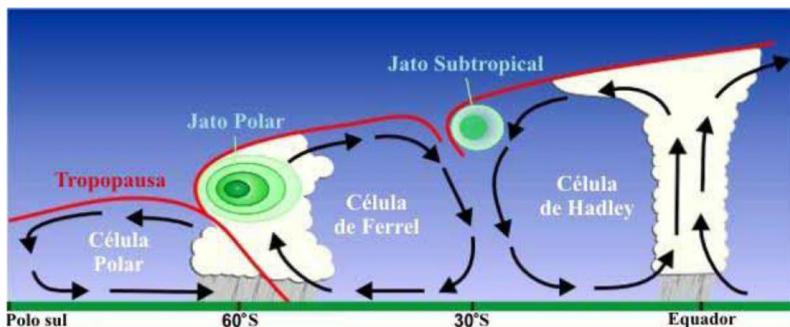
Comparando as posições das correntes de jato com as células de circulação, observa-se a localização destas entre as células (Figura 17). A corrente de jato subtropical fica entre as células de Hadley e Ferrel e está associada com a zona frontal em altos níveis. A corrente de jato polar localiza-se entre as células de Ferrel e Polar e está associada com a zona frontal principal, que é vista por toda profundidade de troposfera.



**Figura 16.** Representação das Correntes de Jato Subtropical (Vermelho) e Polar (Azul) em cada Hemisfério.

**Fonte:** Adaptado de NWS/NOAA.

<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/jet.html>



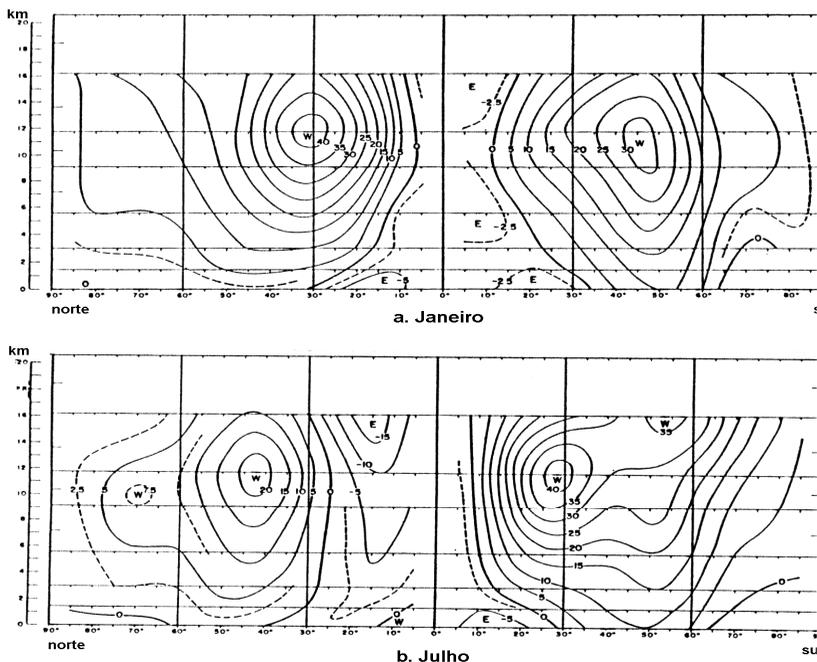
**Figura 17.** Células de circulação no Hemisfério Sul e correntes de jato polar e subtropical.

**Fonte:** Adaptado de National Weather Service.

<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/>.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

As posições das correntes de jato são vistas nas sessões verticais de velocidade de vento nos dois Hemisférios. Os núcleos das correntes de oeste e leste estão marcados com W e E, respectivamente e são vistos na figura 18.



**Figura 18.** Sessões verticais de velocidade de vento (m/s) perpendiculares ao eixo de corrente de jato nos dois Hemisférios em janeiro (a) e julho (b). Os núcleos das correntes de oeste estão marcados como W e de leste como E.

**Fonte:** Adaptado de Newton (1972).

Uma ampla zona de ventos de oeste localiza-se nas latitudes médias com posição do eixo entre 30 e 50°S durante todo ano. Esta zona está associada com a corrente governante ou principal ("*Steering current*"), com a zona frontal principal e correntes de jato (FEDOROVA, 2001). Na direção desta corrente deslocam-se todos os ciclones e anticiclones baroclínicos. Este fato mostra a importância desta corrente para a previsão de tempo.

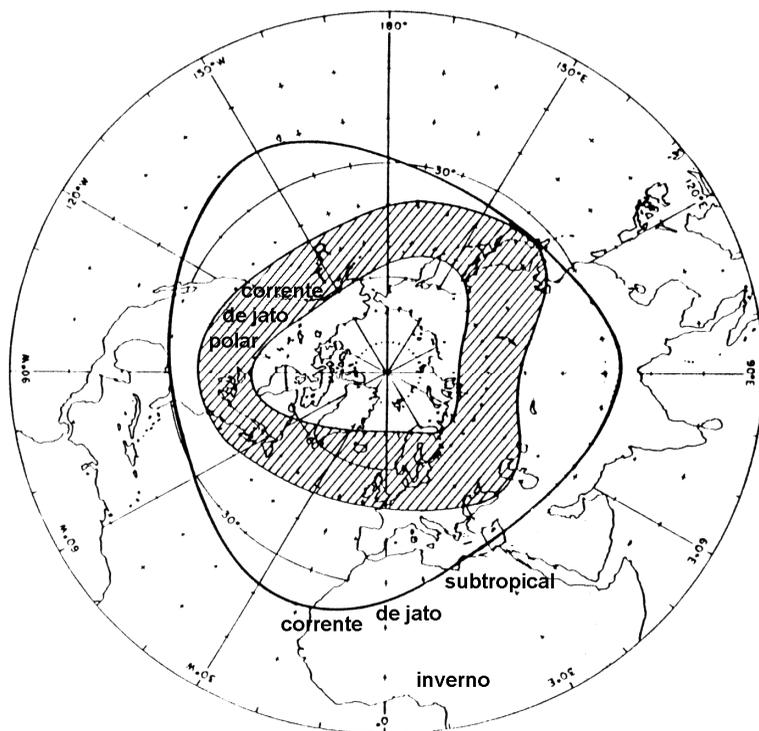
No inverno, em ambos os hemisférios, os contrastes térmicos entre as altas e baixas latitudes são maiores do que no verão. Por isso, as zonas frontais e as correntes de jato são mais intensas no inverno. Isto é visto na figura 18 pelo aumento do gradiente das isotacas no hemisfério de inverno. Estes gradientes são mais intensos no lado equatorial da corrente de jato. Além disso, no inverno estas zonas se localizam mais próximo de equador e ficam perto de latitude 30°. No verão, estas zonas se localizam mais próximo de polos, com localização do eixo nas latitudes de 45°, aproximadamente.

No inverno, a intensidade das correntes de jato nos dois hemisférios é quase igual e a velocidade máxima atinge 40 m/s. No verão a intensidade das correntes de jato do hemisfério sul é mais intensa. Assim, a velocidade máxima no centro da corrente de jato do hemisfério sul atinge 30 m/s (figura 18a) e do hemisfério norte 20m/s (figura 18b). Por outro lado, no hemisfério norte em julho se forma um jato secundário em torno de 70°N.

Pelos mesmos dados climatológicos podem ser vistas as correntes de leste (marcados com letra E na Figura 18) nas regiões equatoriais. Nos hemisférios de verão estas correntes são mais intensas e quase não aparecem nos hemisférios de invernos. A corrente de leste mais intensa vista no verão do hemisfério norte, em julho (figura 18b), atinge somente 15 m/s. No verão do hemisfério sul, em janeiro (figura 18a) esta corrente é muito mais fraca com velocidade máxima somente de 2,5 m/s.

A localização das correntes de jato polar e subtropical no Hemisfério Norte pode ser observada na figura 19. É importante acentuar que a posição climatológica da corrente de jato subtropical está representada por uma linha, enquanto que a corrente de jato polar está representada por uma zona hachurada (FEDOROVA, 1999). Este fato está ligado com a estrutura destas correntes.

Como foi explicado acima, a corrente de jato subtropical fica entre as células de Hadley e Ferrel e está associada com a zona frontal em altos níveis. Estas células e, conseqüentemente a corrente de jato subtropical, se deslocam menos durante ano, do que as zonas frontais, associadas com o jato polar. Estas zonas frontais são parte de famílias de ciclones/anticiclones extratropicais baroclínicos e das ondas de Rossby. Estas ondas de Rossby e, conseqüentemente, as correntes de jato polares, são observadas na faixa de latitudes apresentada na figura 19.



**Figura 19.** Localização das correntes de jato polar e subtropical no Hemisfério Norte.

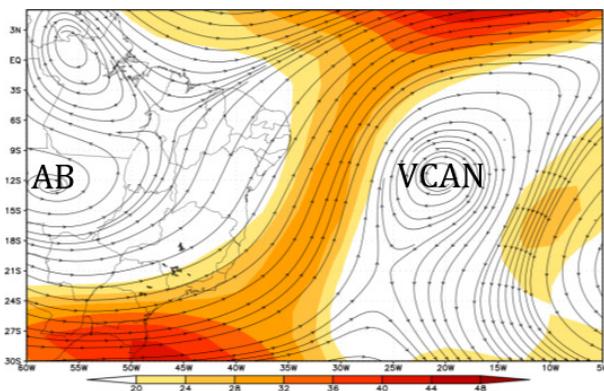
**Fonte:** Adaptado de Palmen e Newton (1969).

### 1.5.2 Correntes de Jato no Nordeste Brasileiro

Alguns estudos mostram a existência de correntes de ventos fortes em altos níveis no NEB entre Alta da Bolívia (AB) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) ou Cavado em Altos Níveis (CAN) (VIRJI, 1981; RAMIREZ, 1996) (Figura

20). Foi mostrado que estas correntes podem alcançar velocidades superiores a 20m/s.

Uma série de estudos no Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) sobre estas correntes de ar (GOMES, 2003; CAMPOS, 2006; REPINALDO, 2010; COSTA, 2010; MILHAHN JÚNIOR, 2013 e VAZ, 2014) mostram vários aspectos, incluindo estrutura e processos de formação dos mesmos. Esta corrente foi chamada como *Corrente de Jato no Nordeste Brasileiro* (CJNEB). A velocidade de vento na CJNEB é maior do 20 m/s.

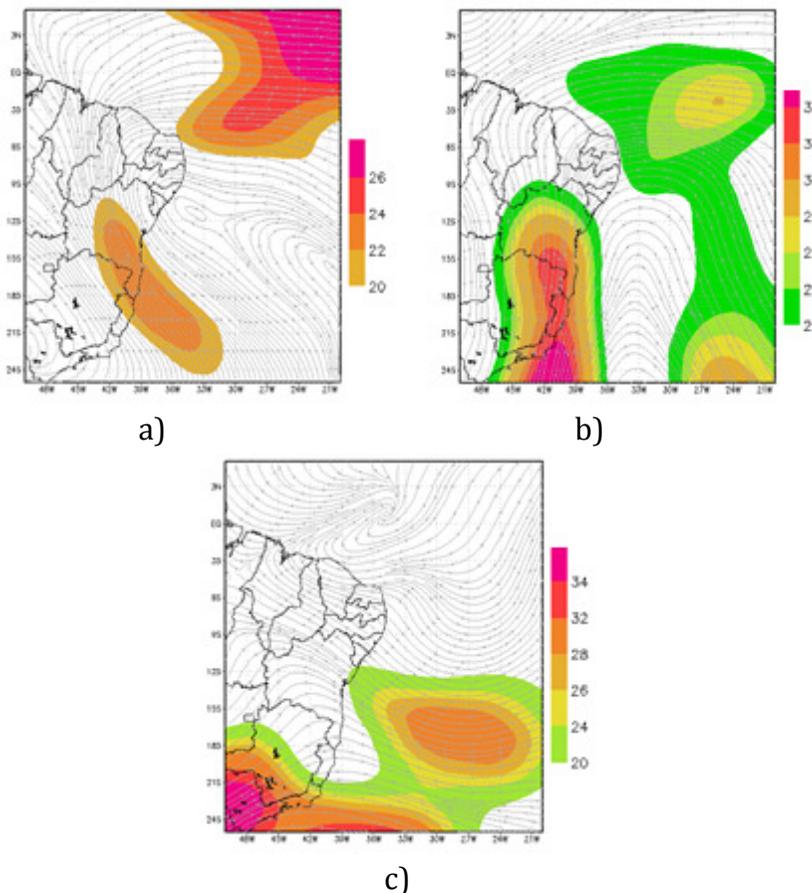


**Figura 20.** Corrente de jato no Nordeste Brasileiro entre Alta da Bolívia (AB) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) em 200 hPa, 21/01/1992.

**Fonte:** Repinaldo (2010).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

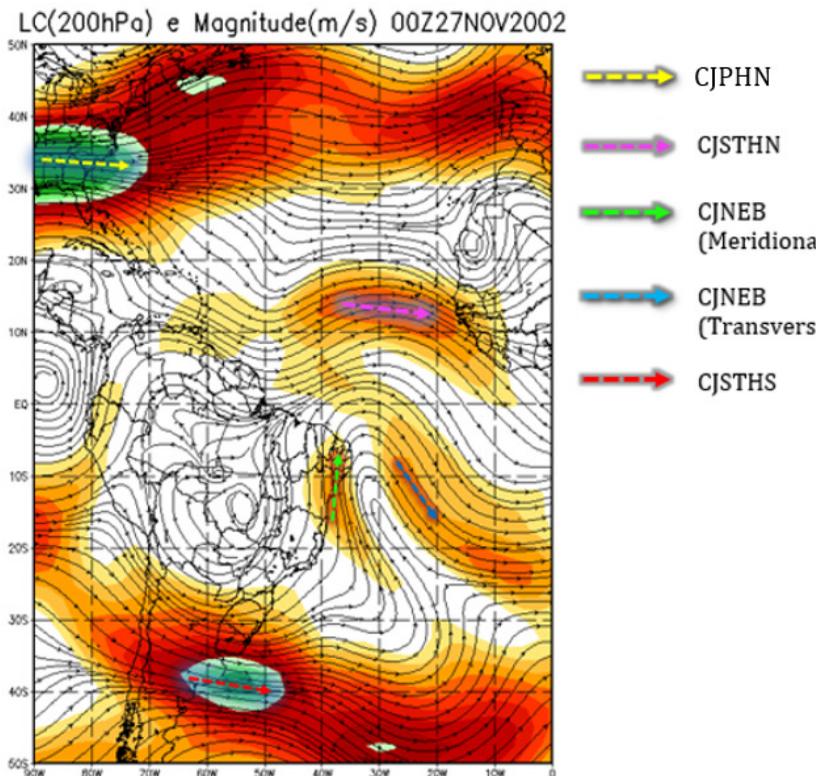
Três padrões de CJNEB, tais como, Meridional, Zonal e Transversal, foram estabelecidos (REPINALDO, 2010) (Figura 21). Com maior frequência é observado padrão meridional (em 47% dos eventos) (COSTA, 2010).



**Figura 21.** Padrões de CJNEB: transversal (a), meridional (b) e zonal (c) nas linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa. **Fonte:** Milhahn Júnior (2013).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

A Figura 22 mostra o acoplamento das correntes de jato subtropical e polar do hemisfério sul sobre a América do Sul ao longo da latitude de 40°S. Um ramo desta corrente passa sobre NEB com direção meridional de sul para hemisfério norte, onde se une com a corrente de jato subtropical do hemisfério norte. A outra CJNEB transversal pode ser vista sobre o oceano Atlântico adjacente. Esta corrente está ligando a corrente de jato subtropical do hemisfério norte com as correntes de jato do hemisfério sul perto da região de 30°S e 2°W. A descrição detalhada das ligações entre as correntes de jato subtropical e polar do hemisfério norte com as correntes de jato do hemisfério sul e CJNEB podem ser encontradas em Vaz (2014).



**Figura 22.** Correntes de jato no Nordeste Brasileiro e as correntes de jato nos Hemisférios Norte e Sul em 200 hPa, 27/11/2002, 00UTC.

Corrente de jato polar do hemisfério norte (CJPHN);

Corrente de jato subtropical do hemisfério norte (CJSTHN);

Corrente de jato do nordeste brasileiro (CJNEB);

Corrente de jato subtropical do hemisfério sul (CJSTHS).

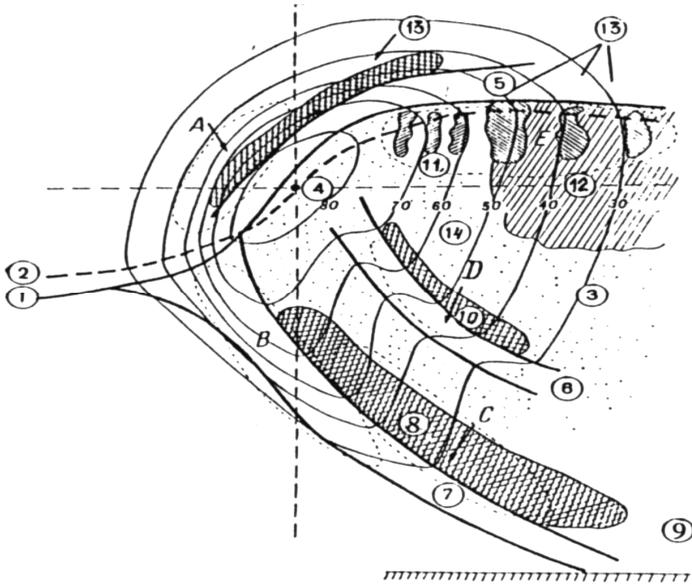
**Fonte:** Vaz (2014).

## **1.6 Fenômenos meteorológicos adversos associados às correntes de jato**

### **1.6.1 Fenômenos meteorológicos adversos para aviação**

As correntes de jato exercem grande influência na navegação aérea, especialmente para os voos de grandes altitudes. A localização espacial (latitude, longitude e altura) das correntes de jato influencia na quantidade de combustível necessário para todo o voo. Se a trajetória do voo permanecer ao longo da corrente de jato é necessário menos combustível. Todavia, durante o voo na direção contrária haveria necessidade de uma maior quantidade de combustível.

Outra influência da corrente de jato para a aviação está ligada com os fenômenos meteorológicos adversos, criados por esta corrente. A estrutura da corrente de jato com a posição das zonas frontais e fenômenos adversos são vistos na figura 23. As zonas com intensa turbulência e agitação de avião estão ligadas com a posição das zonas frontais principais de ar superior (zonas A, B e C na figura 23). Outro fenômeno adverso, o qual diminui a visibilidade durante o voo, é a região de névoa seca observada no lado quente da corrente de jato (região 14 na figura 23).



**Figura 23.** Seção vertical perpendicular ao eixo de corrente de jato (4 é eixo) com localização de nuvens e fenômenos adversos

**1**— Tropopausa; **2**--- níveis de vento máximo; **3**— isotacas (m/seg.);  
= frentes; **5**: zona frontal no ar superior sobre a corrente de jato e **13** é nuvens nesta zona; **6**: zona frontal no ar superior sob a corrente de jato e **10** é nuvens nesta zona; **7**: zona frontal principal e **8** é nuvens nesta zona; **9** é nível de condensação; **11**: bandas das nuvens Ci com borda bem definida do lado do eixo de corrente de jato; **12**: massa de nuvens com intrusão de nuvens Ci espessos; **14** é região de nevoa seca;  
*A, B e D* são regiões de turbulência

**Fonte:** Manual de previsão do tempo de curto prazo (1986).

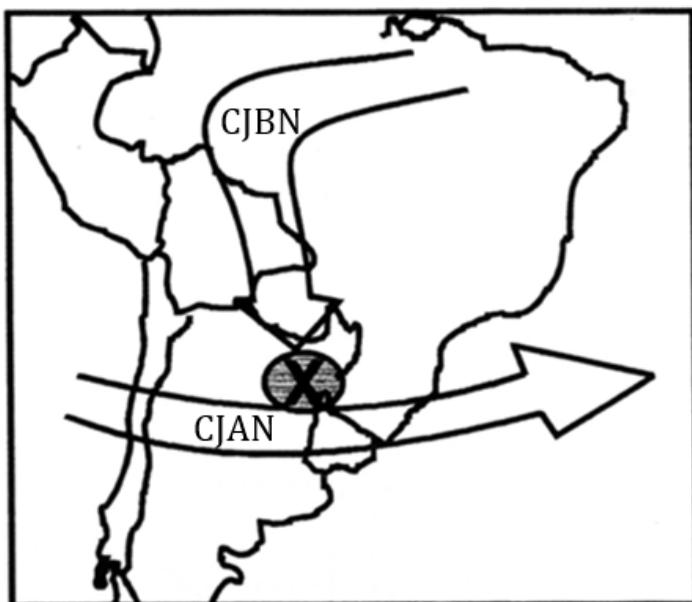
## **1.6.2 Ligações de corrente de jato com complexos convectivos de mesoescala**

### **1.6.2.1 Ligações de corrente de jato com CCM no sul do Brasil**

As ligações entre os processos de formação dos complexos convectivos de mesoescala (CCM) no sul do Brasil, norte da Argentina, Uruguai e Paraguai com as correntes de jato em altos e baixos níveis são descritas em vários estudos. Num dos primeiros estudos (CUSTÓDIO e HERDIES, 1994) foi mostrado que o conjunto das Correntes de Jato em Altos Níveis (CJAN) e Correntes de Jato em Baixos Níveis (CJBN) são favoráveis para formação dos CCM (Figura 24). Os CCMs são formados predominantemente na entrada e no lado quente da corrente de jato em altos níveis. Nesta região são formados os movimentos ascendentes pela circulação transversal de CJAN (observado nas figuras 24 e 25). Por sua vez, CJBN nos níveis de 850 e 925 hPa transporta o ar quente e úmido da região de Amazônia, criando ou intensificado a instabilidade.

Um exemplo da formação de CCM no Uruguai é apresentado na Figura 25. A nebulosidade do CCM está cobrindo quase toda região da Uruguai (Figura 25c). As linhas de corrente no nível de 850 hPa e CJBN estão direcionados na região do CCM (Figura 25b). As linhas de corrente no nível de 200 hPa mostram um núcleo de corrente de jato sobre o centro da Argentina e outro sobre o Atlântico. O CCM está localizado na região de CJAN favorável para formação dos

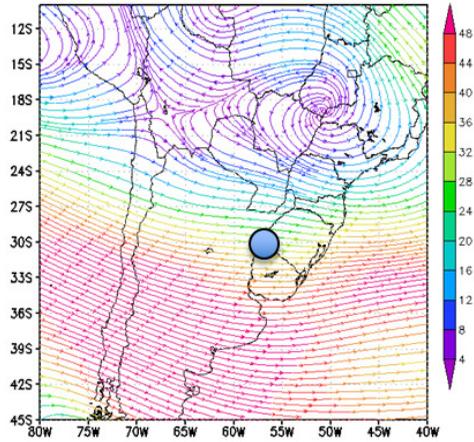
movimentos ascendentes, no lado quente e na entrada do núcleo da CJAN, que está sobre o oceano Atlântico (Figura 25a).



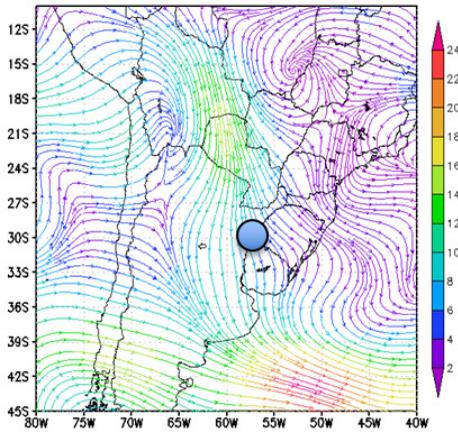
**Figura 24.** Localização climatológica da corrente de jato em altos níveis (CJAN), da corrente de jato em baixos níveis (CJBN) e localização de CCM (oval com X)

**Fonte:** Custódio e Herdies (1994).

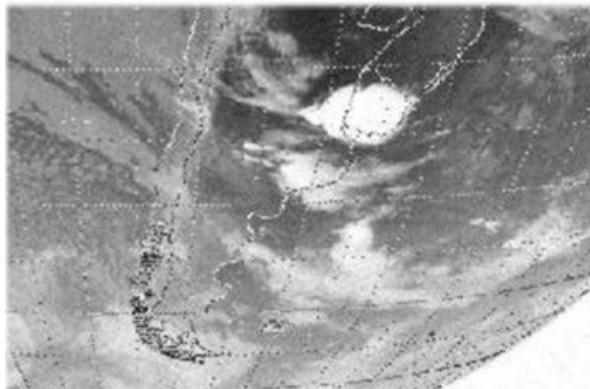
## Meteorologia em tópicos – volume 5



a) 200 hPa



b) 850 hPa



c)

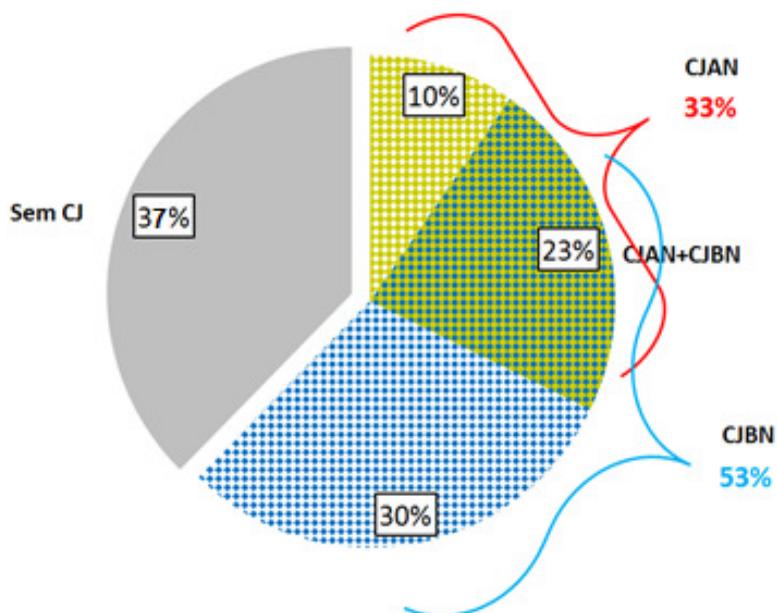
**Figura 25.** CCM no dia 26 de dezembro de 1997. As Linhas de corrente nos níveis de 200 (a) e 850hPa (b) e imagem de satélite no canal infravermelho (c). Os pontos nos mapas de linhas de corrente marcam a localização do CCM.

**Fonte:** (a) e (b) Autores (2016); (c) Barboza (2000).

### **1.6.2.2 Ligações das correntes de jato com CCM no NEB**

As correntes de jato acompanham os eventos de CCM no NEB em 63% dos casos (Figura 26) (MILHAHN JÚNIOR, 2013). Estas correntes são Correntes de Jato em Altos Níveis (CJAN) e Correntes de Jato em Baixos Níveis (CJBN). Os eventos de CCM no NEB são associados com CJBN em 53% dos eventos. As correntes de jato em altos níveis

acompanham os eventos de CCM em 33%. Em 23% dos eventos estas correntes (CJAN e CJBAN) estão presentes juntas. A ausência de CJ em qualquer nível é observada somente em 37% dos eventos. As células de circulação, criadas pelas correntes de jato, são responsáveis pela formação de movimentos ascendentes que contribuíram para formação de Complexos Convectivos de Mesoescala no NEB (FEDOROVA et al., 2005).

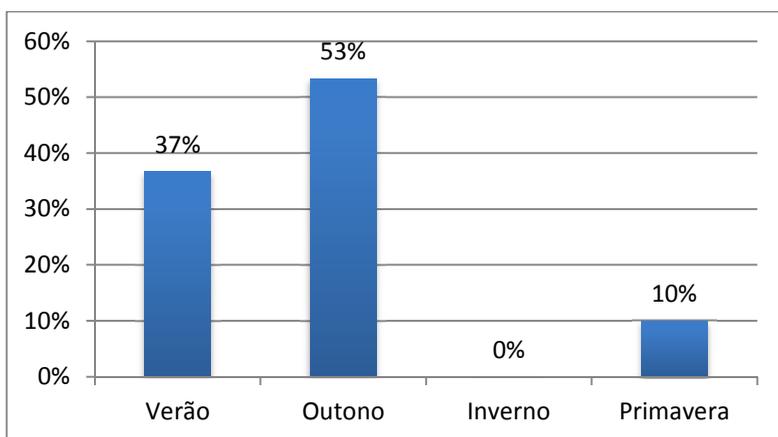


**Figura 26.** Frequências de CJAN e CJBAN nos eventos de CCM no NEB

**Fonte:** Milhahn Júnior (2013).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Conforme a figura 27, as correntes de jato em altos níveis nos eventos de CCM são mais frequentes no outono (53%) e verão (37%). Na primavera, estas correntes são mais raras (10%). Não houve ocorrência de CJAN nos eventos de CCM no inverno. As correntes de jato em baixos níveis nos eventos de CCM obtiveram frequências iguais tanto no verão quanto no outono (43%).



**Figura 27.** Distribuição sazonal da frequência de CJAN nos eventos de CCM no NEB.

**Fonte:** Milhahn Júnior (2013).

A maior parte das ocorrências das correntes de jato (CJAN e CJBN) nos eventos de CCM são zonais (Tabela 2). As correntes de jato meridionais de sul para norte apresentam menor frequência.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

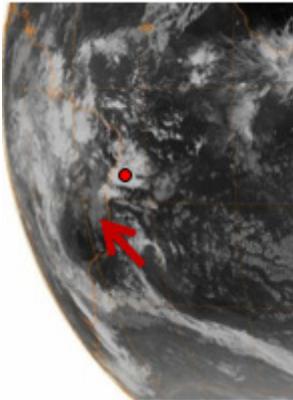
Os CCM no NEB foram associados aos seguintes sistemas sinóticos: Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Extremidade frontal (EF), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Alísios (Figura 28). Com mais frequência os CCM são localizados na extremidade frontal (37%) e com menos frequência nos Alísios (13%). As CJAN e CJBN são vistos em todos estes padrões. A localização dos CCM em relação a Corrente de Jato em altos níveis teve distribuição variada, todavia no lado quente da entrada da CJAN a formação dos CCM foi mais frequente (em 41% dos eventos).

**Tabela 2.** Quantidade de eventos de diferentes correntes de jato (CJAN e CJBN) nos eventos de CCM no NEB e seus diferentes tipos (zonal “Z”, meridional “M” e transversal “T”).  
**Fonte:** Adaptado de Milhahn Júnior et al. (2012).

|             | <b>T</b> | <b>M</b> | <b>Z</b> | <b>Total</b> |
|-------------|----------|----------|----------|--------------|
| <b>CJAN</b> | 9        | 4        | 15       | 28           |
| <b>CJBN</b> | 11       | 8        | 22       | 41           |

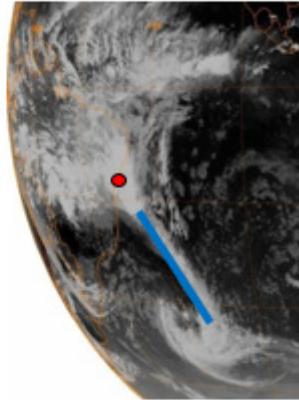
Meteorologia em tópicos – volume 5

VCAN

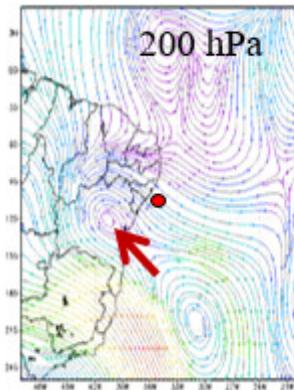


a)

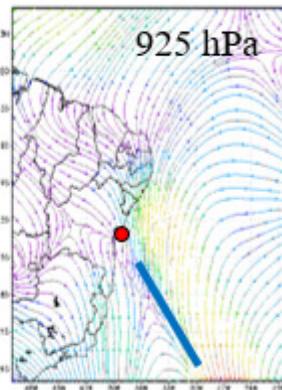
EF



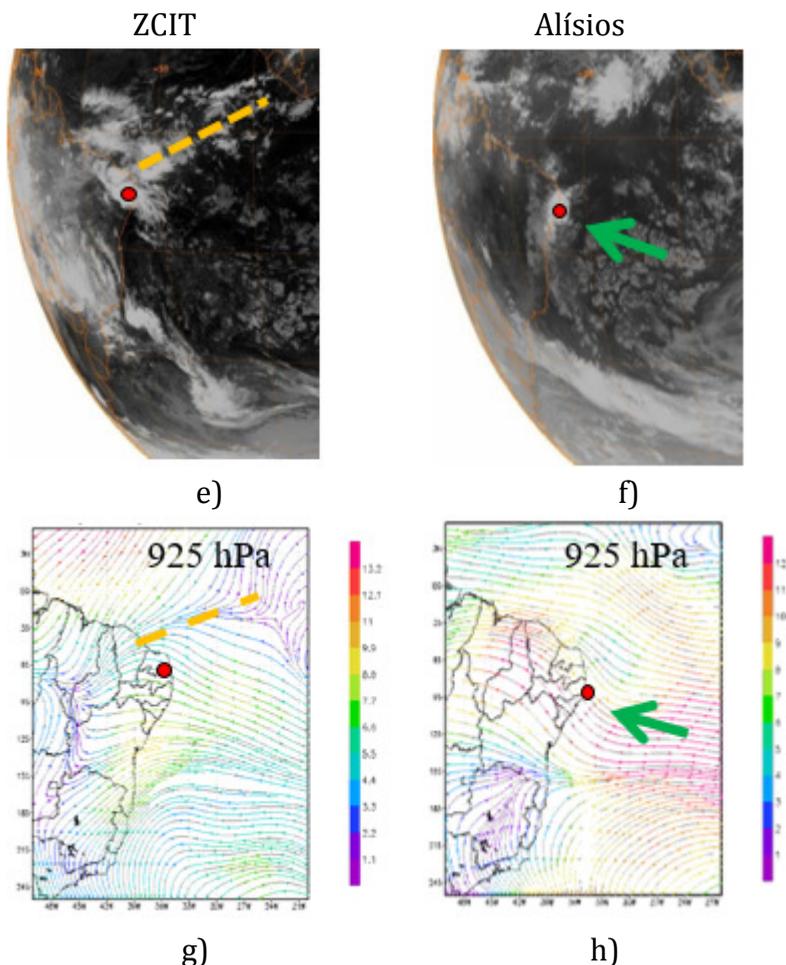
b)



c)



d)



**Figura 28.** Padrões sinóticos com a posição do CCM e correntes de jato em altos e baixos níveis. Imagens de satélite no canal IR (a, b, e, f) dos padrões sinóticos com a posição do CCM (ponto vermelho) e campo de linhas de corrente em 925 hPa (d, g, h) e em 200 hPa (c) nos dias

22/02/2007 (a, c) com o padrão VCAN (seta vermelha),  
18/06/2004 (b, d) com o padrão EF (linha azul),  
09/03/2001 (e, g) com o padrão ZCIT (linha laranja) e  
12/06/2002 (f, h) com o padrão Alísios (seta verde).

**Fonte:** Milhahn Júnior et al. (2012).

## 1.7 Conclusões

As principais características das correntes de jato em altos níveis são:

- Velocidade do vento igual ou maior do que 30 m/s (108 km/h; 58 nós);
- Localiza-se próximo da região com interrupção da tropopausa, inferior da tropopausa, entre a divisão de massa de ar quente e fria, na parte acima da zona frontal;
- No nível de vento máximo ocorre o nivelamento da temperatura nos dois lados da corrente e nos níveis mais altos o gradiente de temperatura inverte seu sinal;
- Gradiente do vento no lado polar da CJAN é maior do que no lado equatorial;
- Na entrada do jato a circulação é termicamente direta (movimento ascendente de ar quente no lado equatorial e movimento descendente de ar frio no lado polar);
- Na saída da CJ a circulação térmica é indireta (movimento descendente de ar quente no lado equatorial e movimento ascendente de ar frio no lado polar);
- As correntes de jato junto com as zonas frontais contribuem para troca de ar entre troposfera e estratosfera.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Os tipos das correntes de jato são:

- Subtropical: entre as células de Hadley e Ferrel e está associada com a zona frontal em altos níveis;
- Polar: entre as células de Ferrel e Polar e está associada com a zona frontal principal em toda profundidade de troposfera.
- Correntes de ventos fortes nas regiões tropicais com velocidades superiores a 20m/s (em particular CJ no Nordeste Brasileiro) contribuem para troca de ar entre os hemisférios.

A importância da corrente de jato em altos níveis para:

- *Navegação aérea:*

1) Cálculo da quantidade de combustível necessário para todo voo;

2) Os seguintes fenômenos meteorológicos adversos são criados por esta corrente: turbulência, agitação de avião, perda da visibilidade pela nevoa seca nas redondezas da CJAN.

- *Previsão de tempo e dos fenômenos adversos*, tais como precipitações intensas, trovoada e, em alguns casos, granizo:

1) Os CCM no sul do Brasil, norte da Argentina, Uruguai e Paraguai são formados predominantemente na entrada e no lado quente da corrente de jato em altos níveis, quando a corrente de jato nos níveis de 850 e 925 hPa transporta o ar quente e úmido da região de Amazônia, criando ou intensificado a instabilidade.

2) No NEB os processos de formação dos CCM são associados com CJAN e CJBAN em 63% dos eventos.

3) As correntes de jato são associadas com a corrente governante ou principal, e na direção desta corrente deslocam-se os todos os ciclones e anticiclones baroclínicos. Este fato mostra a importância desta corrente para previsão geral de tempo.

### 1.8 Referências bibliográficas

BLUESTEIN, H. B. Observations and theory of weather systems. In: *Synoptic - dynamic meteorology in middle latitudes*. Oxford: Oxford University Press, 1993. V. 2, 595p.

BARBOZA, E. R. **Associação entre a corrente de jato subtropical e complexos convectivos de mesoescala**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). 68 p. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2000.

CAMPOS, A. M. V. **Corrente de jato próximo do NEB e fenômenos meteorológicos associados**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 60 p. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CARLSON, T. N. **Mid-latitude weather systems**. London: Harper Collins Academic, 1991. 507p.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

CUSTÓDIO, M. A. M.; HERDIES D.L, **O Jato dos baixos níveis a leste dos Andes, um estudo de caso.** In Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8, Belo Horizonte, MG: Sociedade Brasileira de Meteorologia, v2, 617-619. 1994.

COSTA, M. S. **Vórtice Ciclônico dos Altos Níveis associado à Corrente de Jato no Nordeste Brasileiro nos Anos De 1998 - 2007.** 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

DEAN, G. A. **The three dimensional wind structure over South América and associated rainfall over Brazil.** São José dos Campos, INPE, 1971. (LAFE-164).

DJURIC, D. ***Weather Analysis.*** New Jersey: Prentice Hall, 1994, 304p.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica. Volume 1.** Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, UFPel, 1999. 260p.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica. Volume 2.** Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, UFPel, 2001. 242p.

FEDOROVA, N. **Sinótica III: Frentes, correntes de jato, ciclones e anticiclones.** Material didático: sinopses, figuras, equações Maceió: Ed. Universitária/ UFAL, 2008, 192 p.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; RODRIGUES, L. R. L.; FONSECA, A. R.; **CJNEB e múltiplos fenômenos meteorológicos adversos no Estado de Alagoas do Brasil no dia 15 de junho de 2003.** In: IX Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, 2005.

GUEDES R. L. **Condições de grande escala associado a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul.** São Paulo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade de São Paulo. 89p. 1985.

GOMES, H. B. **Estudo da Corrente de Jato próximo do Estado de Alagoas.** 2003. 113 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2003.

**MANUAL de previsão do tempo de curto prazo.** Leningrad: Hydrometeoisdat, 1986, 702p (em Russo).

MILHAHN JÚNIOR, A. W.; FEDOROVA, N.; ALBUQUERQUE, C. S. M.; LEVIT, V. **Correntes de jato e sistemas sinóticos associados aos complexos convectivos de mesoescala no nordeste Brasileiro.** In: XVII Congresso brasileiro de Meteorologia, Gramado, 2012.

MILHAHN JÚNIOR, A. W. **Correntes de jato e sistemas sinóticos associados aos complexos convectivos de**

**mesoescala no nordeste Brasileiro.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 48 p. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

NEWTON, C. W. (Ed.). **Meteorology of the southern hemisphere.** American Meteorological Society, 1972. 263p.

PALMÉN, E.; NEWTON C. W.: **Atmospheric circulation systems.** New york: Academic Press., 1969. 603p.

PEZZI, L. P.; ROSA, M. B.; BATISTA, N. N. M. A corrente de jato subtropical sobre a América do Sul. **Climanálise.** Edição Especial. Outubro/1996. Edição especial comemorativa de 10 anos. 1996.

PONTES DA SILVA, B. F. Sistemas sinóticos associados às precipitações Intensas no estado de Alagoas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia). 70 p. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

PONTES DA SILVA, B. F.; FEDOROVA N.; LEVIT V.; PERESETSKY, A. 2011. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas (*Synoptic systems associated with the precipitations in the Alagoas State*), **Revista Brasileira de Meteorologia** 26-3: p. 295-310. 2011

RAMIREZ, M. C. V. **Padrões climáticas dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil**. 132p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos. (INPE-6408-TDI/618). 1996.

REITER, E. R. **Jet stream meteorology**. Chicago: The University of Chicago Press, 1969. 515p.

REPINALDO, H. F. B. **Vórtice Ciclônico em Altos Níveis e Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro em anos de El Niño e La Niña**. 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

RIEHL, H. Jet Streams of the Atmosphere. **Medical Opinion & Review** (September), 33-50, 1969.

SHAKINA, N.P. **Dynamics of Atmospheric Fronts and Cyclones**, Leningrad: Hidrometeoisdat, 264p. 1985.

UCCELLINI, L. W.; JOHNSON, D. R. The coupling of upper and lower level tropospheric jet streaks and implications of the development of severe convective storms. **Monthly Weather Review**, 682-703, 1979.

UCCELLINI, L. W.; KOCIN, P. J. The Interaction of Jet Streak Circulations during Heavy Snow Events along the East Coast

of the United States. **Weather Forecasting**, **2**, 289–308, 1987.

**VAZ I. N. Estudo sobre origem da corrente de jato do nordeste brasileiro e suas ligações inter-hemisféricas.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 119p. 2014.

VIRJI, H. A Preliminary Study of Summertime Tropospheric Circulation Patterns over South América Estimated from Cloud Winds. **Monthly Weather Review**, v.109, p.599–610. Mar. 1981.

**ZVEREV, A. S. Meteorologia sinótica e considerações básicas para previsão de tempo.** Leningrad: Hidrometeoisdat, 774p. 1968.

## **CAPÍTULO 2**

### **ENERGIA E METEOROLOGIA**

*Vladimir Levit*

*Lucas Carvalho Vieira Cavalcante*

#### **2.1 Introdução**

A energia é a força motriz por trás de tudo o que ocorre na Terra. Ela é necessária para a realização das atividades humanas. Portanto, a sua produção tem sido sempre uma das principais áreas da economia. Mas nas últimas décadas a produção de energia está enfrentando sérios problemas relacionados à poluição ambiental e às mudanças climáticas.

A demanda por energia está aumentando a cada ano devido ao crescimento populacional e à necessidade de melhorar a qualidade de vida. Mas a maioria das tecnologias modernas de produção da energia, em maior ou menor escala, está relacionada com o meio ambiente e com a meteorologia. Algumas tecnologias de produção e consumo de energia poluem diretamente o meio ambiente e, como consequência, afetam o tempo e clima. Portanto, a humanidade, hoje em dia, enfrenta um duplo desafio: por um lado, é necessário aumentar a produção de energia e, por

outro, é necessário reduzir os efeitos prejudiciais sobre o ambiente e o clima.

Tudo isso cria a necessidade de se desenvolver novas tecnologias para obtenção de energia e, especialmente, tecnologias baseadas em fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar.

Isto gera novos problemas relacionados ao impacto destas tecnologias sobre o tempo e clima, assim como a necessidade de se desenvolver métodos meteorológicos e climáticos que auxiliem no desenvolvimento dessas novas tecnologias.

Tudo isso cria as condições para uma conexão direta entre economia de energia e meteorologia. Atualmente se vê como necessário desenvolver uma nova área da ciência, localizada na fronteira entre as duas ciências tradicionais, o que pode ser chamado de “meteorologia energética”.

## **2.2 Demanda mundial de energia**

### **2.2.1 Grande aumento populacional**

A População mundial em 2016 cresce a uma taxa de 2-3 pessoas/segundo ou 220.000/dia ou cerca de 80 milhões de pessoas por ano. Até 2050 espera-se atingir 10 bilhões de habitantes (WORLDOMETERS, 2016).

### 2.2.2 Esperança de uma qualidade de vida melhor

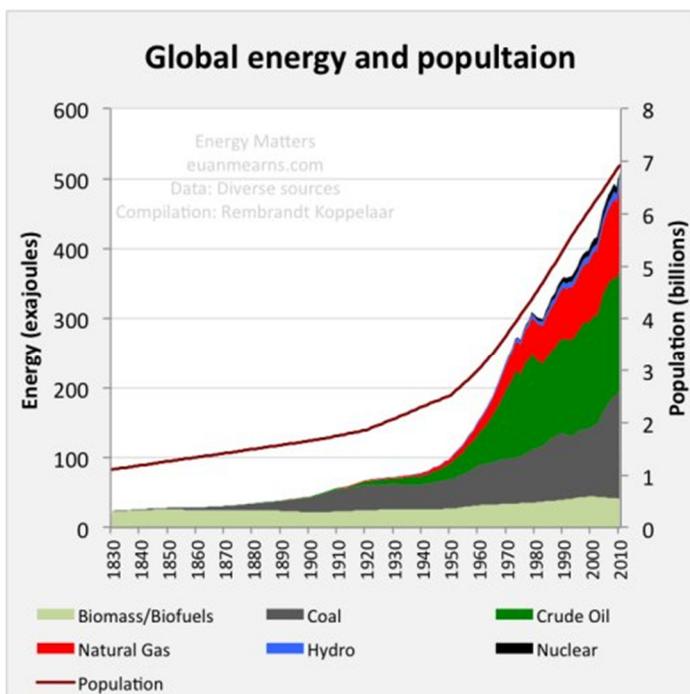
A qualidade de vida está relacionada com a riqueza da sociedade. Um dos parâmetros da riqueza é o consumo da energia.

A demanda mundial de energia aumentou 2,3% por ano nos últimos 200 anos. Estima-se que 1000 EJ (exa Joule) (exa E =  $10^{18}$ ) de Energia serão consumidas pelo mundo a cada ano em 2050 (3 vezes mais do que é usado atualmente. Para países pobres – 5 vezes). Tabela 1 apresenta a estimativa da demanda anual mundial de energia pelo WEC (Conselho Mundial de Energia para anos 2050 e 2100). Dados apresentados em unidades, se consumo de energia em 1990 aceitar por 1.

**Tabela 1.** Estimativa da Demanda Relativa Mundial de Energia formulada pelo Conselho Mundial de Energia (WEC)

|                       | <b>1990</b> | <b>2050</b> | <b>2100</b> |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| Mundo                 | 1           | 1,7 – 3,1   | 2,3 – 4,8   |
| Países de alta renda  | 1           | 1,3         | 1,2         |
| Países de baixa renda | 1           | 7,0         | 14,7        |

A Figura 1 apresenta crescimento de população e consumo de energia mundial por fontes. Bem visível, que demanda da energia cresce paralelamente com crescimento da população.



**Figura 1.** Energia mundial e crescimento populacional.

**Fonte:** Mearns (2014)

Cada pessoa consome na média ~ 1,7 kW de energia.

EUA: 11,0 kW/capita

Europa: 5,5 kW/capita

Ásia: 1,6 kW/capita

África: 0,8 kW /capita

O Mundo em 2013 consumia  $12,3 \times 10^9$  kW de energia.

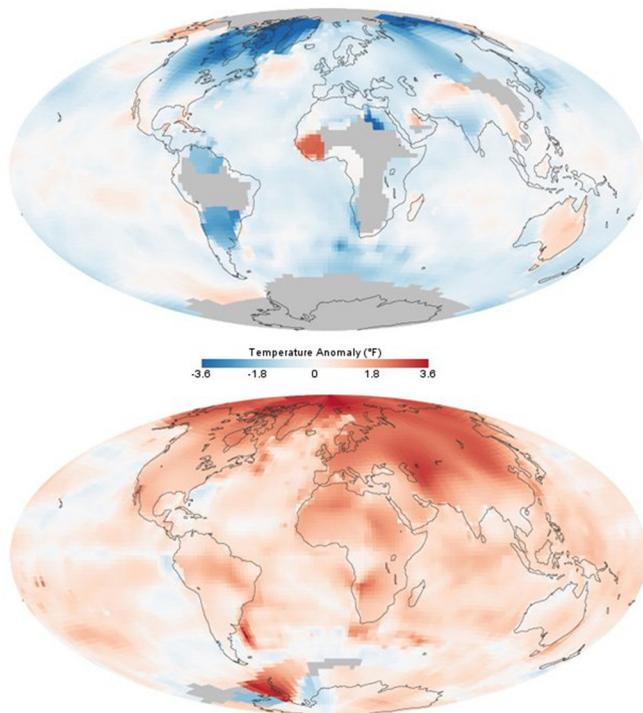
### **2.3 Mudanças climáticas**

Aquecimento global é o processo de aumento da temperatura média dos oceanos e da atmosfera da Terra, nas últimas décadas, em comparação com os anos anteriores.

A figura 2 apresenta as mudanças das temperaturas globais na década de 1880 e 1980, comparadas à média no período entre 1951 e 1980. (US EPA ,2012).

O aumento nas temperaturas globais desencadeia alterações importantes em virtualmente todos os sistemas e ciclos naturais da Terra. Afetam os mares, provocando a elevação do seu nível, mudanças nas correntes marinhas e na composição química da água, verificando-se: acidificação, dessalinização e desoxigenação. Interferem no ritmo das estações e nos ciclos da água, do carbono, do nitrogênio e outros compostos. Causam o degelo das calotas polares, do solo congelado das regiões frias e dos glaciares de montanha, modificando ecossistemas e reduzindo a disponibilidade de água potável. Afetam irregularmente o regime de chuvas e os padrões dos ventos, produzindo uma tendência à desertificação das regiões florestadas tropicais, enchentes e secas mais graves e frequentes, e tendem a aumentar a frequência e a intensidade de tempestades e outros eventos climáticos extremos como as ondas de calor e de frio.

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 2.** Temperaturas globais na década de 1880 e 1980, comparadas à média no período entre 1951 e 1980.

**Fonte:** US EPA (2012).

As mudanças induzidas pelo aquecimento global nos sistemas biológicos, químicos e físicos do planeta são vastas. Algumas são de longa duração e outras são irreversíveis, e já estão provocando uma grande redistribuição geográfica da biodiversidade, induzindo o declínio populacional de grande número de espécies, modificando e desestruturando

ecossistemas em larga escala, gerando, por consequência, problemas sérios para a produção de alimentos, o suprimento de água e a produção de bens diversos para a humanidade, benefícios que dependem da estabilidade do clima e da integridade da biodiversidade. Esses efeitos são intimamente inter-relacionados, influem uns sobre os outros amplificando seus impactos negativos e produzindo novos fatores para a intensificação do aquecimento global.

O aquecimento e as suas consequências serão diferentes de região para região, e o Ártico é a região que está aquecendo mais rápido. A natureza e o alcance dessas variações regionais ainda são difíceis de prever de maneira exata, mas sabe-se que nenhuma região do mundo será poupada de mudanças. Muitas serão penalizadas pesadamente, especialmente as mais pobres e com menos recursos para adaptação (KIEHL e TRENBERTH, 1997; BARNETT et al., 2005; MANNING e KEELING, 2006; CHAPMAN e WALSH, 2007; SOLOMON et al., 2007; BINTANJA et al., 2011; NOAA, 2011; IPCC, 2013; WMO, 2013; NOAA, 2015; BLASING, 2016; HARRIS e ROACH, 2016).

A concepção oficial moderna das geociências, incluindo ciências meteorológicas, explica o aquecimento global como sendo causado por massivas emissões de gases que intensificam o efeito estufa, originados de uma série de atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, como o desmatamento, bem como de várias outras fontes secundárias. Essas causas são um produto direto da explosão

populacional, do crescimento econômico, do uso de tecnologias e fontes de energia poluidoras e de um estilo de vida insustentável, em que a natureza é vista como matéria-prima para exploração. Os principais gases do efeito estufa emitidos pelo homem são o dióxido de carbono (ou gás carbônico,  $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ). Esses e outros gases atuam obstruindo a dissipação do calor terrestre para o espaço (KIEHL e TRENBERTH, 1997; BARNETT et al., 2005; MANNING e KEELING, 2006; CHAPMAN e WALSH, 2007; SOLOMON et al., 2007; BINTANJA et al., 2011; NOAA, 2011; IPCC, 2013; WMO, 2013; NOAA, 2015; BLASING 2016; HARRIS e ROACH, 2016).

Todo isto cria a necessidade de mudar a estrutura da produção de energia.

## **2. 4 Fontes principais de energia**

### **Combustíveis Fósseis:**

- Carvão
- Petróleo
- Gás natural

### **Fontes de Energia Renovável:**

- Energia Hidrelétrica
- Energia Eólica
- Energia Solar
- Biomassa
- Biogás

- Biocombustível
- Energia Geotérmica
- Energia das ondas
- Correntes marítimas
- Energia das marés

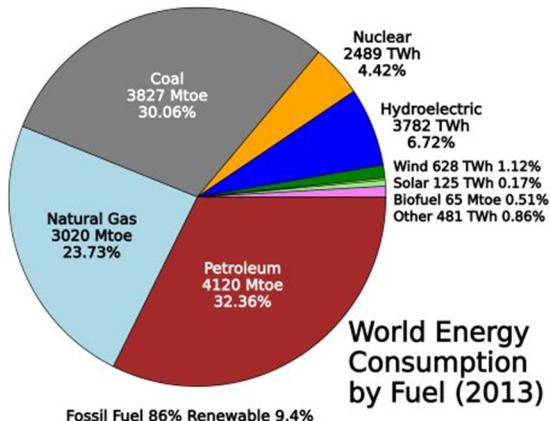
## Energia Nuclear

(HINRICHS, 2004)

## 2.5 Consumo de energia

### 2.5.1 Produção e consumo da energia no Mundo

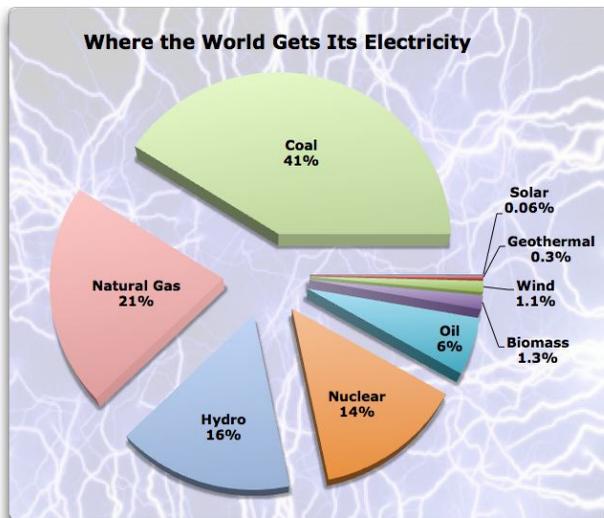
A figura 3 apresenta o consumo mundial de energia primária em 2013.



**Figura 3.** Consumo mundial de energia primária em 2013.

**Fonte:** Niche (2015)

As fontes da produção mundial de energia elétrica são apresentadas na figura 4.



**Figura 4.** Fontes da produção mundial de energia elétrica.  
**Fonte:** National Geographic (2011)

Consumo mundial no ano 2012:

Energia Primária Total (EP):  $10,443 \times 10^{13}$  kWh

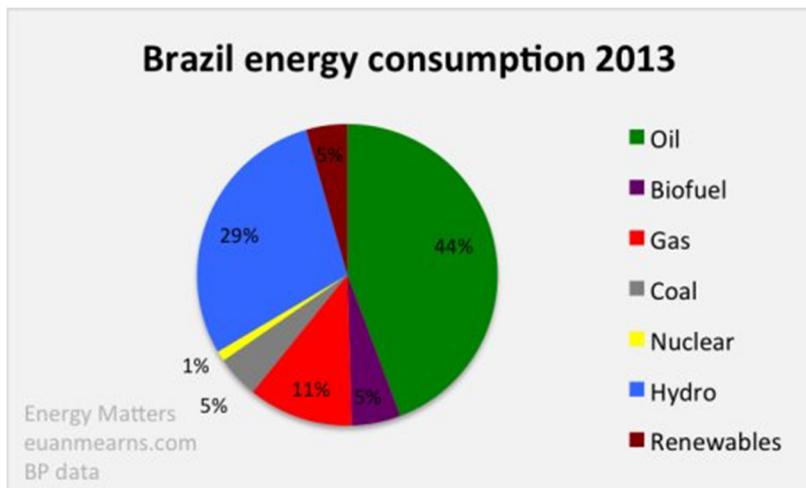
Energia Elétrica (EE):  $2,090 \times 10^{13}$  kWh

EE  $\approx$  20% EP

> 80% dos combustíveis fósseis são queimados.

## 2.5.2 Produção e consumo da energia no Brasil

A figura 5 mostra o consumo da energia primária no Brasil por setores em 2013.

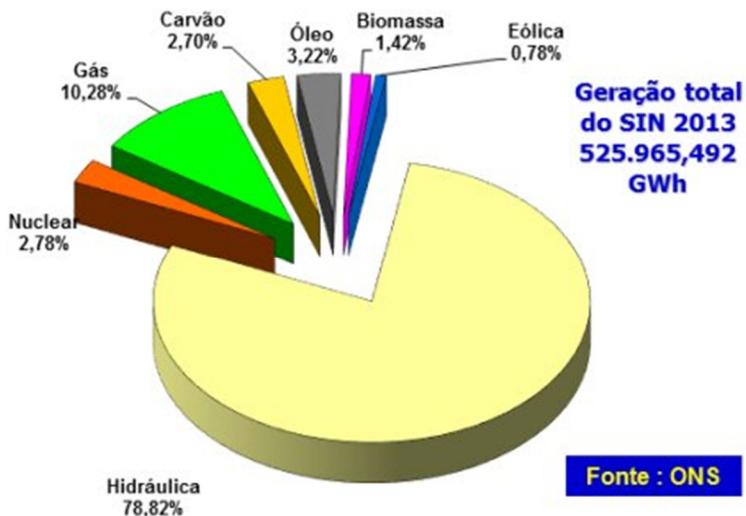


**Figura 5.** Consumo da energia primária no Brasil por setores.  
**Fonte:** Mearns (2014)

### 2.5.3 Energia elétrica no Brasil em 2013

Em 2002 no Brasil a produção de energia baseia-se atualmente em 92% de geração hidrelétrica e 2,5% de energia nuclear. O resto provém de usinas térmicas que operam com carvão e gás natural. Além disto, no Brasil o uso da biomassa ocupa um lugar de importância, não apenas no seu aproveitamento tradicional, mas também como uma nova forma de combustível biológico (ALTMANN, 2002).

As fontes de produção da energia elétrica no Brasil em 2013 são apresentadas na Figura 6.



**Figura 6.** Fontes da produção da energia elétrica no Brasil em 2013.

**Fonte:** ONS (2014).

## 2.6 Emissão de gás carbônico

A emissão de gás carbônico tem aumentado durante décadas:

Em 1973 foi emitido 15.633 Mt

Em 2012 foi emitido 31.734 Mt

Houve um aumento de mais de 2 vezes.

As fontes principais da energia responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub>:

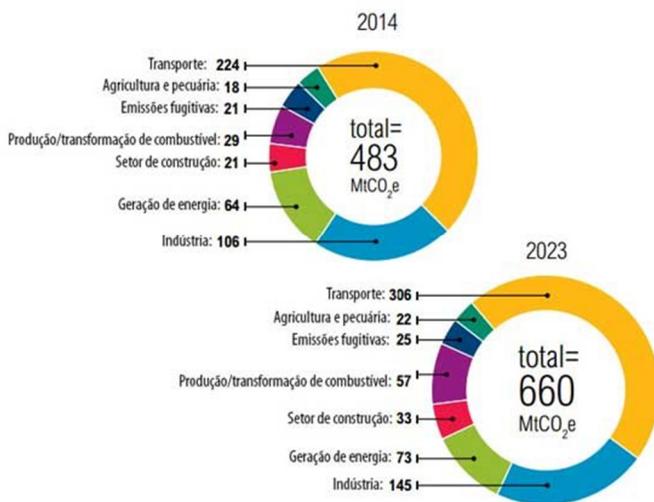
## Meteorologia em tópicos – volume 5

|             |        |
|-------------|--------|
| Carvão      | 43,9 % |
| Petróleo    | 35,3 % |
| Gás natural | 20,3 % |
| Outras      | 0,5 %  |

A emissão mundial anual de CO<sub>2</sub> por combustível fóssil em 2014 é igual a 35,9 Gt.

As figuras 7 e 8 apresentam as emissões de gás carbônico pelas tecnologias energéticas em 2014 e a previsão para 2023.

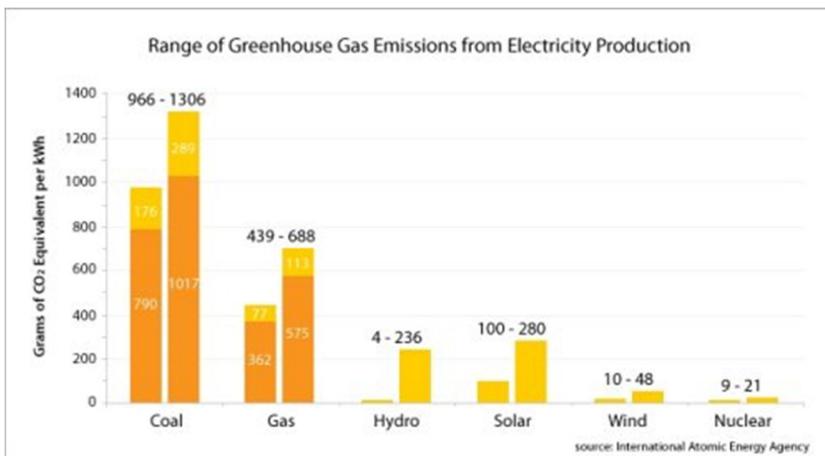
Emissões de gases do efeito estufa relacionadas a energia em 2014 e projeções para 2023



Fonte: EPE, 2014

**Figura 7.** Emissões de gás carbônico pelas tecnologias energéticas em 2014 e a previsão para 2023.

**Fonte:** EPE (2014).



**Figura 8.** Emissão de gás carbônico para produção de 1 kWh de energia elétrica por diferentes fontes.

**Fonte:** IAEA (2011).

## 2.7 Poluição atmosférica

A produção e utilização de energia constituem na mais importante fonte de poluição do ar proveniente de atividade humana. No mundo, cerca de 18.000 pessoas morrem, a cada dia, como resultado da poluição do ar, totalizando 6,5 milhões de mortes por ano. De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), o número de mortos por poluição do ar é muito maior do que o de HIV / AIDS, lesões de tuberculose e de vítimas de acidentes no trânsito. Além de danos ao meio ambiente, a poluição do ar também traz grandes custos para a economia. (HINRICHS, 2004)

Produção e uso de energia, principalmente relacionada

a queima de combustíveis não regulamentada, mal regulada ou ineficiente, são as mais importantes fontes artificiais de emissões de poluentes atmosféricos. Correspondem a 85% de partículas sólidas em suspensão e de quase todos os óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. Estes três poluentes são responsáveis pelos impactos mais comuns de poluição do ar, seja diretamente ou transformados em outros poluentes através de reações químicas na atmosfera (HINRICHS, 2004)

### **2.7.1 Desenvolvimento e consumo de combustíveis fósseis**

O carvão e o petróleo são a base do crescimento econômico em muitos países, mas a sua combustão constante em usinas de energia, instalações industriais e veículos é a principal causa da poluição do ar livre e está ligado a cerca de 3 milhões de mortes prematuras por ano. O carvão é responsável por cerca de 60% das emissões de dióxido de enxofre relacionadas com a combustão global. É uma das causas de doenças respiratórias e um precursor da chuva ácida. Os combustíveis utilizados para o transporte (em primeiro lugar, diesel) geram mais da metade dos óxidos de nitrogênio emitidos em todo o mundo, que podem desencadear problemas respiratórios, a formação de outras partículas e poluentes perigosos, incluindo ozônio.

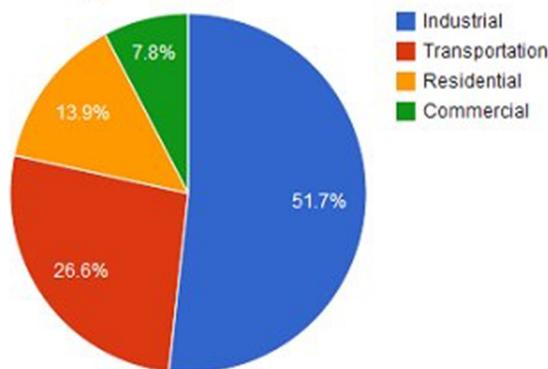
O investimento no ar limpo inclui US \$ 2,3 trilhões para tecnologias avançadas de controle da poluição (dois terços dela para respeitar as normas mais altas de emissão por

veículos) e US \$ 2,5 trilhões para uma transformação mais rápida do sector de energia (HINRICHS, 2004; IEA, 2016).

## 2.8 Transporte

A figura 9 mostra o consumo de energia primária mundial por setor

**World Energy Consumption by Sector, 2012 (EIA Data)**



**Figura 9.** Consumo de energia primária mundial por setor.

**Fonte:** Bredenberg (2012).

O transporte é responsável por 46% da emissão de CO<sub>2</sub> e também por poluir seriamente a atmosfera.

Os meios de transporte emitem para cada 1 km rodado as seguintes quantidades de CO<sub>2</sub>: veículos comuns emitem cerca de 0,5 kg, carros esportivos cerca de 0,63 kg e avião cerca de 72 kg.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Aviões voam, por ano,  $65 \times 10^6$  km, usando  $290 \times 10^6$  L de combustível.

Navios navegam, por ano,  $50 \times 10^6$  km, usando  $1 \times 10^9$  L de petróleo.

São usados  $16 \times 10^6$  t de carvão por ano para produzir energia elétrica.

No EUA existe 700 milhões de veículos.

Nova York tem 50 mil de taxi e limusines.

Um dos problemas principais do transporte é a mudança do combustível. Os investimentos principais na área de transporte mundial são dirigidos para o desenvolvimento de carros elétricos e carros que usam o hidrogênio como o combustível.

Por exemplo, carros elétricos da Tesla Modelo S (Figura 10) tem alcance, por bateria carregada, de 426 km (85 kW·h pacote de bateria elétrica) ou 335 km (60 kW·h pacote de bateria elétrica). Este modelo, Tesla S 60, foi incluído na lista dos 10 melhores carros de 2015.

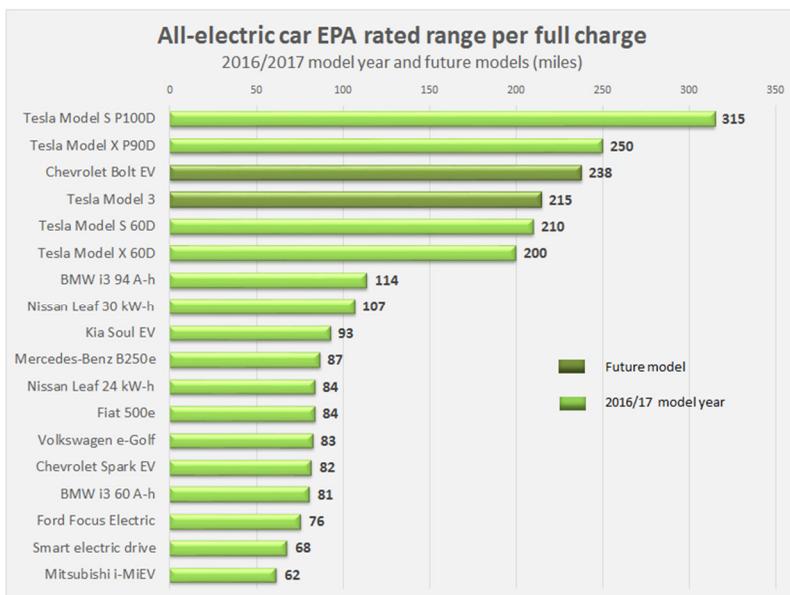
A venda desses carros e também de outros modelos de carros elétricos no mundo aumenta muito rápido. A Figura 11 apresenta a comparação de modelos dos anos 2016 e 2017 de carros elétricos disponíveis no mercado.

A longo prazo, no setor de transportes, trata-se, além do aumento da eficiência técnica, de desenvolver novos tipos de combustível que não causem alterações climáticas, baseados em fontes renováveis (ex. hidrogênio) e integrá-las em todo o sistema energético (ALTMANN, 2002).



**Figura 10.** Elon Musk apresenta novo modelo de carro elétrico Tesla S.

**Fonte:** Kim (2013).



**Figura 11.** A comparação de modelos dos anos 2016 e 2017 de carros elétricos disponíveis no mercado. Avaliação de EPA (US Environmental Protection Agency).

**Fonte:** TESLA MOTORS (2016).

## **2.9 Mudança da estrutura da energia**

A energia é o sistema circulatório da tecnologia, indústria, transportes, comunicação, iluminação e vida doméstica. Sem a energia não existiria civilização moderna. A disponibilidade de energia é a base da existência humana, é essencial para satisfazer as necessidades básicas tais como alimentação, vestuário, habitação, comunicação e também a mobilidade. A demanda mundial de energia é crescente. Entretanto, o elevado consumo de energia e as correspondentes emissões de dióxido de carbono já ameaçam a estabilidade ecológica da Terra.

No ano 2000 a Alemanha foi responsável por cerca de 4% das emissões mundiais dos gases do efeito estufa. Cada habitante de nosso país tem uma cota de responsabilidade correspondente a 10 t/ano. Em comparação, um cidadão americano despeja anualmente cerca do dobro (22 t), um chinês apenas 2,7 t, e um indiano somente 0,7 t. Temos uma estratégia nacional de sustentabilidade, com a meta voluntária de reduzir as emissões de dióxido de carbono em 25% até o ano de 2050, em comparação à 1990. Até o ano de 2050, 50% da demanda de energia primária e de eletricidade deverão ser obtidos a partir de fontes renováveis de energia (ALTMANN, 2002).

Tudo isto mostra a necessidade de mudança da estrutura da energia e, principalmente, da energia fóssil para a energia renovável.

Além disso, a mudança dos transportes que consomem combustível fóssil (gasolina) para os carros elétricos cria novos problemas relacionados ao aumento da produção de energia elétrica em cerca de 3 vezes. A energia elétrica ocupa hoje 20% da energia total (item 5.1). Transporte consome cerca de 30% da energia total. Se os transportes elétricos devem substituir os transportes que consomem combustível fóssil, a produção da energia elétrica deve ocupar cerca de 50% de energia total. Por isso a produção de energia elétrica deve crescer no mínimo 2,5 vezes (cálculo dos autores).

### **2.10 Análise das fontes de energia**

A maioria das fontes de energia apresenta a energia acumulada na massa da substância que compõem o combustível. Combustíveis fósseis acumulam energia solar na forma de energia química, que é liberada no processo de combustão. Por isso, para consumir a energia é necessário transformar a massa da substância em energia. Para consumir 1 kWh de energia é necessária uma certa quantidade de massa da substância, que depende da eficiência da substância em questão.

Para energia eólica e hidrelétrica ocorre a transformação da energia cinética do ar e da água, respectivamente, em energia elétrica. Novamente, para consumir 1 kWh de energia elétrica é necessária uma certa quantidade de massa da substância. A energia solar é a única energia que não necessita da massa da substância. Ela já é a

energia e necessita apenas transformar essa energia em outra forma de energia como energia elétrica ou térmica. A eficiência dessa transformação depende da tecnologia, que sempre aumenta e praticamente não tem limites.

Na Tabela 2 está apresentada a eficiência da produção de energia por massa de fontes diferentes baseada nas calculas dos autores.

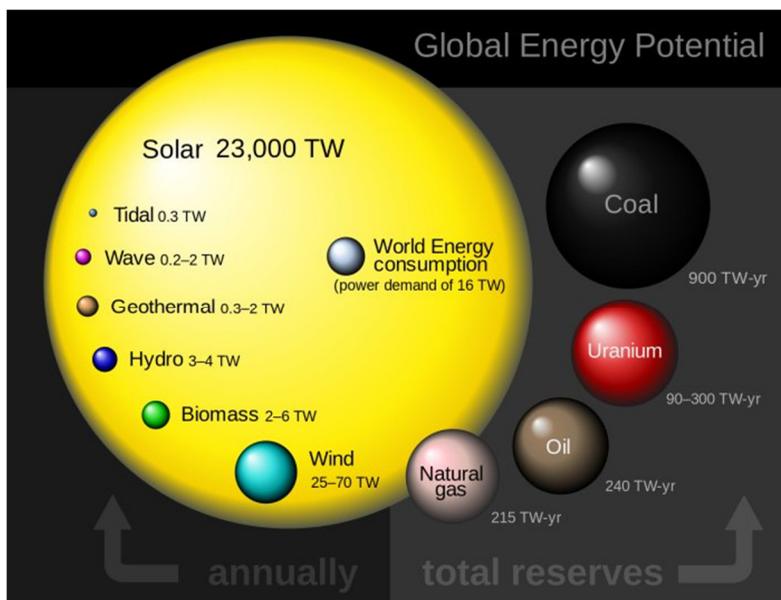
**Tabela 2.** Eficiência da produção de energia por massa de diferentes fontes.

**Fonte:** Autores.

| Fonte                          | Eficiência (kWh/kg)  |
|--------------------------------|----------------------|
| Ar (Energia eólica) (V=23 m/s) | $7,3 \times 10^{-5}$ |
| Água (Queda de 305 m)          | $8,3 \times 10^{-4}$ |
| Álcool                         | 6,4                  |
| Carvão                         | 8,2                  |
| Petróleo                       | 11,5                 |
| Gasolina                       | 12,3                 |
| Gás natural                    | 13,2                 |
| Hidrogênio                     | 33,9                 |
| Nuclear                        | $2,3 \times 10^6$    |
| Limite Absoluto                | $2,5 \times 10^{10}$ |

É visível que as principais fontes renováveis têm pequena eficiência. Também é obvio que hidrogênio é quase 3 vezes mais eficiente do que gasolina e gás natural.

O esquema na figura 12 apresenta as reservas mundiais de diferentes fontes de energia. A parte direita apresenta reservas totais e a parte esquerda – reservas anuais.



**Figura 12.** Reservas das diferentes fontes de energia. Para fontes não renováveis, reservas totais. Para fontes renováveis, reservas anuais.

**Fonte:** INDIC EMS Electronics (2016).

O esquema mostra que as fontes de energia eólica e solar são várias vezes superiores à necessidade mundial de energia. Isto significa que no futuro essas fontes se tornarão as principais fontes de energia.

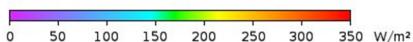
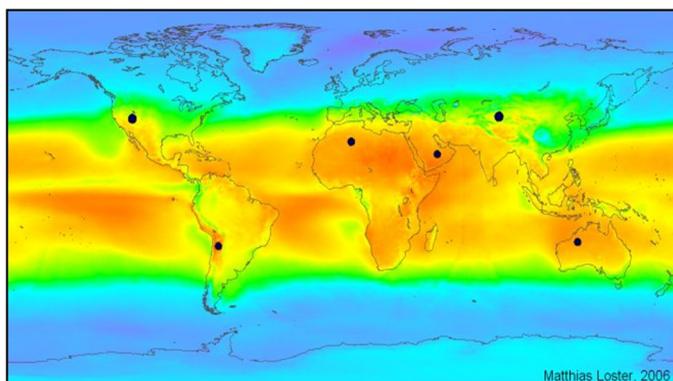
Tecnologias modernas usam superfície do mar, onde vento é mais forte, para construir os geradores da energia eólica pois não ocupa a muito valiosa superfície continental. A figura 13 apresenta como exemplo uma foto das turbinas

eólicas marítimas na Dinamarca. A figura 14 mostra o mapa da distribuição da energia solar na superfície terrestre.



**Figura 13.** Turbinas eólicas marítimas na Dinamarca.

**Fonte:** WIND FARMS IN DENMARK (2016).



$\Sigma = 18 \text{ TWe}$

**Figura 14.** Energia solar na superfície terrestre.

**Fonte:** SOLAR POWER (2016).

A figura 15 apresenta a média anual da distribuição de energia solar na América do Sul.

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 15.** Média anual da energia solar na América do Sul.  
**Fonte:** SolarGIS (2014).

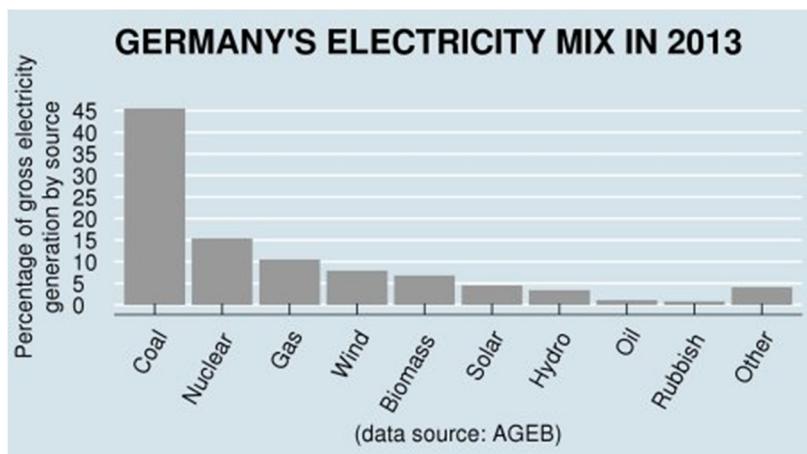
Comparamos (Tabela 3) a estrutura energética dos dois maiores e mais desenvolvidos países da Europa: Alemanha e França.

**Tabela 3.** Comparação da estrutura energética da Alemanha e da França.

**Fonte:** ELECTRICITY GENERATION (2006) e Wilson (2014).

| Países                              | Alemanha | França |
|-------------------------------------|----------|--------|
| População (Milhões)                 | 82,42    | 63,33  |
| Geração EE ( $10^9$ kWh)            | 593,20   | 540,24 |
| Consumo EE per capita (MWh/Pés/ano) | 7,20     | 8,53   |
| Emissão CO <sub>2</sub> ( $10^6$ t) | 857,60   | 417,75 |
| % de Emissão mundial                | 3        | 1      |

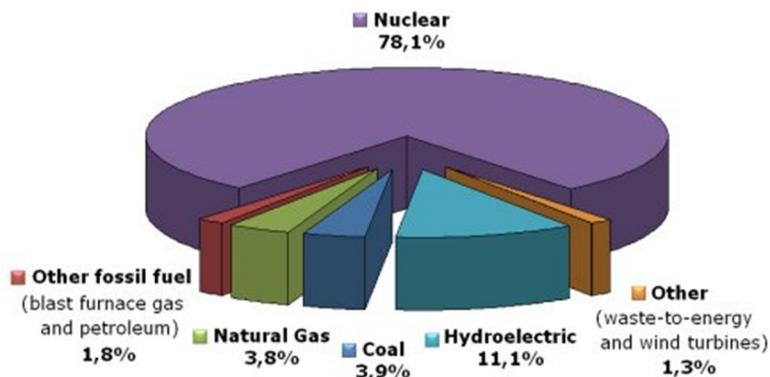
As fontes energéticas da Alemanha são apresentadas na figura 16.



**Figura 16.** Estrutura energética da Alemanha.

**Fonte:** Wilson (2014).

A figura 17 apresenta a energia elétrica, por setores, na França.



**Figura 17.** Energia elétrica por setores na França.

**Fonte:** ELECTRICITY GENERATION (2006).

As energias renováveis, como as energias solar e eólica, não são tão desenvolvidas na França como na Alemanha. No entanto, a energia nuclear, que apresenta quase 80% de toda sua energia, é suficiente para tornar o país bastante limpo, com pequenas emissões de poluição e de gás carbônico.

As energias renováveis e, principalmente, as energias eólica e solar apresentam o mais rápido crescimento de tecnologias energéticas em todo mundo, especialmente, em países desenvolvidos da Europa, Estados Unidos, China, Japão, entre outras.

As figuras 18 e 19 mostram exemplos de usinas de energia eólica e solar.



(a)



(b)

**Figura 18.** Geradores da energia eólica. (a) Geradores de 1MW nos Países Baixos; (b) QR5 Quiet revolution\_Gerador vertical eólico para casas, independente da direção do vento em Bristol, Inglaterra.

**Fonte:** WIND TURBINE (2016).

A energia solar é o futuro energético do mundo. Existem três principais tecnologias de transformação de energia solar para energia térmica e elétrica:

**1. O aquecimento solar** é o uso da energia solar para o aquecimento da água usada para banhos, piscinas e processos industriais. Trata-se de uma fonte energética abundante e gratuita. Também existe o aquecimento da água pela utilização de coletores solares.

**2. Energia heliotérmica** ou **energia solar térmica concentrada** ou, como é internacionalmente conhecido, **CSP** (*Concentrating Solar Power*), é uma tecnologia de geração de energia elétrica renovável que transforma irradiação solar direta em energia térmica e subsequentemente em energia elétrica. Através da concentração dos raios solares diretos, até temperaturas acima de  $1000^{\circ}\text{C}$  podem ser atingidas. (figura 19).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 19.** Usinas de energia solar (a) CSP Novatec\_Solar\_Puerto\_Errado, (b) Torre solar da usina

## Meteorologia em tópicos – volume 5

heliotérmica PS10, (c), Mojave CSP, Marrocos; (d) Disco parabólico com motor Sterling.

**Fonte:** CONCENTRATED SOLAR POWER (2016).

Em 2012, uma capacidade total de 1,7 GW foi instalada no mundo, gerando 3,19 TWh de eletricidade. No mesmo momento, 2,7 GW se encontraram em construção e 8,2 GW em fase de planejamento (RAGJOR, 2013).

**3. Painéis solares fotovoltaicos** ou células fotovoltaicas são dispositivos utilizados para converter a energia da luz solar em energia elétrica (figura 20).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 20.** Células Fotovoltaicas em diferentes prédios e em um avião. (a) Visão da Estação Espacial Internacional e seus painéis solares; (b) Igreja Dorfkirche em Grefswald, Alemanha; (c) Uma "árvore" fotovoltaica em Gleisdorf na Áustria; (d) Cidade Ota Solar City, Japão; (e) 29 MW Krughütte Solar Park Eisleben, Alemanha, (f) Helios voando.

**Fonte:** PHOTOVOLTAICS (2016).

A comparação dos preços finais da produção de 1kWh de energia elétrica por diferentes fontes, durante um ciclo total de vida das usinas iguais a 60 anos, normalizados na produção de  $0,5 \times 10^{12}$  kWh, mostrou que os menores preços são da hidro energia e da energia nuclear (Figura 21).

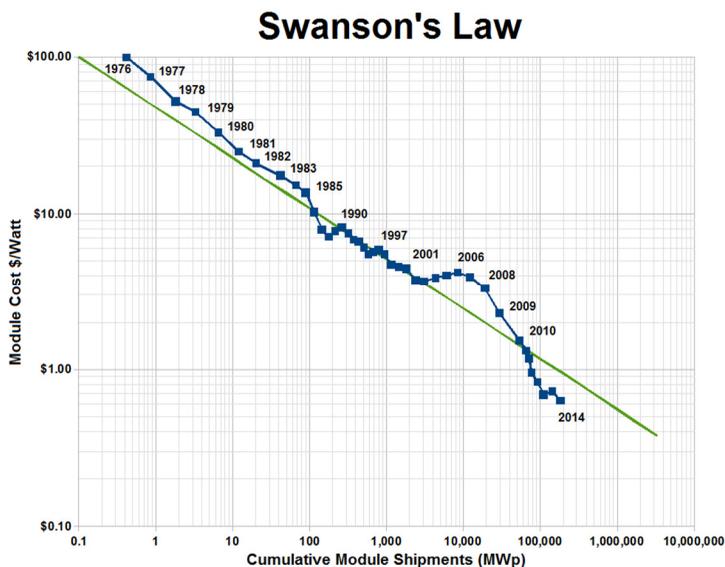


**Figura 21.** Preços de 1 kWh de energia elétrica produzida por diferentes fontes.

**Fonte:** TOTAL LIFE CYCLE CASTS (2016).

A figura 22 apresenta a Lei de Swanson sobre queda de preço de placas fotovoltaicas por aumento de produção de energia solar. A Lei de Swanson é uma observação de que o preço dos painéis solares fotovoltaicos tende a cair por 20% para cada duplicação do volume dos painéis instaladas.

Atualmente, os custos diminuem a metade a cada 10 anos.  
(SWANSON, 2006)



**Figura 22.** Lei de Swanson. Queda de preço de placas fotovoltaicas por aumento de produção de energia solar.  
**Fonte:** SWANSON'S LAW (2016).

## 2.11 Energia Nuclear em 2015

435 é o número total de reatores comerciais funcionando em **31** países (104 só nos EUA).

A capacidade elétrica total deles é superior a 375.000 MW.

Promove mais que **11%** da energia elétrica mundial (França ~75%), sem emissão de gás carbônico.

**72** reatores em construção (28 na China)

## Meteorologia em tópicos – volume 5

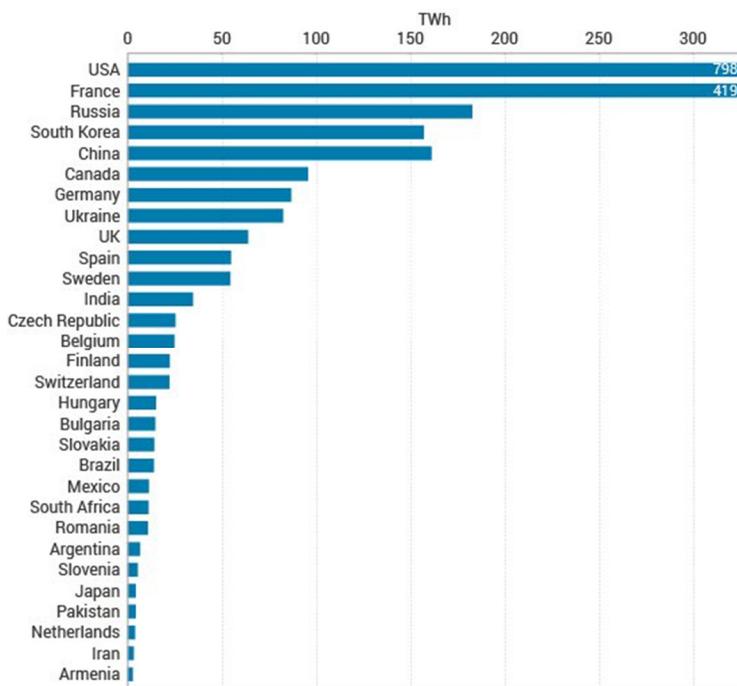
**240** reatores de pesquisa em 56 países

**180** reatores nucleares especiais

**140** navios e submarinos nucleares

A geração da energia nuclear nos países está apresentada na figura 23.

**Nuclear Generation by Country 2015**



Source: IAEA PRIS Database

**Figura 23.** Geração em TWh da energia nuclear em diferentes países do mundo em 2015.

**Fonte:** World Nuclear Association (2016).

O mapa da figura 24 apresenta a posição de todos reatores nucleares no mundo. É visível que a maioria dos reatores se localizam nos países desenvolvidos como EUA, países da Europa e no Japão.



**Figura 24.** Mapa da posição dos reatores nucleares no mundo. **Fonte:** ENERGIA NUCLEAR (2016).

### 2.11.1 Produção de Hidrogênio

Na tabela 2 é visível que o hidrogênio é um combustível mais eficiente do que o gás natural e a gasolina. Além disso, ele é um combustível limpo, que não emite gás carbônico e outros poluentes. Por isso, várias empresas no mundo, tais como Toyota e Honda, desenvolvem carros usando hidrogênio como combustível. Isto significa que é preciso

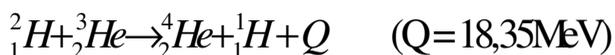
aumentar a produção de hidrogênio, pois ele pode se tornar um dos principais combustíveis no futuro.

No processo químico de produção de H<sub>2</sub> na base de gás natural, para gerar 1 kg de H<sub>2</sub> a tecnologia emite para atmosfera 9 kg de CO<sub>2</sub>.

Um Reator Nuclear durante o dia pode produzir uma quantidade de H<sub>2</sub> equivalente a 750.000 L de gasolina.

### 2.11.2 Reatores de fusão nuclear

Uma das possibilidades futuras do uso da energia nuclear é o uso de reatores de fusão, que usam outro tipo de reação nuclear, a reação de fusão ou de síntese de núcleos de Hélio de isótopos do hidrogênio. Algumas reações típicas da fusão nuclear são apresentadas na figura 25, onde energia Q liberada nas reações nucleares esta apresentada em unidade de energia Mega elétron volt (MeV); n é o neutron.

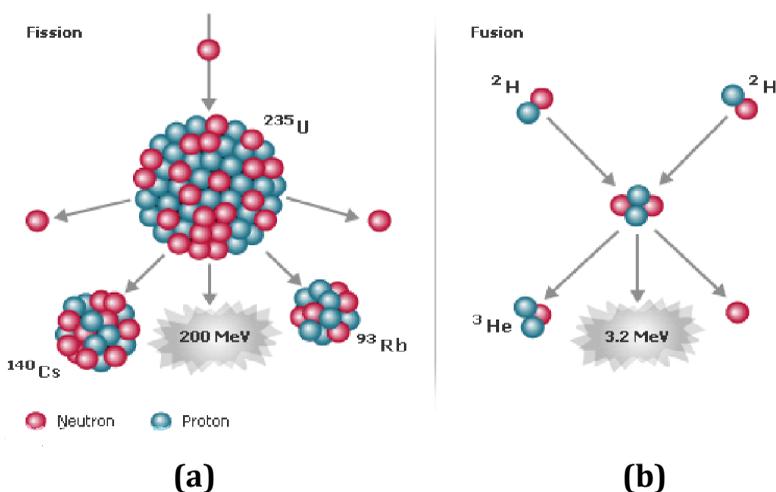


**Figura 25.** Diferentes reações da fusão nuclear.

**Fonte:** Levit e Santos (1997).

Na figura 26 são apresentados os esquemas das reações nucleares de fissão e de fusão. Reação de fissão é o

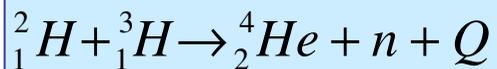
decaimento de núcleos pesados, como Urânio-235, provocados por nêutrons de muito baixa velocidade com a liberação de grande quantidade de energia (cerca de 200 MeV). Reação de fusão é o processo de síntese de núcleos mais pesados, como He, de núcleos mais leves, como Hidrogênio com liberação de energia.



**Figura 26.** Reações nucleares. (a) fissão e (b) fusão

**Fonte:** NUCLEAR REACTIONS (2016).

Uma importante reação de fusão é apresentada na figura 27, onde  $Q$  é a energia liberada na reação, que vale 17,6 MeV.  $n$  é nêutron.



**Figura 27.** Uma das importantes reações de fusão nuclear. Onde Q é a energia liberada e n é o nêutron.

**Fonte:** Levit e Santos (1997).

A energia liberada na fissão é de 175 MeV.

A energia liberada por um núcleon em duas reações pode ser calculada abaixo, onde A é a massa do núcleo e E é a energia liberada na reação:

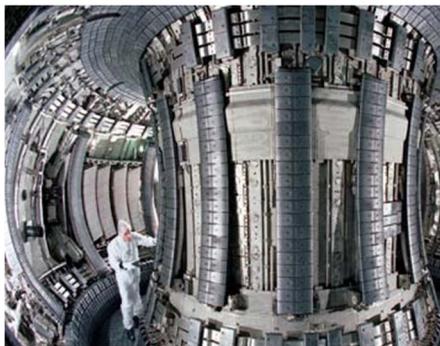
Na fusão:  $A = 2+3 = 5$   $E/A = 17,6/5 = 3,52$  MeV.

Na fissão:  $A = 235$   $E/A = 175/235 = 0,74$  MeV.

Portanto, a energia desprendida por grama na reação de fusão é cerca de 4-5 vezes maior do que na de fissão.

Os reatores nucleares de fusão são muito mais limpos do que os reatores modernos nucleares de fissão. Eles não produzem produtos de decaimento de núcleos pesados, apresentados na maior parte do lixo nuclear dos reatores de fissão. Por isso, esses reatores são o sonho da ciência e da tecnologia moderna. Há muitos anos, cientistas e engenheiros de todo mundo estão tentando realizar este sonho, porém, até agora sem resultado. Em vários países como EUA, Rússia, Japão, Inglaterra e Itália equipes científicas internacionais vêm desenvolvendo tecnologias diferentes para a realização dessa reação nuclear. Em construção, estão cerca de 5

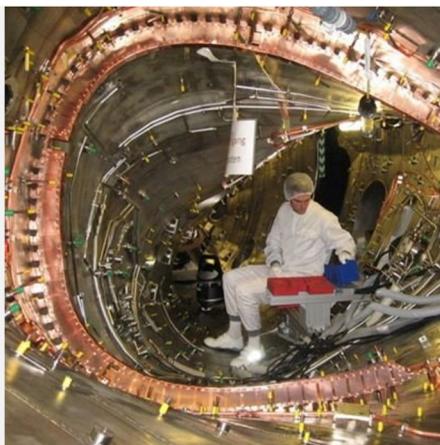
reatores nucleares de fusão de tipos diferentes. A figura 28 apresenta três diferentes tipos dos reatores de fusão.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 28.** Reatores nucleares de fusão em construção. (a) Reator de fusão TOKOMAK (Jet Fusion Reactor 007); (b) Construção de reator Stellarator W7-x ; (c) Por dentro do W7-x Stellarator; (d) Novette Laser.

**Fonte:** FUSION POWER (2016).

## **2.12 Energia e meteorologia**

### **2.12.1 Tecnologias energéticas afetam o clima e o tempo**

Nos itens 2.3 e 2.6 foram apresentadas as influências das tecnologias energéticas nas mudanças climáticas, provocadas pelo aumento da emissão dos gases de efeito estufa. Em 2012, 31,7 Gt de CO<sub>2</sub> foram emitidos por essas tecnologias. Na parte 2.7 mostrou-se a poluição atmosférica pelo transporte e produção da energia.

Além disso, pesquisas e práticas das indústrias energéticas apresentou-se também a influência da tecnologia de energias renováveis sobre o meio ambiente e o tempo de mesoescala. Por exemplo, as hidrelétricas mudam a superfície natural de rios, criando grandes lagos, provocando aumento da evaporação de água e, como consequência, o aumento da umidade local (HINRICHS, 2004).

A energia hidrelétrica cria grandes problemas ao meio ambiente. Os imensos lagos, resultantes do represamento dos rios pelas usinas hidrelétricas, destroem áreas agrícolas e florestas nativas, acarretando em centenas de milhares de desabrigados. Podem, portanto, resultar na destruição de ecossistemas inteiros ao redirecionar a água de extensas áreas, causando inundações catastróficas em outras (ALTMANN, 2002).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

A construção de um grande número de geradores de energia eólica provoca mudança na distribuição dos ventos naturais em ambientes locais e em mesoescala (Figura 29 e 30).

A criação de métodos e modelos de previsão do tempo depende do planejamento do setor energético local e global.



**Figura 29.** Geradores de energia eólica.

**Fonte:** Via Maxi (2011).



**Figura 30.** 6MW turbinas de Siemence na Dinamarca.

**Fonte:** WIND POWER (2016).

### **2.12.2 Meteorologia para o setor energético**

Algumas das principais interações entre a atmosfera e a indústria energética, com um foco especial em conceitos e previsões através dos quais a meteorologia auxilia a indústria e a sociedade, são considerados em DUTTON (2010). Previsões probabilísticas temporais e sazonais devem aproveitar as vantagens oferecidas pelo conhecimento contemporâneo e pelo potencial computacional para esclarecer os riscos e oportunidades na indústria na escala diária e sazonal. As mudanças climáticas, independentemente da causa, impõem desafios potenciais para a indústria de energia, talvez o mais significativo é

decorrente das pressões política e econômica. Um esquema de análise formal pode auxiliar as empresas de energia a prever e gerir as implicações e consequências das mudanças climáticas em seus negócios (DUTTON, 2010; TROCCOLI, 2010a; TROCCOLI, 2010b).

A "ENERGIA" continua a ser uma área prioritária em vários programas e atividades da Organização Mundial de Meteorologia (OMM). As relações entre os diversos aspectos da energia em um contexto social e climático/temporal estão se tornando cada vez mais evidentes. Energia é uma das forças motrizes do desenvolvimento socioeconômico. Muitas formas de energia estão usando o clima como um recurso, especialmente formas novas e renováveis de energia, como a energia solar e eólica.

A produção e utilização de energia tem um impacto complexo sobre o meio ambiente, incluindo um impacto sobre o clima. Por isso a necessidade de produção de energia está diretamente relacionada com o clima e tempo. Formalmente isso se refletiu em documentos como o Plano de Longo Prazo da OMM, onde os seguintes objetivos do Programa Mundial do Clima foram formulados (OLSSON, 1994; TROCCOLI, 2010b):

1. Facilitar a coleta e a gestão de dados climáticos e o monitoramento do sistema climático global, incluindo a detecção e avaliação da variabilidade e das mudanças climáticas;

2. Promover uma aplicação eficaz do conhecimento do clima, da informação em benefício da sociedade e da

prestação de serviços relacionados ao clima, incluindo a previsão de variações climáticas significativas, tanto naturais quanto antropogênicas;

3. Avaliar os impactos da variabilidade climática e das mudanças que poderiam afetar significativamente as atividades econômicas ou sociais, aconselhar os governos sobre o mesmo e contribuir para o desenvolvimento de uma gama de estratégias de respostas socioeconômicas que poderiam ser usadas pelos governos e pela comunidade;

4. Melhorar a compreensão dos processos climáticos para determinar a previsibilidade do clima, incluindo sua variabilidade e mudança, identificando a extensão da influência humana sobre o clima, e desenvolver a capacidade de previsão do clima.

Os principais objetivos a longo prazo da Programa de Aplicações Climáticas Mundiais e Serviços (*World Climate Applications and Services Programme*) (OLSSON, 1994) são:

1. Ajudar os membros no desenvolvimento de serviços baseados na aplicação das informações climáticas e conhecimento para o desenvolvimento sustentável nacional, com ênfase em métodos de adaptação, e mitigação dos efeitos adversos do clima e suas variações;

2. Promover a sensibilização para os benefícios potenciais das aplicações da informação e do conhecimento no esforço humano e da prestação de serviços meteorológicos;

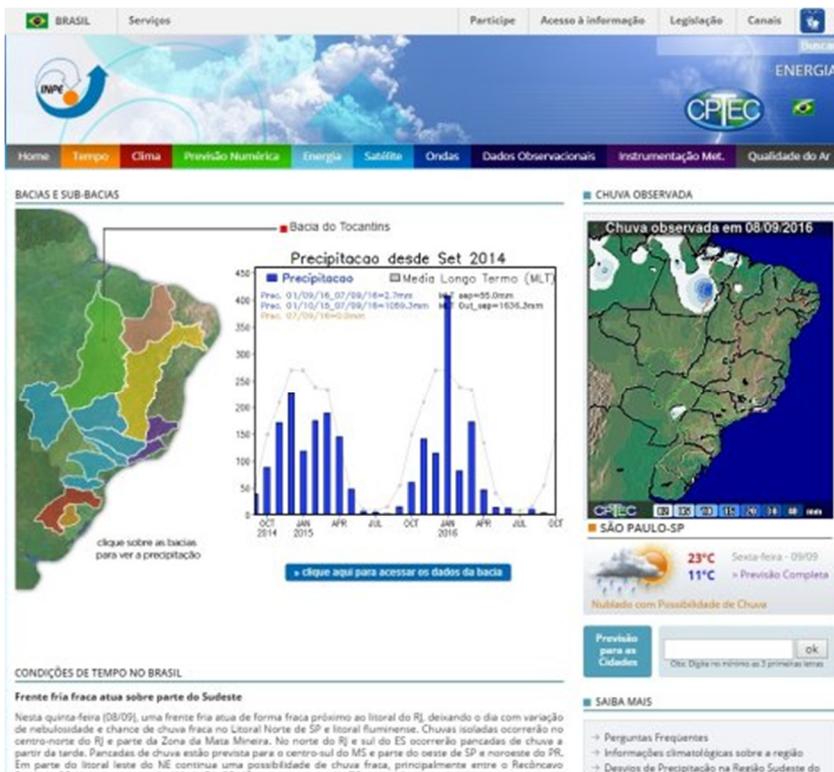
3. Facilitar o acesso às técnicas práticas para as aplicações da informação sobre o clima: as atividades da

OMM na área de energia durante a década 1992-2001 incluíram: (i) Uma avaliação futura do tempo e do clima e suas implicações para a energia, (ii) avaliação dos efeitos do clima e das alterações climáticas sobre o sector de energia e (iii) facilitar as aplicações práticas da informação meteorológica, hidrológica e metodologias relacionadas a várias áreas da energia: produção, conservação e distribuição.

A OMM está seguindo alguns desses objetivos, apoiando o trabalho do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)) e o Comitê Intergovernamental de Negociação (*Intergovernmental Negotiating Committee* (INC)) para a Convenção-Quadro sobre as Alterações Climáticas (*Framework Convention on Climate Change* (FCCC)). (OLSSON, 1994; TROCCOLI, 2010b).

Na página do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Brasil existe um setor relacionado a Energia (figura 31), criado principalmente para auxiliar setor relacionado a energia hidrelétrica, onde é apresentado informações sobre precipitação em diferentes bacias (CPTEC, 2016).

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 31.** Setor de Energia na página do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Brasil.

**Fonte:** CPTEC (2016).

Por necessidade, devido aos problemas em conjunto entre as mudanças climáticas e a produção da energia, foram desenvolvidas novas disciplinas nas faculdades e universidades no Brasil e no mundo. Na Universidade de São Paulo (USP), por exemplo, foi criada uma disciplina chamada “Energia e Poluição”.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Os modelos climáticos utilizam métodos quantitativos para simular as interações da atmosfera, oceanos, superfícies continentais e gelo. São utilizados para vários propósitos que vão desde o estudo da dinâmica dos sistemas climáticos até projeções futuras do clima (USP, 2016).

A atmosfera é um dos elementos mais importantes dentro da política e tem forte influência nas decisões tomadas no setor energético. O desempenho deste setor depende diretamente do clima e é vulnerável a eventos extremos, como tempestades acompanhadas de chuva intensa, ventos fortes e raios, que podem ocasionar grandes danos ao sistema.

O tempo (meteorológico) é o principal responsável pela demanda e uma das principais causas de queda de energia no Brasil. Tanto os geradores quanto os transmissores, distribuidores e comercializadores de energia estão suscetíveis às variações no tempo e no clima, influenciando inclusive no preço do serviço.

Informações sobre o clima, a partir de previsões sazonais a interanuais, bem como cenários das mudanças climáticas, estão começando a ser levados em consideração nos processos de tomada de decisão. Além disso, informações de tempo e clima são fundamentais no desenvolvimento e utilização dos recursos energéticos renováveis.

Dispondo de informações meteorológicas precisas e, principalmente, confiáveis, o usuário será capaz de:

Produzir previsões de carga mais precisa;

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Saber o melhor momento para compra ou tomar decisões de comercialização de energia;

Restabelecer a energia de forma mais rápida e reduzir os custos inerentes;

Operar de forma mais segura e com o mínimo de inatividade;

Melhor planejamento das atividades operativas e da aplicação de melhores práticas de manutenção.

(ORÁCULO METEOROLOGIA, 2016)

A meteorologia possui ligações íntimas com as fontes de energia renovável.

### **Energia Eólica**

A variabilidade meteorológica do vento é uma importantíssima fonte de incertezas na indústria da energia eólica, sendo geralmente classificada como “prioridade número um”.

Estas fontes de incerteza podem ser puramente meteorológicas, como por exemplo a intensidade do vento e a turbulência; podem ser não-meteorológicas, como a porcentagem de turbinas fora de funcionamento em determinado momento; e podem também ser uma combinação dos dois, como quando rajadas fortes de vento danificam turbinas.

Muitas das responsabilidades de compreender o funcionamento destas incertezas e prever seu comportamento ficam a cargo de meteorologistas. Isso se dá

principalmente através de previsões do tempo e do clima.

Além disso, a instalação de turbinas geralmente é realizada em áreas que otimizam seu funcionamento. Dados históricos climáticos são muito utilizados para analisar a velocidade média do vento em determinado local e, conseqüentemente, calcular a quantidade de energia que as turbinas serão capazes de gerar caso sejam instaladas ali.

### **Energia Solar**

O design dos sistemas de captação de energia solar e a validação de sua eficiência estão diretamente ligados à quantidade de radiação solar incidente, uma das variáveis de estudo da meteorologia.

Vários fenômenos são capazes de interferir nesta variável, como a formação de nuvens, a presença de aerossóis na atmosfera, etc. Portanto, a instalação de painéis solares também depende de um estudo climático da região, que envolve principalmente a temperatura do ar e a radiação solar. Este tipo de estudo influencia em decisões como o tamanho dos painéis e o material utilizado em sua construção.

Para coletar estes dados, podem ser utilizados desde instrumentos de superfície, como piranômetros, até imagens de satélite.

Além disso, o aumento ou a diminuição da nebulosidade no local são uma fonte importantíssima de incerteza para a geração de energia solar, que pode ser resolvida com previsão e monitoramento do tempo.

### **Energia Hidrelétrica**

A produção de energia hidrelétrica é governada pela quantidade de água disponível, ou seja, pelas chuvas que incidem na região onde a usina se localiza. A previsão meteorológica com semanas ou até meses de antecedência, portanto, permite uma otimização na produção de energia hidrelétrica.

Em casos de localidades particulares, podem também ser utilizados dados da climatologia local, que fornecem médias mensais de precipitação acumulada ao longo do ano. Estes dados podem complementar ou substituir a previsão do tempo, dependendo do projeto.

De qualquer maneira, a previsão é particularmente importante no inverno, quando existe uma demanda maior de energia a um preço menor. No verão, a previsão da temperatura do ar e do fluxo de água nos rios é útil tanto para prever o desempenho da produção energética quanto para prever a capacidade de resfriamento em unidades térmicas instaladas ao longo dos rios.

Como as condições meteorológicas podem afetar desde o comportamento das pessoas até os sistemas de transmissão de energia (como em casos de tempestades que danificam as linhas), uma previsão do tempo certa pode fazer empresas economizarem e/ou lucrarem quantidades imensas de dinheiro, simplesmente ajustando o preço da energia às condições previstas.

Por esta razão, existem muitos pesquisadores estudando as correlações entre a meteorologia e o

fornecimento de energia, desenvolvendo métodos cada vez mais eficazes de explorar as informações sobre o tempo e o clima e utilizá-las na gestão de risco do setor de energia. (ROBINSON e EASTERLING, 1982; GARCÍA-MORALES e DUBUS, 2007; BANTA et al., 2013).

**Três conferências internacionais:** ICEM 2011 International Conference on Energy & Meteorology, Australia; ICEM 2013, 2<sup>nd</sup> International Conference on Energy & Meteorology, France; ICEM 2015, 3<sup>rd</sup> International Conference on Energy & Meteorology, USA, tinham o objetivo de promover novas ligações entre energia e meteorologia. (ICEM 2011; ICEM 2013; ICEM 2015).

Em particular a 3<sup>a</sup> Conferência (ICEM, 2015) forneceu uma plataforma internacional única para demonstrar as pesquisas desenvolvidas recentemente, com excelentes oportunidades para a comunicação entre cientistas, engenheiros, economistas, políticos e outros especialistas que trabalham no nexo de energia, com o tempo e clima.

Os principais tópicos incluíram:

- Avaliação dos recursos de energia
- Previsão para aplicações dos sistemas energéticos
- Impactos ambientais das instalações energéticas
- Gestão do tempo e dos riscos climáticos
- Rede de Integração e redes inteligentes

## Meteorologia em tópicos – volume 5

- Política energética, programas, educação e questões intersectarias

O crescente conhecimento e experiência acerca do risco da produção de energia e suas consequências no tempo e clima estimulou um aumento no interesse sobre pesquisas relacionadas a interação entre o tempo, clima e a energia. Embora este aumento da atenção tenha sido estimulado por um renovado e fervoroso interesse sobre fontes renováveis de energia, informações sobre o tempo e clima também são fundamentais para a gestão do fornecimento de energia de outros setores energéticos (por exemplo, operações de petróleo *offshore*), bem como a compreensão da demanda estimada de energia.

Até recentemente, tais pesquisas aplicadas foram discutidas em sessões especializadas durante as conferências, criadas por organizações diferentes da indústria relacionadas com energia eólica (como *American Wind Energy Association*), energia solar (como *SolarPACES*), meteorologia (tais como *European Meteorological Society*) entre outras.

Tal como acontece com a Conferência Internacional de Energia e Meteorologia (ICEM) 2011 ([www.icem2011.org](http://www.icem2011.org)) e ICEM 2013 ([www.icem2013.org](http://www.icem2013.org)), o objetivo da ICEM 2015 é proporcionar um fórum onde cientistas, engenheiros, economistas, políticos e outros especialistas e profissionais envolvidos em atividades de estudo ou de aplicação na intersecção entre tempo, clima e energia possam discutir os

resultados das pesquisas recentes e práticas emergentes que vão desde atividades operacionais para o planejamento de investimentos de longo prazo até a elaboração de políticas.

O tema da ICEM 2015 foi "Nova Geração de Práticas Meteorológicas no Sector da Energia" para gerenciar os riscos no tempo e clima criados pela indústria energética, melhorar a coordenação entre especialistas em pesquisas na áreas de tempo e clima e da indústria de energia (ICEM 2011; ICEM 2013; ICEM 2015).

### **2.13 Conclusão**

A demanda por energia está aumentando permanentemente devido ao crescimento populacional e à necessidade de melhorar a qualidade de vida. Entretanto, a maioria das tecnologias modernas estão relacionadas com o meio ambiente e com a meteorologia. Algumas tecnologias de produção e consumo de energia poluem o meio ambiente e também afetam o tempo e clima.

Para resolver o problema foram desenvolvidas novas tecnologias baseadas em fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar.

Isto gerou novos problemas relacionados ao impacto destas tecnologias sobre o tempo e clima, assim como a necessidade de se desenvolver métodos meteorológicos e climáticos para auxiliar o desenvolvimento dessas novas tecnologias.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Uma relativamente nova área das ciências meteorológicas chamada “Energia e meteorologia” está sendo desenvolvida.

Essa ciência está criando métodos e modelos de previsão climática e temporal que visam planejar economicamente a construção das novas usinas de energia renovável.

### 2.14 Referências bibliográficas

ALTMANN, G. Opção para uma política energética sustentável no Brasil. Seminário Internacional. **Fontes Alternativas da Energia e Eficiência Energética**, Espaço Cultural da Câmara dos Deputados, Brasília, 18 – 20 de junho de 2002

BANTA, R.M.; PICHUGINA, Y.L.; KELLEY, N.D.; HARDESTY, R.M.; BREWER, W.A. Wind Energy Meteorology: Insight into Wind Properties in the Turbine-Rotor Layer of the Atmosphere from High-Resolution Doppler Lidar. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 94, 883–902, 2013.

BARNETT, T.P.; PIERCE, D.W.; ACHUTARAO, K.M.; GLECKLER, P.J.; SANTER, B.D.; GREGORY, J.M. e WASHINGTON, W.M. Penetration of Human-Induced Warming into the World's Oceans. **Science**, V. 309 Vol. 309, Issue 5732, pp. 284-287, 2005. DOI: 10.1126/science.1112418.

BINTANJA, R.; GRAVERSEN, R. G.; HAZELEGER, W. Arctic

winter warming amplified by the thermal inversion e consequent low infrared cooling to space. **Nature Geoscience**, 4:758–761, 2011.

BLASING, T. J. **Recent Greenhouse Gas Concentrations**. Disponível em: [http://cdiac.ornl.gov/pns/current\\_ghg.html](http://cdiac.ornl.gov/pns/current_ghg.html). The Carbon Dioxide Information Analysis Center, DOI: 10.3334/CDIAC/atg.032. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

BREDENBERG, A. **The Damage Done in Transportation -- Which Energy Source Will Lead to the Greenest Highways?** THOMASNET.com. Industry News. April 30, 2012.

<http://news.thomasnet.com/imt/2012/04/30/the-damage-done-in-transportation-which-energy-source-will-lead-to-the-greenest-highways> Baseado no EIA (U.S. Energy Information Administration) <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/data/browser/>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

CHAPMAN, W. L.; WALSH, J. E. A Synthesis of Antarctic Temperatures. **Journal of Climate**, 20(16):4096–4117, 2007.

CONCENTRATED SOLAR POWER, 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

CPTEC. Pagina do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://energia1.cptec.inpe.br>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

DUTTON, J.A. **Weather, Climate, the Energy Industry**. In: Troccoli, A. (ed.), Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry, p.3-23, 2010.

ELECTRICITY GENERATION, 2006. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity\\_generation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_generation). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ENERGIA NUCLEAR. 2016. Disponível em: <http://energiaterceiro06.tumblr.com/post/1473898757/energia-nuclear>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). 2014. Disponível em: [http://www.farolcomunitario.com.br/energia\\_000\\_0108-brasil-pode-reduzir-emissao-de-gases-do-efeito-estufa.php](http://www.farolcomunitario.com.br/energia_000_0108-brasil-pode-reduzir-emissao-de-gases-do-efeito-estufa.php). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

FUSION POWER, 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

GARCÍA-MORALES, M. B.; DUBUS, L. Forecasting precipitation for hydroelectric power management: how to exploit GCM's

seasonal ensemble forecasts. **Int. J. Climatol.**, 27, 1691–1705, 2007. DOI: 10.1002/joc.1608.

HARRIS, J.M.; ROACH, B. **Environmental e Natural Resource Economics: A Contemporary Approach**, 2016, 3-a Ed. 584 p.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. Ed. Thomson, SP, 543p, 2004.

IAEA (International Atomic Energy Agency). **Greenhouse Gas Emission**. 2011. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/sustain.pdf>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ICEM 2011 **International Conference on Energy Meteorology**, 8 – 11 November 2011, Gold Coast, Queensland, Australia. Disponível em: [www.icem2011.org](http://www.icem2011.org). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ICEM 2013, **2<sup>nd</sup> International Conference on Energy Meteorology**, 24 – 28 June 2013, Toulouse, France. Disponível em: [www.meteo.fr/cic/meetings/2013/ICEM/](http://www.meteo.fr/cic/meetings/2013/ICEM/). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ICEM 2015, **3<sup>rd</sup> International Conference on Energy Meteorology**, 22 – 26 June 2015, Colorado, USA. Icem2015.org Acessado em: 25 de setembro de 2016.

IEA (International Energy Agency). **Energy e Air Pollution. World Energy Outlook**. Special Report. OECD/IEA, 2016. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

INDIC EMS Electronics PVT. LTD. 2016. Disponível em: <http://indicelectronics.com/market-served/energy/>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Technical Summary** ([http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_TS\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_TS_FINAL.pdf)). Contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

KIEHL, J.T.; TRENBERTH, K.E. Earth's annual global mean energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 78(2):197–208, 1997.

KIM, S. **Don't Dismiss Elon Musk's Submarine Car Idea Just Yet**. abc News, 18/10/2013. Disponível em: <http://abcnews.go.com/Business/elon-musks-craziest->

## Meteorologia em tópicos – volume 5

ideas-science-fiction/story?id=20610695. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

LEVIT, V.; SANTOS, A. S. **Física e Química Nuclear**. Radioquímica. V.1. Universidade Federal de Pelotas. 1997. 77p.

MANNING, A.; KEELING, R. Global oceanic and the biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. **Tellus B**, 58(02):95-116, 2006.

MEARNS, E. Brazil – Samba Energy | Energy Matters. Posted on July 8, 2014 Energy, Environment e Policy <http://euanmearns.com/page/23/?pv97> Energy e Mankind part 3. Posted 21/07/2014 <http://euanmearns.com/energy-e-mankind-part-3/>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

National Geographic. 2011. Disponível em: <https://wattsupwiththat.com/2011/11/18/make-29-on-your-money-guaranteed/>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

NICHE S. **Solar Power 2014 – Still Growing**. Posted 05/02/2015. Disponível em: <https://thelukewarmersway.wordpress.com/2015/02>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

NOAA (National Oceanic e Atmospheric Administration).

**Global Climate Change Indicators.** 2011. Disponível em: <http://www.ncdc.noaa.gov/indicators/>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

NOAA (National Oceanic e Atmospheric Administration). **Science publishes new NOAA analysis: Data show no recent slowdown in global warming** (<http://www.noaa.gov/news.noaa.gov/stories2015/noaa-analysis-journal-science-no-slowdown-in-global-warming-in-recent-years.html>), 04/06/2015. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

NUCLEAR REACTIONS. 2016. Disponível em: <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0/s24-02-nuclear-reactions.html>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

OLSSON, L.E. ENERGY-METEOROLOGY: A new discipline. **Renewable Energy**. V.5, Issues 5-8, August, Pp. 1243 – 1246, 1994.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2014. Disponível em: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ORÁCULO METEOROLOGIA - Blog - A Energia Renovável e a Meteorologia. Disponível em: <https://oraculo.me/blog/posts/a-energia-renovavel-e-a-meteorologia>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

PHOTOVOLTAICS. 2016. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

RAGJOR, G. **Renewable Power Generation - 2012**. 21 October 2013. Renewable Energy Focus.com. Disponível em: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/35168/renewable-power-generation-2012-figures>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

ROBINSON, P.J.; EASTERLING, W.E. Solar Energy Climatology of North Carolina. **J. Appl. Meteor.**, 21, 1730–1738, 1982.

SOLARGIS. 2014. Disponível em: <https://www.google.com.br/search?q=offshore+wind+farms+in+denmark&authuser=1&biw=1440&bih=767&site=webhptbm=ischtbo=usource=univsa=Xved=0ahUKEwiT2-WPlbzPAhXDgJAKHdgOBjcQsAQIMg#authuser=1&tbm=ischq=solargis>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

SOLAR POWER, 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

SOLOMON, S.D.; QIN, M.; MANNING, Z.; CHEN, M.; MARQUIS, K.B.; AVERYT, M.; TIGNOR H.L. MILLER (Eds.)). Cambridge University Press, 2007, pp. 449–454. IPCC (2007). **Climate**

**Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

SWANSON, R.M. A vision for crystalline silicon photovoltaics. **Progress in Photovoltaics: Research e Applications.** 14: 443–453, 2006. DOI:10.1002/pip.709.

SWANSON'S LAW. 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law). Acessado em: 25/09/2016

TESLA MOTORS. 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Motors](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Motors). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

TOTAL LIFE CYCLE CASTS. 2016. Disponível em: [https://www.google.com.br/search?q=total+life+cycle+cost+authuser=1biw=1440bih=767site=webhpsource=lnmstbm=ischsa=Xved=0ahUKEwjriaPQ27zPAhUJJB4KHUCjDNQQ\\_AUIBigB#imgrc=1sooEp7ApIjFkM%3A](https://www.google.com.br/search?q=total+life+cycle+cost+authuser=1biw=1440bih=767site=webhpsource=lnmstbm=ischsa=Xved=0ahUKEwjriaPQ27zPAhUJJB4KHUCjDNQQ_AUIBigB#imgrc=1sooEp7ApIjFkM%3A). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

TROCCOLI, A. **Weather e Climate Predictions for the Energy Sector.** In: A. Troccoli (ed.), Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry, p.3-23, 25p, 2010a.

TROCCOLI, A. **Managment of Weather e Climate Risk in the Energy Industry**. NATO Science for Peace e Security Series, Springer Academic, 344 pp,. Springer Science + Business Media B.V. 2010b. DOI: 10.1007/978-90-481-3692-6.

US EPA (Environmental Protection Agency) - Science: Climate Change: Climate Change Science Overview. 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/climate-change-science/overview-climate-change-science>. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

USP. **Energia e Poluição** - disciplinas.stoa.usp.br. Disponível em: [disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=233790](http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=233790). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

VIA MAXI, 2011. **Primeiro Parque Eólico da Petrobras entra em operação comercial**, 2 de novembro de 2011. Disponível em: <http://www.viamaxi.com.br/2011/11/primeiro-parque-eolico-da-petrobras-entra-em-operacao-comercial/> Acessado em: 25 de setembro de 2016.

WILSON, R. **Reality Check: Germany Does Not Get Half of its Energy from Solar Panels**. EC Energycollective, August 19, 2014. Disponível em: <http://www.theenergycollective.com/robertwilson190/456>

## Meteorologia em tópicos – volume 5

961/reality-check-germany-does-not-get-half-its-energy-solar. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

WIND FARMS IN DENMARK. 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_offshore\\_wind\\_farms\\_in\\_Denmark](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms_in_Denmark). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

WIND POWER. 2016. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

WIND TURBINE. 2016. A small 6.5 kW Quiet revolution QR5 Gorlov type vertical axis wind turbine in Bristol, Engle. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine). Acessado em: 25 de setembro de 2016.

WMO (World Meteorological Organization). **A summary for current climate change findings e figures** (<http://www.unep.org/climatechange/Publications/Publication/tabid/429/language/en-US/Default.aspx?ID=6306>), 2013. Acessado em: 25 de setembro de 2016.

World Nuclear Association. **Nuclear Power in the World Today**. 2016. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-e-future->

## Meteorologia em tópicos – volume 5

generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx.

Acessado em: 25 de setembro de 2016.

**WORLDMETERS, Current World Population, FAQ, 2016.**

Disponível em: <http://www.worldometers.info/world-population>. Acessado em: 02 de novembro de 2016.

## CAPÍTULO 3

### PALEOCLIMATOLOGIA: RECONSTRUINDO O PASSADO

*Maria Luciene Dias de Melo*

#### 3.1 Introdução

A questão das mudanças climáticas globais é cada vez mais importante, tendo em vista o crescimento populacional, pois atualmente a população mundial ultrapassa os sete bilhões de pessoas, e as atividades desenvolvidas que vêm alterando a cobertura vegetal, a partir de desmatamento, mudança do uso do solo, e também a concentração de gases e partículas que interagem com a radiação de ondas curtas (radiação proveniente do sol) e ondas longas (radiação proveniente da superfície do planeta) que podem intensificar o efeito estufa.

Nos últimos dois séculos, as concentrações de gases de efeito estufa, metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) vêm aumentando na atmosfera, podendo ocasionar mudanças permanentes e irreversíveis no clima. Alguns dos principais efeitos adversos causados e já percebidos nos dias atuais devido às mudanças climáticas são: aumento no nível do mar, alteração no suprimento de água doce, tempestades de chuvas fortes e mais frequentes, e

forte e rápido ressecamento do solo devido a períodos secos mais intensos (MELO, 2007). Nesse sentido, torna-se necessário o entendimento e a quantificação das mudanças climáticas devido às causas naturais e antropogênicas. Por outro lado, para poder entender melhor como poderia ser o clima no futuro faz-se necessário um conhecimento do clima do passado, ou seja, conhecer melhor o histórico do clima. Há duas principais possibilidades de verificar a variação climática de longo prazo:

Uma forma seria através do uso de Modelos Climáticos, sejam atmosféricos ou oceano-atmosfera acoplados, sendo esta uma maneira de se preencher a lacuna entre a escala local e global, e avaliar os mecanismos associados (forçantes naturais ou antropogênicas) às mudanças climáticas. Esses modelos são úteis no exame da relação entre as diversas forçantes e as respectivas respostas do sistema climático (MELO, 2007). Desta maneira, pode-se analisar o quão sensíveis são os modelos a grandes variações climáticas, como por exemplo: variação dos parâmetros orbitais e concentração dos gases de efeito estufa.

Outra forma de verificar a variação climática de longo tempo se dá a partir de registros paleoclimáticos (chamados também de indicadores paleoclimáticos ou *proxys*), que fornecem uma visão “observacional” de muito longo prazo do clima, suas variações e mudanças. Esses indicadores são úteis para detectar mudanças em regimes climáticos do passado, bem como o funcionamento daquele sistema climático, uma vez que possuem um espectro de variação muito maior em

termos de duração, em comparação ao registro instrumental (claro, considerando as incertezas nestas reconstruções do clima). Além disso, contribuem para entender como, em longo prazo, a mudança do clima em tempos recentes poderia se relacionar com mudanças do clima no passado (Melo, 2007). Os registros paleoclimáticos também permitem examinar como o sistema climático respondeu a mudanças climáticas naturais (JANSEN e WEAVER, 2006), e como os modelos simulam a resposta do sistema climático a uma forçante interna ou externa, ou seja, permitem, de certa forma, “validar” as reconstruções de climas passados através de modelos.

Diante deste contexto este capítulo irá apresentar uma reconstrução do clima passado, com enfoque sobre a América do Sul, baseando-se em diversos estudos paleoclimáticos, a partir de análise de sedimentos lacustres, anéis de árvores, amostras de gelo marinho, dentre outros. E no final será montada uma tabela com informações resumidas sobre o paleoclima e a paleovegetação por regiões para o continente.

### **3.2 Paleoclima**

Segundo Ab’Sáber (2007) o optimum climático (entre 6.000 e 5.000 anos atrás) foi o período de maior calor da face da Terra. O aquecimento pós-pleistocênico vinha se fazendo desde 12.700 até 10.000 anos atrás, após a transição complicada de climas muito frios para climas bem mais quentes, sobretudo, áridos e semi-áridos nas regiões inter e

subtropicais da face leste do continente sul-americano. O ápice do aquecimento contribuiu para elevar o nível dos mares em aproximadamente três metros.

No Hemisfério Sul, reconstruções de temperatura na Antártica durante o Holoceno (época do período Quaternário que se iniciou a cerca de 11,5 mil anos atrás e se estende até o presente) mostram um aquecimento entre 11.000 e 9.000 anos atrás, seguido de um esfriamento gradativo no Holoceno tardio (MASSON et al., 2000). Esse período relativamente mais quente não pode ser explicado apenas pelas mudanças na insolação, mas talvez pela reorganização na grande escala do transporte latitudinal de calor pelos oceanos e atmosfera.

A partir da análise de sedimentos oceânicos, Ruddiman e Mix (1993) e Morley e Dworetzky (1993) verificaram que as mudanças na temperatura da superfície do mar (TSM), no período do Holoceno Médio (HM - 6.000 anos atrás), foram muito pequenas. Sendo assim, apenas a forçante radiativa teria maior contribuição para o período.

Análises da TSM, derivadas do isótopo de oxigênio, para o período de 6.500 anos atrás, na região da Papua Nova Guiné, sugerem uma TSM similar ou ligeiramente mais fria que os dias de hoje. Entretanto a razão Sr/Ca (análise de isótopos estáveis, nesse caso: razão entre o estrôncio e o cálcio) indica TSM um pouco mais quente, comparada ao clima presente (Tudhope et al. 2001). A partir daí verifica-se uma dúvida nas análises dos dados paleoclimáticos, que também é verificada nos relatos de Seppä et al. (2005) e Ab'Sáber (2007).

Dados da Antártica, Leste do Canadá e Groenlândia apontaram para uma redução da temperatura atmosférica global durante o HM (STEIG, 1997). Isso pode ser visto principalmente nas regiões polares. No entanto, dados paleobotânicos mostram que as regiões tropicais e subtropicais tornaram-se mais frias ou mais áridas, ou ambas. Em latitudes temperadas, algumas áreas experimentaram um período seco no HM. Em alguns casos, a mudança do clima no HM parece ter sido completamente abrupta (STEIG, 1999).

Gagan et al. (1998) observaram que o oceano tropical apresentou-se mais aquecido (Anomalia de TSM  $> +1^{\circ}$  C) durante o HM e mais frio (ATSM  $< -2^{\circ}$  C) durante o último máximo glacial (LGM – Last Glacial Maximum). Para o HM, verificaram que as TSMs do Atlântico Norte estiveram mais aquecidas, e as TSMs do Pacífico Tropical e Antártico resfriaram, criando um dipolo entre os Hemisférios Norte e Sul (PESSENDA et al., 2004). Analisando outros indicadores, eles concluíram que o clima foi mais quente entre 7.000 – 4.000 anos atrás.

Keefter et al. (2003), a partir da análise de dados paleoclimáticos da costa sul do Peru, verificaram que eventos severos de El Niño ocorreram durante todo o Pleistoceno e em duas ou três divisões do Holoceno, com frequências significativamente diferentes, sendo o período de maior intensidade no Holoceno, entre 11.000 e 9.000 anos atrás. Durante o Holoceno Médio, só foram registrados quatro eventos severos. Os registros paleoclimáticos evidenciam que

no HM o regime de El Niño foi relativamente fraco. Essas condições também foram verificadas por Fontugne et al. (1999), que analisaram registros paleoclimáticos de Quebrada de los Burros, no sul do Peru (Departamento de Tacna). Os dados sugerem baixa intensidade e frequência da ocorrência de El Niño durante o HM. Também, Sandweiss et al. (1996), analisando dados paleoclimáticos (evidências naturais, tais como a composição de gelo, estruturas de árvores, rochas sedimentares e outros fósseis) do norte do Peru, verificaram que o El Niño/Oscilação Sul não ocorreu nos milênios que precedem 5.000 anos atrás, quando o clima era um pouco mais quente que hoje.

Como observado por Thompson et al. (1995), a partir da análise de núcleos de gelo, a região do Peru encontrava-se mais quente que os dias atuais entre 8.200 e 5.200 anos atrás. Tudhope et al. (2001) a partir de bandas de corais de Papua Nova Guiné, verificaram a existência do fenômeno do El Niño/Oscilação Sul (ENOS) nos últimos 130 mil anos. A análise da reconstrução paleoclimática sugere que os eventos de ENOS foram consideravelmente mais fracos no período do HM e em aproximadamente 112 mil anos atrás, visto que, para esses períodos os corais mostram uma menor tendência para eventos extremos. Em se tratando do ENOS, verificou-se que para os dias atuais sua amplitude parece significativamente maior que durante outros períodos, e mais fraca para o HM.

Embora, o sinal do ENOS não seja tão facilmente identificado em estudos paleoclimáticos, episódios de seca no

Holoceno Tardio, possivelmente atribuídos ao ENOS, foram reportados em Carajás, leste da região Amazônica, Delta do Rio Doce e costa brasileira (MARTIN E SUGUIO, 1992; MARTIN et al., 1993). Esse ENOS relacionado com fase seca, entre 7.500 e 3.000 anos atrás, ocorreu simultaneamente com o máximo de seca no Vale do Rio Icatu, região no meio do São Francisco, no nordeste do Brasil (6.000 anos atrás). Porém, a maior expansão da caatinga sobre as dunas (4.200 anos atrás) não está sincronizada com dado paleoclimático de Carajás, mas sim com dois eventos tipo ENOS (1.300 – 2.300 anos atrás) reportados no Vale do Rio Doce. Uma hipótese alternativa para o aumento da aridez entre 8.910 e 6.230 anos atrás e de 4.000 anos atrás e os dias de hoje, no Vale do Rio Icatu, é o deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (DE OLIVEIRA et al., 1999), que poderiam ou não estar associada ao ENOS como também às variações no gradiente meridional de TSM no Oceano Atlântico Tropical. Dados paleoclimáticos da região do Caribe suportam essa hipótese, principalmente entre 8.000 e 2.500 anos atrás, quando os lagos atingiram níveis mais elevados, e climas mais úmidos prevaleceram no Lago Miragoane no Haiti (CURTIS E HODELL, 1993).

Estudos paleoambientais usando indicadores paleoclimáticos têm sido realizados para diversas regiões da América do Sul e fornecem uma representação aproximada do clima no passado. Esses estudos revelaram um comportamento mais seco durante o HM sobre a região amazônica (TURCQ et al., 1998; BEHLING et al., 2000; TURCQ

et al., 2002), sul e sudeste brasileiro (BEHLING, 2002; TURCQ et al., 2002). Além disso, Mayle et al. (2000) e Haug et al. (2001), analisando o norte e nordeste da América do Sul, sugerem o deslocamento da ZCIT para sul de sua posição atual durante o Holoceno (entre 12.000 e 9.000 anos atrás) e verificaram que no HM a região nordeste da Amazônia encontrava-se mais árida.

Baker (2001) a partir de análises de dados paleoclimáticos do Lago Titicaca na Região Amazônica, que datam 25.000 anos atrás, verificaram que o período mais seco nessa região nos últimos 25.000 anos foi entre 6.000 e 5.000 anos atrás, quando o Lago obteve seu menor nível, queda de 85m comparado ao nível atual.

Sifeddine et al. (2003) analisando dados lacustres de Barreirinhas (2,96°S; 43,41°W), no Nordeste do Brasil, verificaram uma redução do nível do lago entre 11.000 e 4.500 anos atrás, sugerindo um período mais seco comparado ao clima presente. Esse resultado foi confirmado a partir da análise de pólen, realizada por Ledru et al. (2002) e por Pessenda et al. (2005), que, pela análise de Matéria Orgânica do Solo (MOS) da região de Barreirinhas, norte do Estado do Maranhão, verificaram que o período entre 9.000 e 4.000 anos atrás foi relativamente mais seco, comparado ao clima presente.

Pessenda et al. (1998b) verificara que grandes áreas na Bacia Amazônica foram afetadas por mudanças na vegetação, durante o Holoceno. A partir da análise de MOS no Estado de Rondônia e sul da região Amazônica, constataram alteração

de clima úmido para seco, sugerindo que entre 7.000 e 4.000 anos atrás essa região foi ligeiramente mais seca do que o clima presente. Essas condições também foram verificadas por Sifeddine et al (1994), Gouveia et al. (1997), Pessenda et al. (1998a) e (1998b) além de Freitas et al. (2001).

Analisando dados de MOS e sedimentos de carvão em nove perfis de solo, coletados em vegetação nativa de Londrina (Paraná), Anhembi, Botucatu e Jaguariúna no Estado de São Paulo e Salitre em Minas Gerais, Pessenda et al. (1996; 2004) verificaram condições climáticas mais secas, no início do Holoceno (entre 11.000 e 10000 anos atrás) e no Holoceno Médio (6.000 e 4.500 anos atrás), comparadas ao clima atual. Isso também foi observado por Ledru (1993), em registros de pólen, nas regiões sul, sudeste e central do Brasil.

Condições mais frias e úmidas foram verificadas na região da Patagônia, no período de 15.000 a 11.000 anos atrás, seguido por uma fase extrema quente e seca entre 11.000 e 7.600 e subsequente resfriamento e aumento da precipitação com pico em 5.000 anos atrás. Isso foi verificado a partir da análise de dados de pólen do Lago Condorito (Patagônia) realizada por Moreno (2004).

Apesar de poucos indicadores paleoclimáticos no Hemisfério Sul, tornou-se possível um melhor entendimento do comportamento climático durante o Holoceno Médio. No entanto, devido aos dados serem esparsos e fragmentados, a melhor forma de preencher a lacuna espacial e temporal é a partir de modelos climáticos.

### 3.3 Paleovegetação

A redução do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) favorece o aumento de biomassa de plantas, especialmente gramíneas (campos) independente dos níveis de precipitação. Diante disto, há discordância sobre o significado dos diferentes espectros palinológicos (dados de pólen e esporos). Essa dissensão fundamenta-se principalmente em duas linhas de evidência: A primeira, derivada de estudos paleoecológicos que comprovam que uma alteração na capa vegetal de gramíneas de áreas tropicais durante o último ciclo glacial, é controlada pela concentração de CO<sub>2</sub> em associação com resfriamento glacial independentemente da precipitação; A segunda baseia-se no peso interpretativo dado por algumas evidências palinológicas, ou seja, é provável que a sugestão de paleoclimas mais secos do passado derivados inteiramente da contribuição relativa de pólen arbóreo versus pólen herbáceo nos sedimentos, não funcione tão bem nas regiões tropicais como nas temperadas devido à existência de muitos tipos de vegetação tropical herbácea localizada em regiões onde há uma vegetação seca muito delimitada, e devido à presença de muitas gramíneas aquáticas. Argumenta-se ainda que muitas savanas tenham sua ocorrência limitada por fatores edáficos (do solo) e não climáticos (MELO, 2007).

No optimum climático (entre 6.000 e 5.000 anos atrás) a costa atlântica do Brasil foi úmida o suficiente para manter florestas tropicais desde a zona da mata nordeste até o

sudeste de Santa Catarina, assim como as matas da Serra Gaúcha que se estendem de Taquara até além de Santa Maria, razão pela qual as florestas da serra constituem um reduto especial da tropicalidade biodiversa, que ali restou a partir do optimum climático mantido pelo somatório dos ricos solos oriundos da decomposição de basaltos (rocha ígnea vulcânica) a que se somou a umidade frontal das vertentes serranas, através dos ventos úmidos que vêm do sul (Ab'Sáber, 2007).

As regiões central, sul e amazônica brasileira se destacam pelo número de trabalhos paleoecológicos realizados, no entanto, inúmeras áreas ainda não tiveram a sua história ecológica levantada ou são pouco conhecidas, como a região da Floresta Atlântica e da caatinga nordestina (MELO, 2007).

Behling et al. (2004), a partir de estudos de fragmentos de carvão no sul do Brasil, sugerem que o fogo natural foi raro durante o período glacial, mas tornou-se mais frequente depois de 7.400 anos atrás, sugerindo ocupação humana desde aquele período. No sul do Brasil a vegetação de campos existiu no início do Holoceno e Holoceno Médio até 4.320 anos atrás.

Estudos da vegetação do quaternário sugerem que no Paraná (Serra dos Campos Gerais), Santa Catarina (Serra do Rio Rastro, Morro da Igreja, Serra da Boa Vista) e Rio Grande do Sul (Aparados da Serra e São Francisco de Paula) existiram extensas áreas de campos nas regiões serranas durante todo o último glacial, início do Holoceno e Holoceno Médio

(Behling et al., 2004). O domínio da área de campos é atribuído a clima mais seco; frio e seco durante o último glacial e quente e seco no Holoceno. Verificou-se também que uma estação seca anual, que dura aproximadamente três meses, foi provavelmente característica do início do Holoceno e Holoceno Médio.

Estudos sobre a região sul do Brasil em Cambará do Sul (RS), que é uma área situada dentro da formação de floresta araucária nos dias de hoje, verificaram que vegetação de campos prevaleceu sobre o sul (região serrana) durante o início do Holoceno e Holoceno Médio, mas que uma pequena população de araucária migrou ao longo dos vales dos rios na região de estudo. Também neste período, estudos palinológicos sobre o clima e vegetação no sul do Brasil foram exemplificados pelos resultados na Fazenda do Pinto (RS), Morro da Igreja, Serra da Boa Vista (SC) e serra dos Campos Gerais (PR), discutidos em Behling et al. (2001) e Behling (2002). Esses registros mostram que extensas áreas de campos continuaram a dominar a paisagem das regiões elevadas do Sul do Brasil.

A região de cerrado, segundo bioma em extensão territorial do Brasil, abrange os Estados da Bahia, Ceará, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Pará, Rondônia, Tocantins e Distrito Federal (Oliveira Filho e Ratter, 2002). Estudos arqueológicos mostram que nos últimos 12.000 anos as populações foram obrigadas a buscar alternativas de sobrevivência devido às mudanças climáticas. Diante disto, três fases de ocupação

foram reconhecidas: a primeira entre 11.000 e 8.000 anos atrás onde o ambiente foi definido como mais seco que hoje; a segunda (entre 8.000 e 5.500 anos atrás) mostra um aumento na umidade e uma etapa erosiva sem material arqueológico ao fim desta fase; na terceira evidenciaram-se camadas sobrepostas às superfícies erodidas, onde essas apresentam vestígios de plantas cultivadas, além de frutos variados de floresta e cerrado. A tradição tupi-guarani foi encontrada nas camadas mais superficiais do abrigo e desapareceu recentemente, com a colonização européia (MELO, 2007).

A evolução dos cerrados das regiões sudeste e central é diferente da região norte. O registro da Lagoa de Olhos d'Água-MG (19°38'S, 43°54'W) indica condições climáticas mais úmidas e mais frias que hoje, durante o Último Máximo Glacial. O início do Holoceno (entre 11.000 e 7.000 anos atrás) corresponde ao sinal de precessão com invernos mais quentes e verões mais frios, além de menos precipitação em latitudes tropicais. Após 7.000 anos atrás aumentam as frequências de indicadores de cerrado, acompanhados pela expansão de matas ciliares e veredas. Eleva-se também, nesse período, a quantidade de partículas de carvão, confirmando a instalação de um clima estacional (estações bem marcadas) no planalto central (Salgado-Labouriau et al., 1997).

O registro do Lago do Pires (Behling, 1995), localizado em uma região de floresta semidecídua, no sudeste brasileiro, indica a presença de cerrado desde o início do Holoceno até

aproximadamente 5.500 anos atrás, nessa época os paleofogos também eram abundantes.

Outro estudo palinológico importante é o de Jacareí (SP), no Vale do Rio Paraíba do Sul (Garcia et al., 2004) que indica que o campo de turfeiras, encontrado no Vale delimitado pela Serra da Mantiqueira e do Mar teve sua formação entre 9.720 e 8.853 anos atrás. Em Taubaté (SP) constituições como essas também foram encontradas do Pleistoceno Tardio até o presente. Esses estudos sugerem que de 9.720 a 8.240 anos atrás o clima local era mais úmido e frio que o atual, isso foi atribuído ao deslocamento mais ao norte das frentes frias levando massas de ar polar até o sudeste brasileiro. Enquanto que de 8.240 a 3.500 anos atrás o clima se tornou mais quente e úmido e de 3.500 a 1.950 mais frio e mais úmido que os dias atuais. Em aproximadamente 8.100 anos atrás pólen de araucária foi verificado na região de Jacareí, ou seja, os dados palinológicos sugerem que árvores tipo araucária e outros tipos de floresta de montanha foram crescendo pelo Vale do Paraíba, indicando um clima ligeiramente mais frio que os dias de hoje. Entre 8.240 a 5.400 anos atrás a estabilização do clima seco na região é atestada pelo aumento substancial de gramas (*Poaceae*), esta fase seca tem sido interpretada como uma consequência da forte influência das massas de ar continental tropical, que pode ser explicada pela intensificação do Anticiclone Subtropical (Garcia et al., 2004). Essas condições mais secas persistiram até 3.500 anos atrás e são consistentes com dados palinológicos estudados por

Behling (1997) do Lago do Pires (MG) e lado oeste da Serra de Itapeva (SP).

Estudos sobre a paleovegetação no Estado do Rio de Janeiro, na região da Lagoa de Cima (Luz et al., 1999) verificaram que em torno de 6.000 anos atrás a mata úmida pioneira deu lugar a uma vegetação de campo aberto e seco. Condições climáticas mais secas que os dias atuais foram observadas no HM. Já os sedimentos da Baía de Sepetiba, ao sul da cidade do Rio de Janeiro, sugerem fase úmida e desenvolvimento de floresta devido à dominância do tipo de pólen arbóreo principalmente relacionado à floresta densa, entre 6.300 e 4.650 anos atrás (Coelho et al., 2002).

A paleovegetação no Maranhão mostra uma evolução diferente, a vegetação mais úmida começou há 15.000 anos atrás e manteve-se até cerca de 11.000 anos atrás. A mata úmida desapareceu no início do Holoceno, sendo substituída por vegetação aberta, com dominância de gramíneas e embaúba. A vegetação de cerrado expandiu-se após 7.000 anos atrás (LEDRU et al., 2002). Sedimentos da fronteira da Bolívia com o Brasil, região hoje coberta pela Mata Amazônica, entre 11.000 e 7.000 anos atrás atestam a ocorrência de ecossistema tipo cerrado. Após 7.000 anos atrás expandiu-se a Mata Amazônica (MAYLE et al., 2000). Também na região de Barreirinhas, no Estado do Maranhão, entre 9.000 e 3.800 anos atrás houve maior influência de gramíneas com expansão do cerrado. Eventualmente associado a um clima mais seco (PESSENDA et al, 2001; 2002).

Estudos palinológicos da Lagoa Bonita (DF) verificou que há cerca de 7.900 anos atrás a lagoa adquiriu condições pantanosas, pela instalação de estações secas mais prolongadas. O retorno a condições mais úmidas, acompanhado pela tendência de aumento de temperatura durante o Holoceno levou a formação de veredas há cerca de 6.300 anos atrás, com instalação de condições paleoclimáticas semelhantes às atuais. Devido oscilações na umidade, com queda em 5.300 anos atrás e aumento em 2.100 anos atrás, ocorreu retração e expansão dessas veredas.

Na Serra dos Carajás o aumento de umidade pode ser inferido com o desenvolvimento da floresta de 10.500 até 7.760 anos atrás, seguido de uma grande quantidade de partículas de carvão, indicando condições de clima mais seco com estação seca mais prolongada, por volta de 6.150 anos atrás (TURCQ et al., 1998).

De 11.000 a 5.000 anos atrás interpretações paleoclimáticas, derivadas de estudos palinológicos da região do Vale do Rio Icatu, são suportados por dados paleoecológicos da região sudeste e central do Brasil (De Oliveira et al., 1999).

Um estudo palinológico, na região de Saquino no Vale do Rio Icatu, no meio do São Francisco (10°24'S, 43°13'W) no nordeste do Brasil, sugere cinco principais mudanças na vegetação e clima durante os últimos 11.000 anos (DE OLIVEIRA et al., 1999):

## Meteorologia em tópicos – volume 5

- De 10.990-10.540 anos atrás – amostras de pólen de floresta Amazônica e Atlântica sugerem condições climáticas muito úmidas com temperaturas reduzidas;
- De 10.540 -6.790 anos atrás – sugere progressivo aquecimento e altos níveis de umidade;
- De 8.910 – 6.790 anos atrás – progressivo declínio de floresta e gradual aumento de caatinga e cerrado;
- De -6.790 – 6.230 anos atrás – condições semi-áridas;
- De 6.230 – 4.535 anos atrás - marca o retorno da vegetação mosaico, composta de floresta de galeria, cerrado e caatinga, indicando condições mais úmidas. Acentuado declínio de umidade foi verificado em 4.240 anos atrás e no presente, sugerido pelo aumento da caatinga e cerrado e diminuição da floresta de galeria.

No início do Holoceno (10.060 a 6.790 anos atrás) o Vale do Rio Icatu foi especialmente dominado por floresta de galeria, o qual correlaciona em parte com a ocorrência de floresta de galeria no lago do Pires (17<sup>o</sup>S) no nordeste do Estado de Minas Gerais entre 8.810 e 7.500 anos atrás (Behling, 1995). De 8.910 a 6.790 o espectro de pólen foi caracterizado por floresta tropical, embora, haja tendências para condições mais semi-áridas, as quais parecem atingir o clímax entre 6.790 e 6.230 anos atrás. Esta fase árida parece síncrona com o período seco na região central do Brasil (DE OLIVEIRA et al., 1999).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

De 6.230 a 4.240 anos atrás a vegetação e o clima foram caracterizados por várias oscilações, uma dessas é assinalada pelo retorno de clima mais úmido, em 4.886 anos atrás. Este padrão modificou-se rapidamente depois de 4.240 atrás quando a caatinga e o cerrado tornaram-se mais abundantes.

O Holoceno na região Amazônica é climaticamente estável na Lagoa da Pata e Serra do Maicuru, extremos oeste e leste respectivamente do domínio florestal Amazônico do Brasil. O leque aluvial do Rio Amazonas também mostra clima e vegetação moderna sem mudanças climáticas significativas no Holoceno. Por outro lado, em Carajás, uma abertura da floresta no Holoceno Médio, é sugerida como consequência de clima mais seco, que favoreceu maior frequência de paleofogos. Sifeddine et al., (1994) e Cordeiro (1995) estudaram a ocorrência de incêndio em Carajás e concluíram a existência de clima mais seco entre 7.000 e 4.000 anos atrás.

Dados palinológicos fornecem dois padrões distintos para a vegetação Holocênica na Amazônia:

- refere-se à existência de florestas tropicais semelhantes as atuais, sem indícios de aberturas do dossel causadas por mudanças climáticas ou antropogênicas. Padrão observado em Lagoa da Pata e no leque aluvial do Rio Amazonas, confirmado pelo registro obtido por Behling et al., (2002) no Lago do Calado na Amazônia Central;
- o segundo padrão refere-se à vegetação impactada pela ocorrência de paleofogos e a conseqüente instalação do

processo de sucessão vegetal. Na Lagoa da Pata, por volta de 5.500 anos atrás, uma grande concentração de partículas carbonizadas foram encontradas nos sedimentos. A partir dessa data a Palmeira Buriti (*Mauritia Flexuosa*) instala-se na paisagem, em solos alagados. Sugere-se que o aumento do pólen de *Mauritia* represente evidencia da atuação de antigos povoados indígenas, uma vez que essa espécie é uma excelente fonte de alimentos e de materiais para construção de habitações (LORENZI et al., 1996). Contudo, a coincidência do significativo aumento das partículas carbonizadas encontradas na Lagoa do Pata, com o período de paleofogos entre 7.000 e 4.000 anos atrás, descritos para Carajás por Cordeiro (1995) e Sifeddine et al., (1994) e para Lagoa do Pires, no sudeste do Brasil (Behling, 1995), sugere condições mais secas que as atuais em grande parte do Brasil no Holoceno Médio.

No sul da Amazônia, na região de Humaitá, a observação de 19 pontos de amostragem em ecótonos (área de transição ambiental, resultante do contato entre dois ou mais biomas) floresta-savana sugeriu que de 17.000 a 9.000 anos atrás a região foi coberta por vegetação de floresta e entre 9.000 e 3.000 anos atrás houve uma troca da vegetação de floresta por savana (gramíneas), indicativo da presença de um provável clima mais seco (PESSENDA et al., 1998b).

Turcq et al., (1998) a partir de estudos palinológicos em sedimentos de lagos na serra Sul de Carajás, também sugerem ocorrência de clima seco durante o período de 7.000 e 4.000 anos atrás. Além disso, os resultados indicam que as

condições climáticas médias eram favoráveis ao desenvolvimento de floresta úmida, que eram apenas limitadas por repetidas ocorrências de queimadas e eventos secos.

No Mato Grosso do Sul, na região de Nhecolândia, resultados de isotópicos de MOS indicam ocorrência de mudança de vegetação de plantas C3 (árvores) para C4 (gramíneas) entre o período de 11.400 e 4.600 anos atrás (Victoria et al., 1995).

Um resumo das condições climáticas do HM e da paleovegetação derivadas de estudos palinológicos e paleoclimáticos em diversas localidades da América do Sul, com as respectivas referências, é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Informações sobre paleoclima e paleovegetação durante o HM

**Fonte:** Adaptado de Melo (2007)

| Localização                  | Região | Paleoclima    | Paleovegetação | Referência   |
|------------------------------|--------|---------------|----------------|--|
| Serra dos Campos Gerais (PR) | Sul    | Seco e quente | Campos         | Behling, 2002; Behling et al., 2001 e Behling et al., 2004 |

Meteorologia em tópicos – volume 5

|   |     |               |   |                                      |
|---|-----|---------------|---|--------------------------------------|
| Serra do Rio Rastro, Morro da Igreja, Serra da Boa Vista (SC) | Sul | Seco e quente | Campos  | Behling et al., 2004                 |
| Aparados da Serra e São Francisco de Paula (RS)               | Sul | Seco e quente | Campos  | Behling et al., 2004                 |
| Cambará do Sul (RS)   | Sul | -             | Campos e uma pequena população de araucária migrando ao longo dos vales dos rios. | MELO, 2007                           |
| Fazenda do Pinto (RS), Morro da Igreja, Serra da              | Sul | -             | Campos  | Behling, 2002 e Behling et al., 2001 |

Meteorologia em tópicos – volume 5

|                             |         |  |   |                                   |
|-----------------------------|---------|--|---|-----------------------------------|
| Boa Vista (SC)              |         |  |   |                                   |
| Lagoa dos Olhos D'Água (MG) | Sudeste | Mais seco (redução da precipitação)  | Cerrado acompanhado de matas ciliares e veredas                               | Salgado - Labouri au et al., 1997 |
| Lago do Pires               | Sudeste | Seco e presença de Paleofogos  | Cerrado   | Behling, 1997                     |
| Jacareí e Taubaté (SP)      | Sudeste | Úmido e quente<br><br>Entre 8240 e 5400 anos atrás estabilização do cliam seco | Campo de Turfeiras seguido do aumento de grammas entre 8240 e 5400 anos atrás | Garcial et al., 2004              |
| Morro do Itapeva (SP)       | Sudeste | Seco   | -   | Behling, 1997                     |

Meteorologia em tópicos – volume 5

|  |          |                                |   |                               |
|--|----------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Salitre (Centro-oeste de Minas Gerais)   | Sudeste  | Mais quente e seca             | Árvores e gramíneas                                     | Pessenda et al., (1996; 2004) |
| Serra Negra (SP)                         | Sudeste  | Mais quente e seca             |   | Souza, et al., 2005           |
| Lagoa de Cima (RJ)                       | Sudeste  | Seco                           | Campo aberto e seco                                     | Luz et al., 1999              |
| Baía de Sepetiba (Guaratiba - Sul do RJ) | Sudeste  | Úmido                          | Desenvolvimento de floresta                             | Coelho et al., 2002           |
| Maranhão (MA)                            | Nordeste | -                              | Cerrado   | Ledru et al., 2002            |
| Barreirinhas (MA)                        | Nordeste | Mais seco                      | Planta C <sub>4</sub> (Árvores) com expansão de cerrado | Pessenda et al., 2001 e 2002  |
| Vale do Rio Icatu                        | Nordeste | Oscilações entre períodos mais | Declínio de floresta e gradual aumento de               | De Oliveira                   |

Meteorologia em tópicos – volume 5

|                                   |              |  |   |                       |
|-----------------------------------|--------------|--|---|-----------------------|
|                                   |              | úmidos e condições semi-áridas         | caatinga, cerrado e floresta de galeria | et al., 1999          |
| Fronteira da Bolívia com o Brasil |              | -                                      | Mata Amazônica                          | Mayle et al., 2000    |
| Nhecolândia (MS)                  | Centro Oeste | Mais seco                              | Gramíneas                               | Victoria et al., 1995 |
| Lagoa Bonita (DF)                 | Centro-Oeste | Mais úmida com elevação de temperatura | Veredas                                 | Souza, et al., 2005   |
| Serra dos Carajás                 | Norte        | Mais Seco com estação seca prolongada  | Paleofogos                              | Turcq et al., 1998    |

Meteorologia em tópicos – volume 5

|   |       |                           |                              |  |
|---|-------|---------------------------|------------------------------|--|
| Lagoa da Pata, extremo oeste da região Amazônica    | Norte | Semelhante ao clima atual | Semelhante a vegetação atual | Souza, et al., 2005                              |
| Serra do Maicuru, extremo leste da região Amazônica | Norte | Semelhante ao clima atual | Semelhante a vegetação atual | Souza, et al., 2005                              |
| Lago do Calado (região central da Amazônia)         | Norte | -                         | Semelhante a vegetação atual | Behling et al., 2002                             |
| Rondônia  | Norte | Mais seco                 | Cerrado e Cerradão           | Pessenda et al., 1998b e Sifeddine et al., 2001. |

|                                     |       |           |        |                          |
|-------------------------------------|-------|-----------|--------|--------------------------|
| Humaitá<br>(Sul da<br>Amazônia<br>) | Norte | Mais seco | Savana | Pessenda et al,<br>1998b |
|-------------------------------------|-------|-----------|--------|--------------------------|

Fonte: Adaptada de Anhuf ( 2006)

### 3.4 Referências bibliográficas

AB’SÁBER, A. N. O *optimum* climático. **Scientific American Brasil**. v., n. 60, p. 98-108, 2007

ANHUF, D. Paleo-environmental change in Amazonian and African rainforest during the LGM **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**, v. 239, p. 510– 527. 2006

BAKER, P. A. The History of South American tropical precipitation for the past 25,000 Years. **Science**. v. 291, p. 640-643, 2001

BEHLING, H. A high resolution Holocene pollen record from Lago do Pires, SE Brasil: vegetation, climate and fire history. **Journal of Paleolimnology**, v. 14, p. 253-268, 1995.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history from the tropical mountain region of Morro de Itapeva, SE Brazil. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology** v. 129, p. 407– 422. 1997

BEHLING, H.; NEGRET, A. J.; HOOGHMSTRA, H. Holocene Amazon rainforest-savanna dynamics and climatic implications: high-resolution pollen record from Laguna Loma Linda in eastern Colombia. **Journal of Quaternary Science**, v. 15, n. 7, p. 687-695, 2000.

BEHLING, H.; BAUERMANN, S.G.; NEVES, P.C. Holocene environmental changes from the São Francisco de Paula region, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 631-639. 2001.

BEHLING, H. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 177, p. 19-27, 2002.

BEHLING, H.; ARZ, H. W.; PATZOLD, J.; WEFER, G. Late Quaternary vegetation and climate dynamics in southeastern Brazil, inferences from marine core GeoB 3229-2 and GeoB 3202-1. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 179, p. 227-243, 2002.

BEHLING, H.; PILLAR, V. D.; ORLÓCI, L.; BAUERMANN, S. G. Late Quaternary Araucaria forest, grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high-resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambara do Sul core in southern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 203, p. 277-297, 2004.

COELHO, L. G.; BARTH, O. M.; CHAVES, H. A. F. Palynological records of environmental changes in Guaratiba mangrove area, southeast Brazil, in the last 6000 years **ATRÁS Pesquisas em Geociências** (UFRGS), v. 29, p. 71-79, 2002.

CORDEIRO, R. C. **Mudanças paleoambientais e ocorrência de incêndios nos últimos 74000 anos, na região de Carajás, Pará**. Rio de Janeiro. 144p. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal Fluminense. 1995.

CURTIS, J.; HODELL, D.A. An isotopic and trace element study of ostracods from lake Miragoane, Haiti: A 10,500 year record of paleosalinity and paleotemperature changes in the Caribbean. In: P. K. Swart; Lohmann K. C.; McKenzie J.; Savin S. (eds). **Climate change in continental isotopic records**. Washington, D. C.: American Geophysical union, v.78, p.135–152. 1993.

DE OLIVEIRA, P. E; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Late Pleistocene=Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian caatinga: the fossil dunes of the middle São Francisco River. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.152, p. 319-337, 1999.

FONTUGNE, M.; USSELMANN, P.; LAVALLÉE, D.; JULIEN, M.; HATTÈ, C. El Niño Variability in the Coastal Desert of Southern Peru during the Mid-Holocene. **Quaternary Research**. v. 52, n. 2, p. 171-179. 1999.

FREITAS, H.A.; PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; GOUVEIA, S.E.M.; RIBEIRO, A.S.; BOULET, R. Late Quaternary climate change in southern Amazon inferred from 17,000 years vegetation dynamic record from soil organic matter, using  $\delta^{13}C$  and  $^{14}C$  dating. **Quaternary Research** v. 55, p. 39–46. 2001.

GAGAN, M.K.; AYLIFFE, L.K.; HOPLEY, D.; CALI, J.A.; MORTIMER, G. E.; CHAPPELL, J.; MCCULLOCH, M. T.; HEAD, M. J. Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical western Pacific. **Science**, v. 279, p. 1014-1017, 1998.

GARCIA, M. J.; DE OLIVEIRA, P. E.; SARAIVA, R.; SIQUEIRA, E. A Holocene vegetational and climatic record from the Atlantic rainforest belt of coastal State of São Paulo, SE Brazil. **Review of Palynology and Palaeobotany**, v. 131, p. 181-199. 2004.

GOUVEIA, S.E.M.; PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; ROVERATTI, R.; GOMES, B.M. Dinâmica de vegetações durante o Quaternário recente no sul do Amazonas, indicada pelos isótopos do carbono ( $^{12}C$ ,  $^{13}C$ ,  $^{14}C$ ). **Geochemical Brasiliensis**, v. 11, p. 355–367. 1997.

HAUG, G. H.; HUGHEN, K. A.; SIGMAN, D. M.; PETERSON, L. C.; RÖHL, U. Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene. **Science**, v. 293, p. 1304--1308, 2001.

JANSEN E.; WEAVER A. CLIVAR/PAGES Intersection Panel: Understanding natural climate variability through integrating the climate dynamics and paleoclimate communities. Joint edition of the IGBP: **Pages News**, 13(3) and Clivar Exchanges, 11(1), n.36: 2. 2006.

KEEFER, D. K; MOSELEY, M. E.; deFRANCE S.D. A 38000- year record of floods and debris flows in the Ilo region of the Southern Peru and its relation to El Nino events and great earthquakes. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**. v.194, n.1, p. 41-77. 2003

LEDRU, M.P. Late Quaternary environmental and climatic changes in central Brazil. **Quaternary Research** v. 39, p. 90–98. 1993.

LEDRU, M.P.; MOURGUIART, P.; CECCANTINI, G.; TURCQ, B.; SIFEDDINE, A. Tropical climates in the game of two hemispheres revealed by abrupt climatic change. **Geology** v. 30, p. 275-78. 2002

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; MEDEIROS-COSTA, J. T.; CERQUEIRA, L. S. C.; BEHL, N. V. **Palmeiras no Brasil - nativas e exóticas**. Nova Odessa: Plantarum. 303p. 1996.

LUZ, C.F.P.; BARTH, O.M.; MARTIN, L. Evolução das florestas tropicais estacional semidecídua e ombrófila densa durante o

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Holoceno Médio na região norte do Rio de Janeiro, baseada em palinologia. **Geociências**, v. 4, n. 6, p. 74 -84. 1999.

MARTIN, L.; FOURNIER, M.; MOURGUIART, P.; SIFEDDINE, A.; TURCQ, B.; ABSY, M.L.; FLEXOR, J.-M. Southern oscillation signal in South American paleoclimatic data of the last 7000 years. **Quaternary Research**. v. 39, p. 338–346. 1993.

MARTIN, L.; SUGUIO, K. Variation of coastal dynamics during the last 7,000 years recorded in beach-ridge plains associated with river mouths: example from the central Brazilian coast. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 99, p. 119–160. 1992.

MASSON V, VIMEUX, F.; JOUZEL, J.; MORGAN, V.; DELMOTTE, M.; CIAIS, P.; HAMMER, C.; JOHNSEN, S.; LIPENKOV, V.; MOSLEY-THOMPSON, E.; ROBERT PETIT, J.; STEIG, E.; STIEVENARD, M.; VAIKMAE, R. Holocene climate variability in Antarctica based on 11 ice-core isotopic records. **Quaternary Research**, v. 54, n. 3, p. 348-358. 2000.

MAYLE, F. E.; BURBRIDGE, R.; KILLEEN, T. J. Millennial-Scale Dynamics of Southern Amazonian Rain Forests. **Science**, v. 290, p. 2291-2294, 2000.

MELO M. L. D. **Simulações de Clima para o Holoceno Médio usando o MCGA do CPTEC, com ênfase sobre a América do**

**Sul.** Tese (Doutorado em Meteorologia) Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE. 2007

MORENO P. I. Millennial-scale climate variability in northwest Patagonia over the last 15000 yr. **Journal of Quaternary Science**. v. 19, n. 1, 35-47. 2004.

MORLEY, J. J.; DWORETZKY, B. A. **Holocene temperature patterns and the South Atlantic, Southern and Pacific oceans**. Global Climates since the Last Glacial Maximum, H. E. Wright et al., Eds., University of Minnesota Press, p.125-135. 1993.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; RATER, J. A. **Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome**. In: Oliveira, P.S. and Marquis, R. J. (Eds). The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna. New York: Columbia University Press. p. 91-120. 2002.

PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; MELFI, A. J.; TELLES, E.C.C.; BOULET, R., VALENCIA, E.P.E; TOMAZELLO, M. The use of carbon isotopes (C-13, C-14) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in Central Brazil. **Radiocarbon**. v 38, n. 2, p. 191-201. 1996.

PESSENDA, L.C.R.; GOMES, B.M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A.S.; BOULET, R.; GOUVEIA, S.E.M. The carbon isotope record in soils along a forest–cerrado ecosystem transect: implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwestern

Brazilian Amazon region. **The Holocene** v. 8, n. 5, p. 631–635. 1998a.

PESSENDA, L.C.R.; GOUVEIA, S.E.M.; ARAVENA, R.; GOMES, B.M.; BOULET, R.; RIBEIRO, A.S. Radiocarbon dating and stable carbon isotopes of soil organic matter in forest-savanna boundary areas in the southern Brazilian Amazon forest. **Radiocarbon**. v 40, p. 1013–1022. 1998b.

PESSENDA, L.C.R; RIBEIRO, A.S., GOUVEIA, S.E.M; BENDASSOLI, J.A.; BOULET, R.; PELLEGRINOTTI, T.C.; SILVA, V.F. Dinâmica do ecótono cerrado-floresta desde o Pleistoceno tardio na região de Barreirinhas, estado do Maranhão, empregando os isótopos do carbono do solo. In: Congresso da ABEQUA, 8, Imbé. **Boletim de Resumos**. Imbé: UFRS, CECO, ABEQUA. p. 344-345.. 2001.

PESSENDA, L.C.R; RIBEIRO, A.S., GOUVEIA, S.E.M; BENDASSOLI, J.A.; BOULET, R.; PELLEGRINOTTI, T.C.; SILVA, V.F. Dynamics of forest-savanna ecotone from Late Pleistocene in the Barreirinhas region, state of Maranhão, northeastern Brazil, using the carbon isotopes of soil organic matter. In: International Conference on Isotopes, 4, Cape Town. **Anais eletrônicos** Cape Town: NECSA. p. 48. 2002

PESSENDA, L.C.R.; GOUVEIA, S.E.M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E.P.E. Holocene fire and vegetation changes in southeastern Brazil as deduced from fossil charcoal and soil

carbon isotopes. **Quaternary International** v. 114, p. 35-43. 2004.

PESSENDA, L.C.R.; LEDRU, M.P.; GOUVEIA, S.E.M., ARAVENA, R.; RIBEIRO, A. S.; BENDASSOLLI, J.A.; BOULET, R. Holocene palaeoenvironmental reconstruction in northeastern Brazil inferred from pollen, charcoal and carbon isotope records. **The Holocene** v. 15, n. 6, p. 812-820. 2005.

RUDDIMAN, W. F.; MIX, A. C. **The North and equatorial Atlantic at 9000 and 6000 years ago** Global Climates since the Last Glacial Maximum, H. E. Wright et al., Eds., University of Minnesota Press, p. 94-124. 1993.

SALGADO-LABOURIAU, M. L.; CASSETI, V.; FERRAZ-VICENTINI, K. R.; MARTIN, L.; SOUBIÈS, F.; SUGUIO, K.; TURCQ, B. Late Quaternary vegetational changes in cerrado and palm swamp from Central Brazil. **Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology** v. 128, p. 215–226. 1997.

SANDWEISS, D. H.; RICHARDSON, J. B.; REITZ, E. J.; ROLLINS, H. B.; MAASCH, K. A. Geoaercheological Evidence from Peru a 5000 Years Onset of El Niño. **Science**, v. 273, p. 1531--1533, 1996.

SEPPÄ, H., HAMMARLUND, D., ANTONSSON, K. Low-frequency changes in temperature and effective humidity during the Holocene in south-central Sweden: implications

for atmospheric and oceanic forcings of climate. **Climate Dynamics**. v. 25, p. 285-297. 2005.

SIFEDDINE, A. ; BERTRAND, P. ; FOURNIER, M. ; MARTIN, L. ; SERVANT, M. ; SOUBIES, F. ; SUGUIO, K. ; TURCQ, B. La sédimentation organique lacustre en milieu tropical humide (Carajás, Amazonie Orientale, Brésil): relation avec les changements climatiques au cours des 60000 dernières années. **Bulletin de la Société Géologique de France**, v. 165. p. 613-621. 1994.

SIFEDDINE, A.; MARTIN, L.; TURCQ, B.; VOLKMER-RIBEIRO, C.; SOUBIIS, F.; CORDEIRO, R.C.; SUGUIO, K. Variations of the Amazon rainforest environment: a sedimentological record covering 30,000 years. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** v. 168, p. 221-235. 2001

SIFEDDINE, A. ; ALBUQUERQUE, A.L.S. ; LEDRU, M.P. ; TURCQ, B. ; KNOPPERS, B. ; MARTIN, L. ; DE MELLO, W.Z. ; PASSENAU, H. ; DOMINGUEZ, J.M.L. ; CORDEIRO, R.C. ; ABRAO, J.J. ; BITTENCOURT, A.C.D.P. A 21000 cal years paleoclimatic record from Caco Lake, northern Brazil: evidence from sedimentary and pollen analyses. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** v. 189, p. 25-34. 2003.

STEIG, E.J. How well can we parameterize past accumulation rates in polar ice sheets? **Annals of Glaciology**, v. 25, p. 66-422. 1997.

STEIG, E.J. Mid-Holocene climate change. **Science** v. 286, p. 1485-87. 1999

THOMPSON, E., MOSLEY-THOMPSON, E.; DAVIS, M.E.; LIN, P.N.; HENDERSON, K.A.; COLE-DAI, J.; BOLZAN, J.F.; LIU, K.B.; MASSON, V.; VIMEUX, F.; JOUZEL, J.; MORGAN, V.; DELMOTTE, M.; CIAIS, P.; HAMMER, C.; JOHNSEN, S.; LIPENKOV, V.; MOSLEY-THOMPSON, E.; ROBERT PETIT, J.; STEIG, E.; STIEVENARD, M.; VAIKMAE, R. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. **Science** v. 269, p. 46-50. 1995.

TUDHOPE, A. W.; CHILCOTT, C. P.; McCULLOCH, M. T.; COOK, E. R.; CHAPPELL, J.; ELLAM, R. M.; LEA, D. W.; LOUGH, J. M.; SHIMMIELD, G. B. Variability in the El Niño-Southern Oscillation Through a Glacial-Interglacial Cycle. **Science**. v. 291, 1511-1517. 2001.

TURCQ, B.; SIFEDDINE, A.; MARTIN, L.; ABSY, M. L.; SOUBIES, F.; SUGUIO, K.; VOLKMER-RIBEIRO, C. Amazonia rainforest fires: A lacustre record of 7000 years. **Ambio**, v. 27, n. 2, 139-142, 1998.

TURCQ, B.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; CORDEIRO, R. C., SIFEDDINE, A.; SIMÕES FILHO, F.F.L.; SOUZA, A.G.; ABRÃO, J. J.; OLIVEIRA, F.B.L.; SILVA, A.O; CAPITÂNEO, J.A. Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. **Sedimentary Geology**, v. 148, p. 319-342, 2002.

Meteorologia em tópicos – volume 5

VICTORIA, R. L.; FERNANDES, F.; MARTINELLI, L.A. PICCOLO, M.C.; CAMARGO, P.B.; TRUMBORE, S. Past vegetation change in the Brazilian Pantanal arboreal-grassy savana ecotone by using carbon isotopes in the soil organic matter. **Global Change Biology**, v. 1, p. 165-171. 1995.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

## CAPÍTULO 4

# REAÇÕES FOTOQUÍMICAS NA TROPOSFERA E ESTRATOSFERA

*Ericka Voss Chagas Mariano*

*Glauber Lopes Mariano*

*Marcos Antônio Lima Moura*

### 4.1 Introdução

O estudo da química da atmosfera mostra-se relativamente complicado, especialmente quando consideram-se os inúmeros compostos envolvidos nas mais diversas reações químicas. A interação de certos compostos com a radiação emitida pelo Sol – chamadas reações fotoquímicas - é especialmente interessante, já que tais reações relacionam-se com fenômenos como a formação e depleção da camada de ozônio na estratosfera, o smog fotoquímico e a formação de ozônio troposférico, entre outras reações. Radiação solar de comprimentos de onda específicos podem separar ou ionizar moléculas atmosféricas, gerando íons reativos que participam de vários processos na atmosfera. O objetivo deste capítulo é mostrar alguns princípios básicos envolvidos nas reações fotoquímicas que ocorrem tanto na troposfera como na

estratosfera, ressaltando as reações passadas por compostos como NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, entre outros.

## 4.2 Radiação Solar

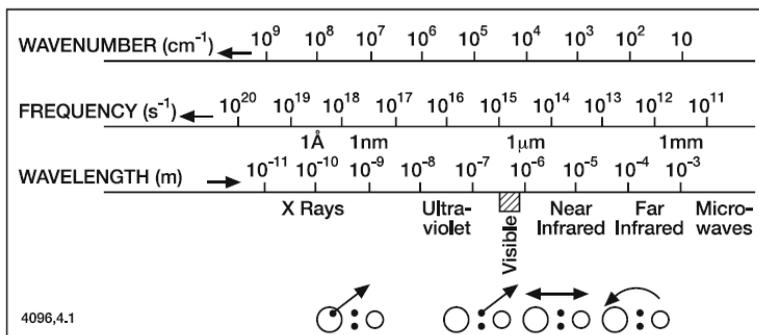
O Sol é uma estrela constituída por uma massa gasosa que contém cerca de 91,2% de hidrogênio (H) e 8,7% de Hélio (He). A temperatura média na superfície do Sol é de cerca de 6000K (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2004). A estrutura física do Sol apresenta-se bastante complexa; quando se consideram as características do Sol como fonte de luz, ele pode ser dividido em núcleo, fotosfera, cromosfera e coroa (McEWAN e PHILLIPS, 1975).

De acordo com Liou (2002), o processo mais importante no que se refere à transferência de energia na atmosfera é a radiação eletromagnética - viaja na forma de onda, e todas as ondas eletromagnéticas viajam na mesma velocidade (a velocidade da luz ~300.000km/s).

A superfície e conseqüentemente a atmosfera terrestre são aquecidas principalmente pela energia proveniente do Sol (BAIRD, 2002). Os tipos de radiação são classificados, de acordo com o comprimento de onda ( $\lambda$ ), em ultravioleta ( $\lambda < 0,4\mu\text{m}$ ), visível ( $0,39\mu\text{m} < \lambda < 0,77 \mu\text{m}$ ) e infravermelha ( $\lambda > 0,77 \mu\text{m}$ ). Apenas as radiações de  $\lambda$  no espectro visível são detectadas pelo olho humano (IQBAL, 1983).

As moléculas atmosféricas caracterizam-se por estados rotacionais e vibracionais discretos, e por suas configurações eletrônicas, conforme a Figura 1. A absorção de fótons pode

induzir as transições entre os estados base e excitados (BRASSEUR e SOLOMON, 2005), mas isto não significa que tem-se, necessariamente, a reação de fotodissociação, conforme veremos a seguir.



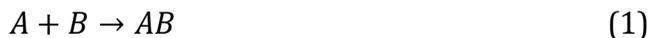
**Figura 1.** Regiões espectrais e seus efeitos nas moléculas. Da esquerda para a direita: ionização, dissociação, vibração e rotação.

**Fonte:** Brasseur e Solomon (2005).

### 4.3 Noções de química

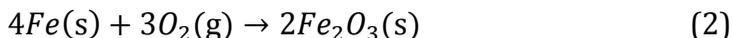
Há algumas reações químicas que ocorrem na natureza e que acabam por fazer com que alguns elementos químicos na atmosfera reajam entre si (VALLERO, 2008):

1. Síntese ou combinação – quando duas ou mais substâncias reagem para formar uma única substância.

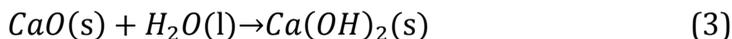


## Meteorologia em tópicos – volume 5

Entre as reações de combinação, destaca-se a formação e a hidratação. Nas reações de formação, os elementos combinam-se, formando um composto; como exemplo, a formação de óxido férrico:



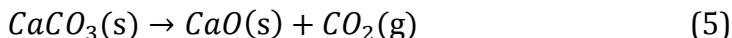
Já as reações de hidratação envolvem água para a síntese de um novo composto – por exemplo, a formação de hidróxido de cálcio:



2. Decomposição ou degradação – quando uma substância divide-se em duas ou mais novas substâncias.



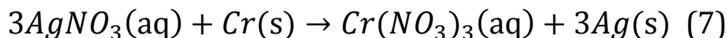
Como exemplo, tem-se a quebra do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e dióxido de carbono:



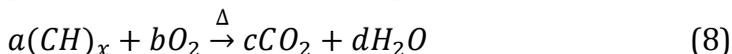
3. Reposição simples ou substituição simples – normalmente ocorre quando um íon metálico em um composto é substituído por outro íon metálico.



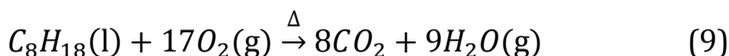
Como exemplo, tem-se o cromo trivalente substituindo a prata monovalente:



4. Reposição dupla ou substituição dupla – nestas reações, há a troca entre metais e sais. Estes sais recém-formados têm características químicas e físicas diferentes das dos reagentes.
5. Combustão completa ou eficiente (oxidação térmica) – ocorre quando um composto orgânico é oxidado na presença de calor (indicado por  $\Delta$ ).



A combustão é a combinação de oxigênio na presença de calor, com produção de  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão completa de compostos orgânicos. Como exemplo, a combustão do octano:



#### 4.4 Fotoquímica atmosférica

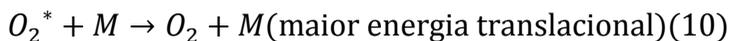
Quando uma reação é iniciada por energia em forma de luz, ela é chamada de reação fotoquímica. Quando uma molécula se transforma em átomos através da absorção de um fóton, diz-se que ela é dissociada fotoquimicamente ou que experimenta fotólise (BAIRD, 2002). A fragmentação de uma espécie química após a absorção de luz é um dos

processos fotoquímicos mais importantes na química da atmosfera (WAYNE, 1985).

Reações fotolíticas têm um papel crítico no controle da abundância de muitos poluentes atmosféricos (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000) e controlam grande parte da química da troposfera e estratosfera (PFISTER et al., 2000). A fotodissociação através da radiação solar ultravioleta tem um papel fundamental na química atmosférica: primeiro, é através desta reação que há a decomposição de gases-traço na atmosfera, assim contribuindo para sua remoção. Segundo, os processos de fotodissociação geram radicais e átomos altamente reativos. Radicais, também chamados radicais livres, são espécies químicas com um elétron desemparelhado em sua camada mais externa; estes elétrons desemparelhados fazem com que os radicais sejam mais reativos (WALLACE e HOBBS, 2006).

Conforme Manahan (2001), as reações que ocorrem após a absorção de um fóton de luz na produção de uma espécie eletronicamente excitada são determinadas especialmente pela forma na qual a espécie excitada perde seu excesso de energia. Isto pode ocorrer através dos seguintes processos:

- 1) Perda de energia para uma outra molécula ou átomo (M), com a energia sendo dissipada na forma de calor:



- 2) Dissociação da molécula excitada



- 3) Reação direta com outra espécie



- 4) Luminescência – perda de energia pela emissão de radiação eletromagnética



Se a re-emissão de luz ocorrer de modo quase instantâneo, a luminescência é chamada de fluorescência, e se houver atraso, fosforescência. Ocorre quimiluminescência se a espécie excitada é formada por um processo químico:



- 5) Transferência de energia intermolecular, na qual uma espécie excitada transfere energia para outra espécie que torna-se excitada



- 6) Transferência intramolecular, na qual a energia é transferida dentro de uma molécula



Onde ° denota outro estado excitado da mesma molécula

7) Fotoionização através da perda de um elétron



A radiação eletromagnética absorvida na região do infravermelho não tem energia suficiente para quebrar as ligações químicas, mas as moléculas que recebem esta energia conseguem ganhar energia vibracional e rotacional. A energia absorvida como radiação infravermelha é dissipada como calor e aumenta a temperatura atmosférica.

De acordo com Baird (2002), quando as moléculas absorvem luz – o que normalmente ocorre no comprimento de onda ultravioleta, visível ou, em alguns casos, na infravermelho – seus elétrons se reorganizam imediatamente. Quando isto ocorre, afirma-se que estas moléculas estão em um estado eletrônico excitado temporário, o que é indicado por um asterisco sobrescrito em sua fórmula (\*). Ocorre que estas moléculas não mantêm o estado de excitação por muito tempo, o que significa que o excesso de energia fornecida pelo fóton incidente não é mantido por muito tempo. Então, em um tempo extremamente curto, a molécula deve usar a energia para a reação fotoquímica ou voltar ao seu estado fundamental, ou seja, o de maior estabilidade, emitindo um fóton ou fazendo o excesso de energia virar calor. Diante disso, não é possível

que as moléculas acumulem energia para reagir após receber vários fótons – a reação só ocorre quando a energia necessária pra ocorrência vem de um único fóton.

A radiação solar inicia a formação de radicais livres. A energia interna das moléculas é composta por estados eletrônicos de energia; as moléculas interagem com a radiação solar quando absorvem fótons, o que faz com que a molécula passe por uma transição entre o estado inicial e o estado excitado. A mudança na energia entre estes dois estados corresponde a um *quantum* ou fóton de radiação solar. As frequências  $\nu$  de absorção são expressas pela Lei de Planck:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (18)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $c$  é a velocidade da luz, e  $\nu$  e  $\lambda$  são a frequência e o comprimento de onda da luz do fóton, respectivamente (VALLERO, 2008).

Os átomos produzidos pela fotodissociação são muito ativos e iniciam sequências de reações que promovem a produção de novas espécies (GOODY e WALKER, 1975). Três fatores determinam a taxa de fotodissociação:

- 1) Número de fótons disponíveis para causar a fotodissociação;
- 2) Número de moléculas expostas à radiação dissociadora;

- 3) Eficiência com a qual os fótons causam a dissociação, que é dependente do comprimento de onda dos fótons.

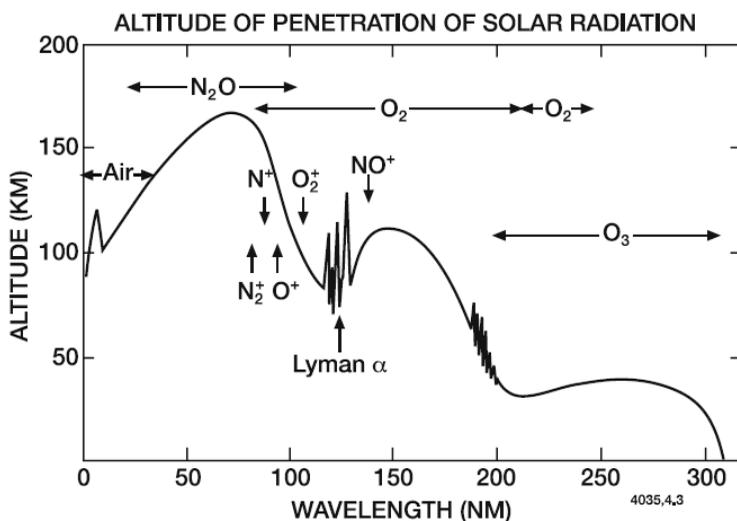
Como exemplo, fótons com longos comprimentos de onda não possuem energia suficiente para ter as ligações moleculares rompidas. Por outro lado, medições de absorção de radiação pelos gases realizadas em laboratório mostraram que a fotodissociação também não é provável em comprimentos de ondas curtas. A fotodissociação diminui em eficiência nos comprimentos de onda maiores e menores. O espectro de radiação solar na baixa troposfera começa em  $\sim 0,295\mu\text{m}$  e aumenta. De acordo com Vallero (2008), os fótons com comprimentos de onda menores (e portanto, maior energia) são absorvidos na atmosfera superior, ou seja, não alcançam a baixa troposfera.

Segundo Goody e Walker (1975), o fluxo de fótons decresce com a diminuição da altitude para a radiação que é absorvida pela atmosfera. Nas altitudes elevadas, há pouca atmosfera e pequena absorção; o fluxo em geral é constante. À medida que a densidade atmosférica aumenta e que a absorção se torna cada vez mais importante, o fluxo diminui de modo cada vez mais rápido. A taxa de absorção de fótons é proporcional ao produto da densidade de moléculas absorventes pelo fluxo que pode ser absorvido. A taxa é pequena nas altitudes elevadas porque há poucas moléculas absorventes; a taxa também é pequena nas altitudes baixas porque há poucos fótons para serem absorvidos. Portanto, a

taxa tem seu máximo nas altitudes intermediárias. Brasseur e Solomon (2005) afirmam que há uma dependência entre a penetração de radiação solar na atmosfera terrestre e a absorção atmosférica, como pode ser visto na Figura 2. Em comprimentos de onda abaixo de  $0,1 \mu\text{m}$ , a radiação é quase totalmente absorvida acima de 100 km por oxigênio atômico e molecular, e em menor grau por nitrogênio molecular. Em comprimentos de onda maiores do que  $0,1 \mu\text{m}$ , a radiação solar UV fotodissocia moléculas atmosféricas. Em comprimentos de onda mais longos, o espectro solar é subdividido em regiões de absorção pelas espécies  $\text{O}_2$  e  $\text{O}_3$ .  $\text{O}_2$  absorve radiação em comprimentos de onda menores do que aproximadamente  $0,24 \mu\text{m}$ . O  $\text{O}_3$ , bastante abundante na estratosfera, absorve entre  $0,2$  e  $0,3 \mu\text{m}$ . Mesmo com toda esta absorção, no visível ( $\lambda > 0,31 \mu\text{m}$ ), a maior parte dos fótons chegam à troposfera e à superfície.

De acordo com Seinfeld e Pandis (1997), para computar as razões de reações fotoquímicas atmosféricas é necessário determinar o total da intensidade de luz incidente num dado volume de ar, de todas as direções. A intensidade de luz que chega a um volume de ar inclui não somente a radiação solar direta, mas também a luz refletida pela superfície terrestre, que é espalhada para o volume de ar por gases e partículas, assim como a luz refletida diretamente pela superfície terrestre. A absorção e o espalhamento de luz pelos constituintes atmosféricos atenuam a radiação à medida que ela passa pela atmosfera. A quantidade de atenuação depende da natureza e concentração de gases e partículas e do

percurso que o raio solar atravessa (massa ótica). Este percurso é função do ângulo zenital, que depende da hora do dia, latitude e data. Além disso, a reflexão de radiação pela superfície terrestre contribui para a radiação em qualquer ponto na atmosfera.



**Figura 2.** Profundidade de penetração da radiação solar em função do comprimento de onda. Principais absorvedores e limites de ionização estão indicados.

**Fonte:** Basseur e Solomon (2005).

A natureza das razões de fotólise é complexa, já que ela é dependente de fatores como temperatura, altitude, ângulo zenital, fluxo actínico, albedo e comprimento de onda, que por sua vez são dependentes de outros fatores como hora do dia, época do ano, latitude e longitude (WIEGAND e

BOFINGER, 1999). Para que uma molécula seja envolvida em uma reação fotoquímica, existe uma dependência na probabilidade de que esta molécula absorva um fóton com energia suficiente para que haja a dissociação da mesma. Isto irá depender, em parte, do fluxo de radiação incidente em um volume de ar vindo de todas as direções, o que é chamado de fluxo actínico (HOBBS, 2000). Segundo Jacob (1999), uma reação de fotólise envolve a quebra de uma ligação química através de um fóton incidente, cuja reação é descrita da seguinte forma:



E a razão de reação é calculada como

$$-\frac{d}{dt}[X] = \frac{d}{dt}[Y] = \frac{d}{dt}[Z] = k[X] \quad (20)$$

Onde  $k$  (em unidades por  $s^{-1}$ ) é uma razão constante de fotólise ou frequência de fotólise.

#### 4.4.1 Fotoquímica da atmosfera

Segundo Iribarne e Cho (1980), a química da atmosfera lida com as seguintes questões:

- Composição do ar e distribuição de componentes;
- Fontes e sumidouros dos diferentes componentes na atmosfera e em sua vizinhança;
- Evolução na atmosfera (reações químicas);

- Ciclos e balanços dos elementos principais.

A radiação solar tem um papel muito importante em termos da química atmosférica através do processo de fotodissociação, que inicia a oxidação de vários gases-traço e controla a química dos radicais. Em particular, a radiação ultravioleta (UV) que chega à troposfera controla a fotodissociação de espécies como  $O_3$  e  $NO_2$ , sendo o primeiro a fonte principal de OH e o segundo o maior contribuinte para formação de  $O_3$  (SEROJI et al., 2004).

Na atmosfera, interessam os processos que são iniciados pela absorção de luz; sendo assim, as leis que governam a absorção de luz são de importância fundamental (MCEWAN e PHILIPS, 1975). Para computar as razões de reações fotoquímicas atmosféricas é necessário determinar a intensidade total de incidência em todas as direções de luz em um dado volume de ar (SEINFELD e PANDIS, 1997). Da radiação emitida pelo Sol, a mais importante para a fotoquímica da atmosfera superior está abaixo de  $0,29 \mu m$  (MCEWAN e PHILIPS, 1975). A radiação solar tanto pode fragmentar os constituintes atmosféricos e produzir átomos, radicais e íons, ou excitar os constituintes, sem mudança química, para alterar sua reatividade (WAYNE, 1985).

Fótons solares na atmosfera se originam de várias direções devido ao espalhamento pelas moléculas de ar, aerossóis e nuvens (JACOB, 1999). De acordo com Seinfeld e Pandis (1997), as energias dos fótons podem ser comparadas com energias de ligação das moléculas. A energia contida em

fótons de  $\lambda$  próximos ao vermelho do espectro visível é comparável com as energias de ligação de espécies químicas fracamente ligadas. Por exemplo, os fótons de energia mais baixos capazes de promover reação química estão na região visível do espectro eletromagnético. Os  $\lambda$  nos quais a mudança química (fotodissociação, fluorescência, ionização, etc.) pode ocorrer correspondem aproximadamente às energias nas quais as transições eletrônicas em moléculas acontecem. A absorção de radiação somente pode ocorrer se existir um nível de energia superior da molécula que seja separado do nível mais baixo por uma energia igual àquela do fóton incidente. Pequenas moléculas geralmente exibem absorção eletrônica intensa em  $\lambda$  menores do que as moléculas maiores. Por exemplo,  $N_2$  e  $H_2$  absorvem significativamente em  $\lambda < 0,10 \mu\text{m}$ , enquanto  $O_2$  absorve fortemente para  $\lambda < 0,20 \mu\text{m}$ ,  $H_2O$  para  $\lambda < 0,18 \mu\text{m}$  e  $CO_2$  para  $\lambda < 0,165 \mu\text{m}$ .

À medida que a radiação penetra mais profundamente na atmosfera, os  $\lambda$  mais curtos são progressivamente removidos. Então a fotoquímica na troposfera é confinada a moléculas que absorvem radiação de  $\lambda$  que exceda aproximadamente  $0,29 \mu\text{m}$ .

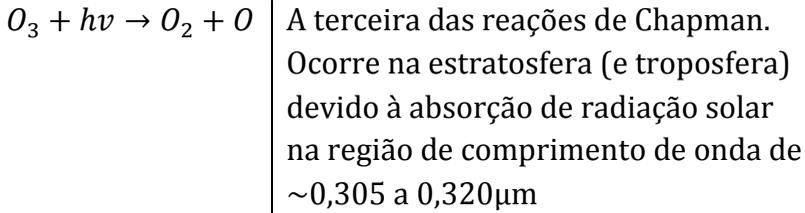
De acordo com McEwan e Philips (1975), a fotoquímica da atmosfera superior é governada pela fotólise das espécies  $O_2$ ,  $N_2$  e  $O_3$ . Já o  $H_2O$ ,  $NO$  e  $CO_2$  são importantes como constituintes minoritários na baixa atmosfera. Como a dissociação requer energia relativamente alta, a fotoquímica é iniciada por menos de 1% dos fótons solares, mais

especificamente aqueles cujo comprimento de onda está na banda do raio-X, ultravioleta ou visível (BRASSEUR E SOLOMON, 2005). A Tabela 1 cita reações fotoquímicas de importância para a química atmosférica.

**Tabela 1.** Exemplos de reações fotoquímicas importantes na química atmosférica

**Fonte:** Adaptado de Hobbs (2000).

| Reação   | Comentários   |
|--|---|
| $6H_2O + 6CO_2$<br>$+ hv$<br>$\rightarrow 6O_2 + C_6H_{12}O_6$ | Reação de fotossíntese  |
| $NO_2 + hv \rightarrow NO$<br>$+ O$                            | Ocorre em comprimentos de onda de 0,4 a 0,625 $\mu$ m. O átomo de oxigênio produzido nesta reação é a única fonte química <i>in situ</i> de $O_3$ na troposfera ( $O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M$ ) |
| $HONO + hv$<br>$\rightarrow OH + NO$                           | Uma fonte do radical hidroxila. Ocorre em comprimentos de onda relativamente longos (<0,4 $\mu$ m) que alcançam a superfície  |
| $O_2 + hv \rightarrow O + O$                                   | A primeira das reações de Chapman. Ocorre na estratosfera devido à absorção de radiação solar nas regiões de comprimento de onda de 0,2 a 0,22 $\mu$ m e 0,185 a 0,2 $\mu$ m                          |

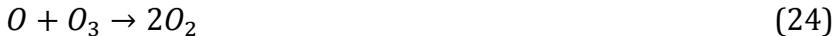
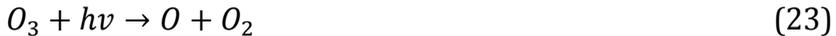
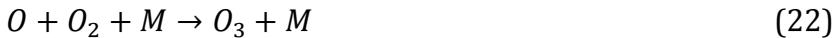


## 4.5 Principais compostos atmosféricos envolvidos em reações fotoquímicas

### 4.5.1 Atmosfera Superior

#### $O_2$ e $O_3$

A dissociação de  $O_2$  para produção de átomos tem sua importância na estratosfera devido ao fato desta ser a única fonte significativa de  $O_3$ . Os mecanismos para formação e destruição de ozônio foram propostos por Chapman (1930), através das reações:



Onde M é qualquer espécie não reativa que pode absorver a energia liberada pela segunda reação para estabilizar o  $O_3$ . Como o  $O_3$  não é uma molécula muito estável,

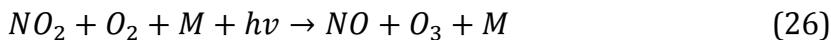
sem a presença do terceiro corpo para trazer estabilidade, O<sub>3</sub> formado pela colisão do O<sub>2</sub> com o O não se estabilizaria. Como N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> são os principais componentes na atmosfera, M normalmente é O<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>.

Estas reações de fotodissociação de O<sub>2</sub> ocorrem no comprimento de onda limite de ~0,242 μm. Por isso, não espera-se que a absorção de comprimentos de onda maiores resulte na formação de O<sub>3</sub> (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

#### 4.5.2 Baixa atmosfera

##### Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e Ozônio (O<sub>3</sub>)

Os óxidos de nitrogênio (NO + NO<sub>2</sub> = NO<sub>x</sub>) têm papel importante na química atmosférica. São emitidos como NO, mas são convertidos através das reações abaixo (WALLACE e HOBBS, 2006):



De acordo com Schaub et al. (2004), o NO<sub>2</sub> tem um papel fundamental na fotoquímica da poluição do ar. Sua quantidade e distribuição são de significância direta para a qualidade do ar e saúde humana, e indiretamente como precursor de ozônio. Apesar de não ser a espécie de óxido de nitrogênio principal, o NO<sub>2</sub> é um dos poluentes mais

importantes em áreas urbanas, já que é a espécie mais significativa com relação à saúde humana. O  $\text{NO}_2$  é formado relativamente rápido pelo  $\text{NO}$  através da reação com o  $\text{O}_3$  ou com alguns radicais (LÖVBLAD et al., 1997). O  $\text{NO}_2$  é formado de acordo com o equilíbrio fotoquímico numa escala temporal de minutos a partir do  $\text{NO}$  emitido primariamente, a maior parte sendo de origem antropogênica. A concentração de  $\text{NO}_2$  em qualquer hora ou local é determinada pela emissão de  $\text{NO}_x$ , suas reações de produção e perda, bem como transporte meteorológico e diluição. O  $\text{NO}_2$  é removido da troposfera pela reação com o radical  $\text{OH}$  em  $\text{HNO}_3$ , que se deposita, e pela reação noturna com  $\text{N}_2\text{O}_5$  em superfícies e aerossóis (SCHAUB et al., 2004).

A tabela 2 mostra alguns processos químicos pelos quais a molécula de  $\text{O}_3$  passa na atmosfera, envolvendo reações fotoquímicas.

A química atmosférica dos compostos de nitrogênio é complicada, porque eles participam de um grande número de reações químicas e podem ser convertidos em vários compostos químicos. As emissões de  $\text{NO}$  são oxidadas na atmosfera e formam  $\text{NO}_2$ , e na sequência, ácido nítrico/nitrato. O  $\text{NO}_2$  está presente no ar urbano em concentrações entre dezenas e centenas de  $\text{Tg/m}$  (teragrama por metro); as concentrações em áreas rurais são muito mais baixas e variam com a distância da fonte. A concentração de  $\text{NO}_2$  é dependente da situação meteorológica, da razão de emissão de óxidos de nitrogênio, da oxidação de  $\text{NO}$  em  $\text{NO}_2$  e da taxa de oxidação de  $\text{NO}_2$  em outras espécies. A dispersão,

deposição e transformação química fazem com que a concentração dos óxidos de nitrogênio diminua com a distância da fonte de emissão (LÖVBLAD et al., 1997).

**Tabela 2.** Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de  $O_3$  na estratosfera.

**Fonte:** Adaptado de Solomon (1999)

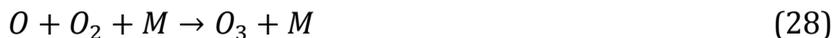
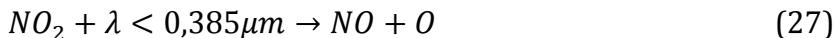
| Processo químico  | Número da reação |
|---|------------------|
| <i>Química de Chapman<sup>a</sup></i>                     |                  |
| $O_2 + h\nu \rightarrow 2O$                               | R1               |
| $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$                         | R2               |
| $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$                     | R3               |
| $O(^1D) + M \rightarrow O + M$                            | R4               |
| $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$                          | R5               |
| $O + O + M \rightarrow O_2 + M$                           | R6               |
| $O + O_3 \rightarrow 2O_2$                                | R7               |
| <i>Ciclos catalíticos do cloro inorgânico<sup>b</sup></i> |                  |
| $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$                          |                  |
| $ClO + O \rightarrow Cl + O_2$                            |                  |
| Ciclo líquido 4: $O + O_3 \rightarrow O_2$                |                  |
| $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$                          |                  |
| $ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$                   |                  |
| $Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$                   |                  |
| $ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$                      |                  |
| Ciclo líquido 5: $2O_3 \rightarrow 3O_2$                  |                  |

<sup>a</sup> Chapman (1930)

<sup>b</sup> Stolarski e Cicerone (1974); Molina e Molina (1987)

A fotodissociação de  $\text{NO}_2$  em  $\text{NO}$  e  $\text{O}$  em particular é conhecida por afetar substancialmente os níveis de  $\text{O}_3$ , porque a única fonte significativa de  $\text{O}_3$  troposférico é a reação entre oxigênio atômico e molecular (FYNLAYSON-PITTS e PITTS, 2000). A decomposição fotoquímica de  $\text{NO}_2$  forma  $\text{NO}$  mais  $\text{O}$ , e este último combina-se rapidamente com oxigênio molecular para gerar ozônio. As outras reações que ocorrem na estratosfera envolvendo oxigênio atômico não podem competir em virtude da maior velocidade de reação do oxigênio atômico com o  $\text{O}_2$ , que se encontra em grande abundância na troposfera (BAIRD, 2002).

De acordo com Iribarne e Cho (1980), se o  $\text{NO}_2$  absorve luz em comprimentos de onda menores que  $0,385 \mu\text{m}$ , ele se dissocia em  $\text{NO}$  e  $\text{O}$  atômico. No ar, isto é rapidamente seguido por mais duas reações, como indicado abaixo:



O oxigênio atômico forma imediatamente ozônio com o oxigênio do ar e o ozônio re-oxida o óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) em  $\text{NO}_2$ . Somando as três reações, percebe-se que não ocorrem mais reações químicas. Sendo assim, numa atmosfera pura, isto tem apenas o efeito de manter uma certa concentração de  $\text{O}$  e  $\text{O}_3$  no ar. Estas concentrações são controladas pela velocidade das três reações; como a segunda reação é

extremamente rápida, a concentração do oxigênio atômico é mantida em um nível extremamente pequeno. A terceira reação não é tão rápida, e a concentração de ozônio terá valores maiores (da ordem de 0,005-0,05ppm) (IRIBARNE e CHO, 1980).

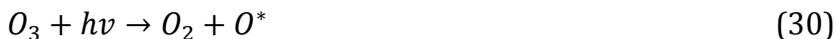
A importância da variação espacial das taxas de fotólise de  $\text{NO}_2$  vem sendo bastante avaliada em estudos sobre a atmosfera (SUNNY et al., 1999). O estudo da fotólise de  $\text{NO}_2$  para utilização em modelos de qualidade do ar é mostrado em vários estudos (BAHM et al., 2004; MIRANDA et al., 2005; CASTRO et al., 1997; BARNARD et al., 2004). As reações fotolíticas têm um papel fundamental no controle da abundância de vários poluentes. Em particular, a fotodissociação de  $\text{NO}_2$  em  $\text{NO}$  e  $\text{O}$  é conhecida por afetar substancialmente os níveis de ozônio (BARNARD et al., 2004), porque um de seus produtos,  $\text{O}$ , reage com  $\text{O}_2$  para produzir  $\text{O}_3$  (WIEGAND e BOFINGER, 1999).

### **OH**

Por sua alta reatividade, o OH (radical hidroxila), embora presente em baixas concentrações, é uma das espécies químicas mais importantes na atmosfera, com tempo de vida médio de aproximadamente 1s. A sua reação com a maior parte dos gases traço na atmosfera é o maior sumidouro para estes (BAIRD, 2002).

Os radicais hidroxila têm sua produção quando a radiação solar ultravioleta com comprimentos de onda

menores do que 0,32  $\mu\text{m}$  decompõem  $\text{O}_3$  em oxigênio molecular e átomos de oxigênio excitados energeticamente ( $\text{O}^*$ ), conforme a reação abaixo:



Estes átomos energeticamente excitados têm seu excesso de energia dissipado na forma de calor, eventualmente se recombinando com  $\text{O}_2$  para formar  $\text{O}_3$  (ciclo nulo – não tem efeito químico líquido). Aproximadamente 1% destes átomos de  $\text{O}^*$  reagem com vapor d'água para formação de dois radicais OH conforme a reação a seguir:



O efeito líquido para estes átomos de  $\text{O}^*$  produzidos pela primeira reação e removidos pela segunda é:



Uma vez formado, o radical OH é um poderoso oxidante, reagindo rapidamente com quase todos os gases traços que contém hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio, enxofre e alguns halogênios, com exceção de  $\text{N}_2\text{O}$  e CFC.

#### 4.6 Smog fotoquímico

A expressão “*smog*” é derivada do inglês: “*smoke*” (fumaça) e “*fog*” (neblina). Era utilizada anteriormente para definir o ar altamente poluído que ocorre nas grandes cidades por conta das emissões de dióxido de enxofre e aerossóis, sendo hoje em dia aplicado a todas as formas de poluição atmosférica severa em que há restrição de visibilidade (WALLACE e HOBBS, 2006).

O smog fotoquímico é definido como uma mistura de gases e aerossóis gerados fotoquimicamente. São normalmente encontrados em locais quentes e ensolarados, em ambientes urbanos. O elemento principal para sua formação é o acúmulo de  $O_3$  (gerado fotoquimicamente pela reação dos óxidos de nitrogênio). Este acúmulo relaciona-se com impactos na saúde e danos à vegetação (JAFFE e WEISS-PENZIAS, 2003). A formação de smog é favorecida nas grandes cidades em que há ampla disponibilidade de radiação solar: uma vez que as emissões de óxidos de nitrogênio ocorrem pela queima de combustíveis fósseis, a incidência de radiação solar favorece a conversão em  $O_3$  e consequente formação de smog.

O principal composto envolvido na formação do smog fotoquímico é o ozônio ( $O_3$ ), uma substância nociva que leva à irritação dos olhos e membranas do sistema respiratório, colaborando no agravamento de doenças crônicas; a exposição ao ozônio, mesmo por pessoas em boas condições de saúde, pode trazer problemas respiratórios e sintomas

como dor no peito e tosse. A exposição ao ozônio também degrada borracha, retarda o crescimento de plantas e danifica plantações (AHRENS, 2009). Como visto anteriormente, o ozônio na troposfera forma-se pela presença simultânea de óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos não-metano e luz solar. Uma das espécies envolvidas na formação é o radical OH (principal oxidante na atmosfera), com o primeiro passo na sua formação sendo a fotólise de O<sub>3</sub>:



### 4.7 Conclusões

O estudo da química da atmosfera e da relação das atividades humanas com o aumento da poluição do ar é relativamente recente. No entanto, é necessário cada vez mais aprofundar-se em tais temas, por conta da necessidade de avaliação da redução de emissões nas grandes cidades, especialmente no que se refere aos efeitos dos poluentes na saúde da população. Neste sentido, o estudo das reações fotoquímicas deve ser feito de forma operacional, já que estas reações ocorrem continuamente, funcionando como “combustível” para ocorrências como geração de ozônio troposférico, smog fotoquímico, entre outras reações.

### 4.8 Referências bibliográficas

AHRENS, C.D. **Meteorology Today**. EUA: Cengage Learning, 621p. 2009.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

BAHM, K.; KHALIL, M.A.K. A new model of tropospheric hydroxyl radical concentrations. **Chemosphere**, v. 54. p.143-166, 2004.

BAIRD, C. **Química ambiental**. 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2002. 622p.

BARNARD, J.C.; CHAPMAN, E.G.; FAST, J.D.; SCMELZER, J.R.; SLUSSER, J.R.; SHETTER, R.E. An evaluation of the FAST-J photolysis algorithm for prediction nitrogen dioxide photolysis rates under clear and cloudy sky conditions. **Atmospheric Environment**. v.38, p.3393-3403, 2004.

BRASSEUR, G.P.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere**. 3ª edição. Holanda: Springer, 2005. 651p.

CASTRO, T.; RUIZ-SUAREZ, L.G.; RUIS-SUAREZ, J.C.; MOLINA, M.J.; MONTERO, M. Sensitivity analysis of a UV radiation transfer model and experimental photolysis rates of NO<sub>2</sub> in the atmosphere of Mexico City. **Atmospheric Environment**, v.31, nº 4, p 609-620, 1997.

CHAPMAN, S. A Theory of Upper-Atmospheric Ozone. **Memories of Royal Meteorological Society**, III v. 26. p.103-125. 1930.

FINLAYSON-PITTS, B.; PITTS JR., J.N. **Chemistry of the upper and lower atmosphere**. New York: Academic Press, 2000, 969p.

GOODY, R. M.; WALKER, J. C. G. **Atmosferas Planetárias**. Tradução: Antônio Chistofolletti. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1975. 139 p.

HOBBS, P.V. **Introduction to atmospheric chemistry**. Cambridge University Press. 2ª edição. 2000. 262p.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar radiation**. Vancouver: Associated Press. 1983. 390p.

IRIBARNE, J.V.; CHO, H.R. **Atmospheric Physics**. Holanda: D Reidel Publishing Company. 1980. 212p.

JACOB, D. **Introduction to atmospheric chemistry**. Princeton University Press. 1999. 264p.

JAFFE, D.A.; WEISS-PENZIAS, P.S. Nitrogen Cycle. In: HOLTON, J.R.; CURRY, J.A.; PYLE, J.A. ed. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. EUA: Academic Press. 2003. p. 205-213.

LIU, K.N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2ª edição. EUA: Academic Press. 2002. 599p.

LÖVBLAD, G.; PALMGREN, F.; VAN AALST, R.; ALLEGRINI, I.; BAUMAN, R.; DEROUANE, A.; EDWARDS, L.; FIALA, I.; HAUER,

A.; HAWKINS, M.; LAHTINEN, T.; VAN LEEUWEN, R.; NILSSON, M.; POHJOLA, V.; DE SAEGER, E.; DE SANTIS, F. Position Paper on Air Quality: Nitrogen Dioxide. Working Group on Nitrogen Dioxide. European Commission Directorate general XI. 1997. 76p.

MANAHAN, S.E. **Fundamentals of Environmental Chemistry**. Boca Raton: CRC Press. 2001. 743p.

McEWAN, M.J.; PHILLIPS, L.F. **Chemistry of the Atmosphere**. New Zealand. Editora Edward Arnold, 1975. 301p.

MIRANDA, R.M.; ANDRADE, M.F.; FATTORI, A.P. Preliminary studies of the effect of aerosols on nitrogen dioxide photolysis rates in the city of São Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v.75, p.135-148, 2005.

MOLINA, L.T.; MOLINA, M.J. Production of chlorine oxide (Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) from the self reaction of the chlorine oxide (ClO) radical. **The Journal of Physical Chemistry**, v.91. pp.433-436. 1987.

OLIVEIRA FILHO, K.S.; SARAIVA, M.F.O. **Astronomia e Astrofísica**. 2<sup>a</sup> edição. Brasil: Livraria da Física. 2004. 558p.

PFISTER, G.; BAUMGARTNER, D.; MADERBACHER, R.; PUTZ, E. Aircraft measurements of photolysis rate coefficients for

ozone and nitrogen dioxide under cloudy conditions.

**Atmospheric Environment**, v.34, p 4019-4029, 2000.

SCHAUB, D.; WEISS, A.K.; KAISER, J.W.; PETRITOLI, A.; RICHTER, A.; BUCHMANN, B.; BURROWS, J.P. A transboundary transport episode of nitrogen dioxide as observed from GOME and its impacts in the Alpine region. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v.4, p.5103-5134, 2004

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. **Atmospheric chemistry and Physics: from air pollution to climate change**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.1360p.

SEROJI, A.R.; WEBB, A.R.; COE, H.; MONKS, P.S.; RICKARD, A.R. Derivation and validation of photolysis rates of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and CH<sub>2</sub>O from a GUV-541 radiometer. **Journal of Geophysical Research**, v.109, p 1-10, 2004.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v.37, n.3, p.275-316, 1999.

STOLARSKI, R.S.; CICERONE, R.J. Stratospheric Chlorine: a possible sink for ozone. **Canadian Journal of Chemistry**, v.52, p.1610-1615. 1974.

SUNNY, F.; MAHADEVAN, T.N.; SITARAMAN, V. Estimation of actinic flux and photolysis rate constant of NO<sub>2</sub> from aerosol

## Meteorologia em tópicos – volume 5

size data. **Atmospheric Environment**. v.33, p.1479-1488, 1999.

VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution**. 4<sup>a</sup> edição. Associated Press, USA. 967p. 2008.

WALLACE, W.M.; HOBBS, P.V. **Atmospheric Science - An Introductory Survey**. London: Elsevier, 2006. 483p.

WAYNE, R.P. **Chemistry of atmospheres** - an introduction to the chemistry of the atmospheres of earth, the planets, and their satellites. Clarendon Press: Oxford, 1985.775p.

WIEGAND, A.N.; BOFINGER, N.D. Review of empirical methods for the calculation of the diurnal photolysis rate coefficient. **Atmospheric Environment**, v.34, p.99-108, 1999.

## CAPÍTULO 5

# MODELAGEM NUMÉRICA DA QUALIDADE DO AR: REVISÃO DE CONCEITOS E APLICAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

*Marcelo Felix Alonso*  
*Jonas da Costa Carvalho*  
*Ludmila Pochman de Souza*  
*Gustavo Copstein Cuchiara*

### 5.1 Introdução

A poluição atmosférica indubitavelmente é um problema de saúde pública. As emissões de poluentes para a atmosfera, comumente denominados poluentes primários, e os produtos de sua oxidação representam um risco direto a saúde. A produção de níveis elevados de ozônio ( $O_3$ ) próximo a superfície, conhecido como *smog*<sup>1</sup> fotoquímico, e os altos níveis de partículas totais em suspensão (PTS), principalmente partículas inaláveis (MP10), são relacionadas com a redução da função pulmonar em vários estudos (SALDIVA et al., 1994, 1995; ABELSOHN et al., 2002; LIN et al., 2003).

---

<sup>1</sup> O termo *smog* é um acrônimo que deriva do termo *smoke* (fumaça em inglês) e *fog* (nevoeiro em inglês).

Em particular, as partículas finas são de maior impacto. Partículas com diâmetro superior a 10  $\mu\text{m}$  rapidamente penetram e se depositam na traquéia e nos brônquios. Já aerossóis com 2,5  $\mu\text{m}$  podem alcançar vias aéreas estreitas e alvéolos e as partículas menores que 100 nm (0,1  $\mu\text{m}$ ), têm alta deposição nos alvéolos (RIBEIRO, 2008).

Nos grandes aglomerados urbanos, a atividade veicular e industrial é responsável por uma parcela majoritária da emissão desses poluentes. Nos países em desenvolvimento este problema é, em geral, agravado pela idade da frota veicular e intenso uso de combustíveis fósseis em detrimento de fontes mais eficientes de energia tanto no setor de transporte quanto na indústria (ALONSO, 2011). Vários trabalhos também elucidam a importância da emissão por queimadas no contexto sul-americano (ANDREAE et al., 2004; FREITAS et al., 2005).

Portanto, a análise e prognóstico da qualidade do ar vêm ganhando atenção frequente da comunidade acadêmica e dos tomadores de decisão. Dentro desse contexto, cita-se a modelagem de processos químicos na atmosfera como uma ferramenta importante no diagnóstico e prognóstico da composição química atmosférica no âmbito local e regional. De fato, o uso de modelos atmosféricos com dispersão e química de poluentes em centros ou universidades regionais, concomitante com os órgãos ambientais competentes, é uma estratégia nova e com grande potencial; nesse contexto torna-se muito relevante investir em pesquisa de qualidade do ar no nível estadual.

A industrialização do Rio Grande do Sul está elevando sua participação no produto interno bruto (PIB) brasileiro. O estado consta na lista dos mais ricos do Brasil (IBGE, 2010) e possui uma frota superior a quatro milhões de veículos, com um crescimento médio de 5% ao ano, conforme dados do Departamento de Trânsito do Estado do Rio Grande do Sul (DETRAN-RS, 2016), o que incentivou, por exemplo, a elaboração de inventários de emissões atmosféricas na região metropolitana de Porto Alegre – RMPA (ex: TEIXEIRA et al., 2008; FEPAM, 2010) e a elaboração do primeiro inventário das emissões atmosféricas das fontes móveis do estado do Rio Grande do Sul (FEPAM, 2010). Além da poluição gerada localmente, mostrou-se que o Rio Grande do Sul sofre influência das queimadas na região amazônica e central do país, mediante transporte associado a fenômenos de meso e larga escalas (FREITAS, et al. 2005; ALONSO, 2011).

Esse capítulo vem ampliar o entendimento sobre o uso de modelos numéricos regionais de dispersão e química dos poluentes no diagnóstico e prognóstico da qualidade do ar, através de uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos e exemplos de aplicação da ferramenta no estado do Rio Grande do Sul.

### **5.2 A Poluição Urbana**

A poluição urbana é um problema antigo, com registros históricos datados do século XII através de escritos do

filósofo Moses Maimonides (1135 – 1204). De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), poluentes como o carbono negro, o ozônio, o metano e o dióxido de carbono provocam mais de 7 milhões de mortes associadas à poluição do ar por ano (WHO, 2015).

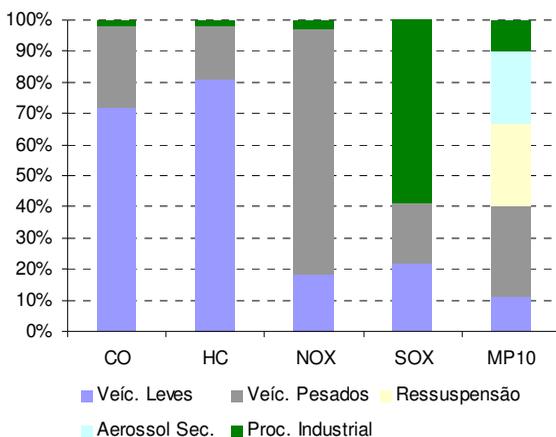
Dentre os principais emissores, podemos classificar as fontes antrópicas associadas às atividades tecnológicas em duas categorias: estacionárias e móveis.

As fontes estacionárias provêm do uso de combustíveis fósseis, dos processos industriais e da queima de resíduos sólidos. Já as fontes móveis podem ser subdivididas em veículos automotores (material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e aldeídos), aviões e barcos (óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio).

A contribuição relativa de cada fonte para a emissão de um determinado poluente primário, dentro de um ambiente urbano, envolve um complexo levantamento de diversos fatores. Para fontes móveis, por exemplo, é importante conhecer o tipo e idade da frota veicular, o comportamento do tráfego e a configuração das vias. Os fatores de emissão também dependem fortemente do padrão de condução do veículo, o qual pode variar em função da localidade (BERKOWICZ et al., 2006). Para as indústrias, as emissões podem ser inventariadas em três níveis de detalhamento: Nível de Planta, referente a uma atividade industrial que poderá conter várias atividades emissoras; Nível Pontual, medidas diretas de chaminés, dutos, ventos ou outras fontes de emissões e Nível de Processo, operação unitária de uma

## Meteorologia em tópicos – volume 5

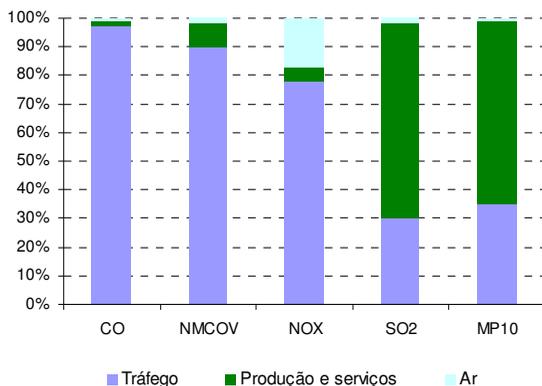
categoria específica de fontes (EPA, 1999). As figuras 1 a 3 mostram os principais poluentes emitidos em duas grandes metrópoles sul-americanas: São Paulo e Bogotá, respectivamente. Para alguns poluentes primários, como o monóxido de carbono (CO), mais de 90% da emissão remete-se a atividade viária, em ambos os centros urbanos. Já para os óxidos de enxofre, por exemplo, a maior porcentagem de emissão vem do processo industrial.



**Figura 1.** Emissões relativas de poluentes por tipo de fonte, para a Região Metropolitana de São Paulo no ano de 2005.

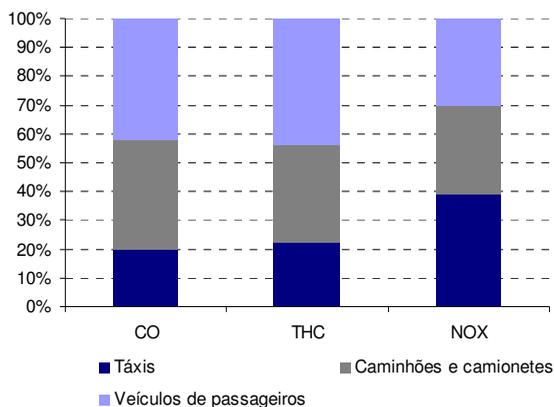
**Fonte:** Alonso (2011)

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 2.** Distribuição das emissões por fonte e poluente no perímetro urbano de Bogotá.

**Fonte:** Alonso (2011)



**Figura 3.** Contribuição das categorias veiculares no inventário de emissão proveniente de veículos de carga leve para Bogotá.

**Fonte:** Alonso (2011)

Há dois tipos básicos de poluição antrópica urbana: quando a intensidade da luz solar e as emissões por combustão de material fóssil são altas, o resultado é o chamado *smog* fotoquímico. Quando as emissões de enxofre pelo processo industrial são altas, o ambiente recebe menor intensidade de luz solar, e a umidade relativa é alta, tem-se o “*smog* tipo Londres<sup>2</sup>”.

Atualmente, o *smog* fotoquímico é mais comum do que o *smog* baseado no enxofre, particularmente em ambientes urbanos com grande população e densidade de veículos. Em contraste ao *smog* tipo Londres que é de natureza química redutora devido ao dióxido de enxofre, o *smog* fotoquímico possui natureza oxidante, principalmente pela presença de ozônio, afetando diretamente a saúde da população (SALDIVA et al., 1994, 1995; ABELSOHN et al., 2002; LIN et al., 2003; KNOWLTON et al., 2004;) Além disso, sua fitotoxicidade pode comprometer a produtividade agrícola e afetar áreas florestais.

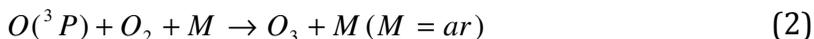
A produção de ozônio e de outros oxidantes na troposfera ocorre através de uma cadeia de reações que têm como principal condutor a espécie radical hidroxila (OH•).

---

<sup>2</sup> O termo *smog tipo Londres* é uma referência ao episódio ocorrido em Londres no ano de 1952, considerado um dos piores impactos ambientais vitimando cerca de 12.000 londrinos.



há um equilíbrio entre as espécies NO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> resultando em pouca formação de ozônio (reações 1 a 3 abaixo).



Na presença de compostos orgânicos voláteis (COVs), as reações de oxidação são tipicamente iniciadas pelo OH• formado principalmente pela reação de fotólise do ozônio na presença do vapor d'água (reações 4 e 5), mas também pode ser formado pela fotólise do ácido nitroso (HNO<sub>2</sub>) e peróxidos (GILLANI e PLEIM, 1996).

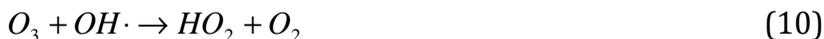


A oxidação dos hidrocarbonetos (RH), por exemplo, que envolve os radicais peróxidos orgânicos (RO<sub>2</sub>), gera compostos carbonila (R'CHO) cuja reação com o OH• produz ozônio adicional (reações 6 a 8). Portanto, a radical hidroxila, pela sua importância na remoção de um grande número de gases traços, pode ser usado como indicador da eficiência e variabilidade temporal da oxidação da atmosfera (LAWRENCE et al., 2001).

## Meteorologia em tópicos – volume 5

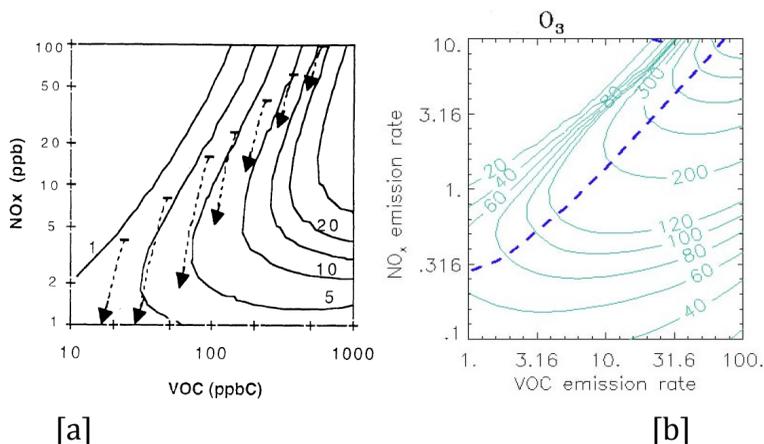


O reservatório de ozônio na troposfera é comumente definido como a família do oxigênio ímpar [OX  $\equiv$  O<sub>3</sub> + O + NO<sub>2</sub> + HO<sub>2</sub>NO<sub>2</sub> + (2x)NO<sub>3</sub> + (3x)N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Jacob (2000)]. O ozônio tipicamente equivale a 90% do OX, cuja produção se deve principalmente às reações entre os peróxidos e os óxidos de nitrogênio, como a reação 7. A perda de OX se dá principalmente pela reação 5 e por:



Em suma, a formação do ozônio depende essencialmente da disponibilidade de radiação e das concentrações de COVs e NOX. A figura 5 mostra o padrão típico para grandes cidades norte americanas da taxa de produção do ozônio (ppb h<sup>-1</sup>, onde ppb é partes por bilhão) e da concentração do ozônio (em ppb) em função das concentrações e da taxa de emissão de seus principais precursores, respectivamente. Essas isopletras (Linhas ou curvas que apresentam valores idênticos de determinada grandeza) foram calculadas utilizando os resultados de simulações dos modelos fotoquímicos tridimensionais para

eventos isolados de poluição sobre os Estados Unidos (SILLMAN et al., 1990; SILLMAN e HE, 2002) e mostram que a formação do ozônio é altamente não-linear. Essa não-linearidade se deve a natureza da química dos NO<sub>x</sub> e COVs que, além de governar a formação de ozônio, PAN (peroxiacetilnitrato) e peróxidos, também é responsável pela concentração de OH• e, conseqüentemente, influencia a capacidade oxidante da atmosfera (GILLANI e PLEIM, 1996).



**Figura 5.** [a] Isopletas da taxa de formação do ozônio ( $\text{ppb h}^{-1}$ ) como função das concentrações de NO<sub>x</sub> (ppb) e COVs (ppbC). As setas indicam a evolução das concentrações de NO<sub>x</sub> e COVs, calculadas para o período das 9:00 às 17:00 local em atmosferas urbanas típicas das grandes cidades norte-americanas [b] Isopletas de ozônio (ppb) como função da taxa de emissão de NO<sub>x</sub> e COVs ( $10^{12} \text{ molec. cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), calculados em condições representativas ao horário de máxima formação de ozônio. A linha azul tracejada

representa a transição entre os regimes NOX e COVs limitantes.

**Fonte:** Sillman et al., 1999 e Sillman, 2003.

Em ambientes com alta concentração de NOX, a taxa de formação do ozônio diminui não-linearmente com o aumento da concentração de NOX e decresce mais rapidamente se forem reduzidas as emissões de COVs. Esse ambiente é comumente denominado COVs-limitante (razão baixa). Em ambientes com baixa concentração de NOX, e alta concentração de COVs, a redução de NOX é mais efetiva no controle do ozônio, até certo limiar. Esse ambiente é chamado NOX-limitante (razão alta) (SILLMAN, 2003).

A previsão do impacto da redução de NOX e COVs na formação de ozônio, em ambientes urbanos, possui largas incertezas, que podem ser relativamente reduzidas através de campanhas intensivas de medição, adicionalmente aos resultados de modelagem. Além dos modelos de química e transporte eulerianos, que possuem diferentes hipóteses e limitações, os inventários de emissão são também responsáveis pela larga incerteza na relação O<sub>3</sub>-NOX-COVs. A sensibilidade do ozônio depende criticamente das taxas de emissão de seus precursores e principalmente da especiação dos COVs, que varia conforme a metodologia adotada. Portanto, a literatura diverge na definição dos limites entre os regimes.

### **5.3 Formulação dos modelos de dispersão e química da atmosfera**

A representação dos processos físicos por modelagem matemática requer, algumas vezes, solução analítica muito complexa e é altamente dependente das condições de contorno (condições de fronteira). Dependendo da abordagem adotada e principalmente da escala e complexidade dos processos a serem modelados torna-se necessária sua resolução numérica. Comumente, utilizam-se dois métodos tradicionais para discretizar essas equações: diferenças finitas e volumes finitos. O primeiro se baseia na aplicação da equação diferencial em pontos discretos de uma malha e na utilização de aproximações das derivadas utilizando séries de Taylor. O segundo aplica a equação diferencial de conservação a subdomínios de uma determinada malha através da sua integração em cada volume. Entende-se como “resolução espacial” o espaçamento entre os pontos da malha. Em função desse espaçamento da grade e do intervalo de tempo adotado, dividem-se os fenômenos atmosféricos em duas famílias principais, dependendo se sua solução é explícita ou não: resolvidos e não-resolvidos. Para se obter o prognóstico final em modelos *on-line*, resolve-se a tendência total através da solução individual de cada termo de tendência local. Portanto, a razão de mistura de uma determinada espécie é influenciada tanto por processos não-resolvidos, como a

turbulência e a convecção, quanto por processos resolvidos na escala da grade, como a advecção.

A equação 11 mostra a solução final da razão de mistura para uma determinada espécie como a soma das soluções parciais. A solução final pode ser aproximada compondo-se paralelamente ou sequencialmente as soluções parciais (FREITAS et al., 2009)

$$\left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{adv} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{turb_{CLP}} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{conv} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{chem} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{emiss} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{dep_{seca}} + \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}\right)_{dep_{úmida}} \quad (11)$$

onde os índices *adv*, *turb CLP*, *conv*, *chem*, *emiss*, *dep seca* e *dep úmida* referem-se aos processos de advecção na escala da grade, turbulência dentro da camada limite planetária (CLP), transporte convectivo por nuvens rasas e profundas, processos químicos, emissão, deposição seca e deposição úmida, respectivamente.

Conforme já mencionado, o sistema de equações fundamentais, que descrevem os processos atmosféricos pela física clássica, não possui solução analítica e é resolvido numericamente através de metodologias de discretização numérica (comumente os métodos de diferenças finitas ou de volumes finitos), a partir da qual se obtém a solução em pontos de grade. Resumidamente, pode ser dito que esta corresponde a uma média estatística de cada variável

prognóstica na célula discretizada. Comumente, utiliza-se a decomposição de Reynolds para a solução numérica das equações atmosféricas, na qual cada variável é separada em termos de sua média e de sua flutuação em torno desta (equação 12).

$$(v) = (\bar{v}) + (v') \quad (12)$$

Conforme discutido em Freitas et al. (2009), o transporte resolvido numericamente por esquemas de advecção deve conservar a massa e ser monotônico, isto é, dada uma função contínua num intervalo não há mudança de tendência dessa função. Além disso, deve-se manter a solução positiva definida e não demandar excessiva informação lateral para compor os gradientes necessários para a solução numérica. Já o transporte na escala sub-grade associado aos processos de difusão da CLP, é parametrizado aplicando-se a teoria K, na qual os fluxos turbulentos são proporcionais ao gradiente da quantidade média transportada através de um coeficiente de difusividade (K) que pode ser escrita como:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) \quad (13)$$

onde  $\bar{c}$  é a componente média da concentração, e  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  são coeficientes de difusão longitudinal, lateral e vertical respectivamente.

Esquemas que seguem esta abordagem são muito dependentes dos coeficientes de difusividade, que podem ser especificados como uma função da rugosidade da superfície, estabilidade termodinâmica da atmosfera, cisalhamento do vento, dentre outros.

Além do transporte, os gases e partículas em suspensão sofrem processos de deposição. A deposição seca de gases e partículas consiste no transporte destes materiais da atmosfera para a superfície, controlada pela turbulência atmosférica, propriedades químicas das espécies e pela própria natureza da superfície receptora. O processo de deposição úmida ocorre quando o material em questão está embebido dentro de uma porção de água condensada em precipitação depositando-o sobre a superfície abaixo. Para parametrizar esse processo, assume-se a lei de Henry, que estabelece um estado de equilíbrio entre as fases gasosa e aquosa.

Os poluentes primários emitidos diretamente para a atmosfera sofrem processos químicos cinéticos e de foto-dissociação que modificam localmente a razão de mistura das espécies emitidas e geram poluentes denominados secundários. A colisão entre moléculas é a característica que define o processo cinético. Já na foto-dissociação há interação

dos fótons com as moléculas, levando-as a um estado excitado e, potencialmente, uma dissociação.

Um estudo detalhado da formação de oxidantes na troposfera inclui considerar uma vasta quantidade de espécies envolvidas em milhares de reações químicas. Entretanto, esse elevado número de espécies e reações resulta em uma limitação para a sua implementação em modelos numéricos de previsão de tempo químico.

Sob essa perspectiva, o mecanismo químico é um dos mais importantes componentes dos modelos regionais para se entender o efeito das emissões antrópicas e biogênicas na qualidade do ar (STOCKWELL, 1986). Existem mecanismos com alto detalhamento químico, como o MCM (Master Chemical Mechanism – JENKIN e CLEMITSHAW, 2000) com aproximadamente 2400 espécies químicas que, entretanto, demandam tempo de processamento e requisito de memória RAM muito altos (GROSS e STOCKWELL, 2003). Portanto, agregar as espécies químicas em grupos, com base no peso molecular, reatividade ou outras características físico-químicas, foi a solução encontrada para simular os processos de reação química nos atuais modelos atmosféricos regionais.

Vários estudos comparando os diferentes mecanismos químicos existentes para a modelagem da qualidade do ar têm sido publicados nos últimos anos (ex. STOCKWELL, 1986; KUHN et al., 1998, GROSS e STOCKWELL, 2003). A tabela 1 lista alguns dos principais mecanismos químicos de processos troposféricos fase-homogênea utilizados em modelos regionais de qualidade do ar.

**Tabela 1.** Mecanismos químicos troposféricos em modelos numéricos de qualidade do ar.

**Fonte:** Alonso, 2011.

| Mecanismo/<br>Referência                            | Número<br>de<br>espécies<br>Inorgânicas | Número<br>de<br>espécies<br>orgânicas | Número<br>de reações<br>de fotólise | Número<br>de reações<br>químicas |
|---|---|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| <b>RACM<sup>1</sup></b><br>Stockwell et al. (1997)  | 21                                      | 56                                    | 23                                  | 214                              |
| <b>RADM2<sup>2</sup></b><br>Stockwell et al. (1990) | 21                                      | 42                                    | 21                                  | 137                              |
| <b>EMEP<sup>3</sup></b><br>Simpson et al. (1997)    | 22                                      | 57                                    | 24                                  | 117                              |
| <b>RELACS<sup>4</sup></b><br>Crassier et al. (2000) | 12                                      | 35                                    | 17                                  | 111                              |
| <b>CBM-IV<sup>5</sup></b><br>Gery et al. (1988)     | 14                                      | 22                                    | 15                                  | 88                               |
| <b>SAPRC<sup>6</sup></b><br>Carter (1990)           | 24                                      | 48                                    | 30                                  | 184                              |

<sup>1</sup> *Regional Atmospheric Chemistry Mechanism*

<sup>2</sup> *Regional Acid Deposition Model, version 2*

<sup>3</sup> *Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe*

<sup>4</sup> *Regional Lumped Atmospheric Chemical Scheme*

<sup>5</sup> *Carbon Bond Model IV*

<sup>6</sup> *Statewide Air Pollution Research Center*

#### 5.4 Modelos de dispersão e química da atmosfera

Modelos numéricos que contemplam a solução da química e transporte de gases e aerossóis interligados com a solução do estado atmosférico, representam o que há de mais atual na modelagem numérica acoplada da atmosfera. A utilização de apenas um referencial de coordenadas espaciais e a utilização de parametrizações físicas do modelo atmosférico faz com que o transporte das partículas de aerossol e gases traço seja consistente com o modelo atmosférico em si e minimiza erros numéricos associados às interpolações.

De fato, os modelos desacoplados (que resolvem os processos de dispersão e química independente da solução do estado atmosférico, do inglês *off-line*) são computacionalmente menos onerosos em relação aos modelos interligados e podem ser usados, por exemplo, para análises de sensibilidade de mecanismos químicos, em situações nas quais o impacto da meteorologia é mínimo (DALVI, 2015). Porém, os modelos desacoplados apresentam erros numéricos associados à interpolação, o que pode levar, dentre outros problemas, à violação da conservação de massa (FREITAS et al., 2009).

Podem ser citados vários exemplos de modelos numéricos usados para estudos de tempo químico em escala regional.

O **CFORS** (*Chemical weather FORecast System* - UNO et al., 2003) é um modelo operacional de previsão de tempo

químico, interligado com o modelo Regional de Mesoescala RAMS (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003). Atualmente o sistema CFORS roda operacionalmente no NIES (National Institute for Environmental Studies - <http://www-cfors.nies.go.jp/~cfors/outline.html>), na previsão de CO, poeira e aerossóis entre outros, usando uma grade computacional que cobre toda a Ásia.

O *Chemical Weather Research and Forecasting (WRF/Chem)* é um sistema de última geração de modelagem da qualidade do ar, de previsão numérica do tempo entre outras funções. Projetado para atender tanto a pesquisa atmosférica quanto necessidades operacionais de previsão de tempo. É desenvolvido pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), Universidade de Oklahoma, dentre outros institutos de pesquisa.

Seu modelo meteorológico WRF é não hidrostático, com dois núcleos dinâmicos: WPS (*WRF Preprocessing System*) e ARW (*Advanced Research WRF*), duas coordenadas verticais (altura e coordenadas Eulerianas), bem como muitas opções diferentes para parametrizações físicas para representar processos. É projetado para ser um modelo flexível, sendo o estado da arte na modelagem numérica, com código portátil, que é eficiente em um ambiente de computação massivamente paralelo. No WRF são calculadas componentes como a velocidade do vento, a perturbação da temperatura potencial, a perturbação do geopotencial e a perturbação da

pressão em superfície entre outras variáveis físicas. Possibilita, também, gerar outras variáveis, incluindo energia cinética turbulenta e as razões de mistura de vapor d'água, chuva/neve e água/gelo das nuvens. A física do modelo inclui, ainda, cálculo de turbulência não-local para camada limite planetária e determinação de radiação de onda longa e onda curta em várias bandas espectrais.

A parte química do WRF/Chem simula a emissão, transporte (advectivo, convectivo e difusivo), deposição seca e úmida, interações e transformações químicas de gases traços e aerossóis, fotólise, de maneira simultânea com a meteorologia. É utilizado para investigação da qualidade do ar em escala regional, local e interações em microescala podendo servir para previsão de tempo químico, análises, medições de campanhas de campo, assimilação de satélite e medições químicas *in situ*, testando estratégias de redução da poluição e seus impactos sobre o tempo, clima e qualidade do ar. Uma descrição detalhada pode ser encontrada em Grell et al. (2005).

O módulo químico possibilita várias escolhas para os mecanismos químicos na fase gasosa, incluindo os mecanismos RADM2, RACM, CB-4 e CBM-Z. Para o esquema de fotólise, três escolhas podem ser feitas: esquema Madronich acoplado com hidrometeoros, aerossóis e parametrizações convectivas; esquema de fotólise Fast-J; ou esquema de fotólise FTUV. Existem quase 50 opções químicas para a fase gasosa principal e os módulos de aerossol. Disponibiliza também um modelo de ascensão da pluma

(*plumerise*) para tratar as emissões de queimadas florestais (FREITAS, et al. 2007), informações de satélite (e outras observações aéreas também podem ser usadas), para determinar a localização de queimadas e propriedades de fogo. O sistema também inclui emissões de Cinzas vulcânicas e o transporte de cinzas finas em altas concentrações para longas distâncias. Opções para apenas o transporte (4 caixas), o transporte de cinzas e os efeitos diretos de aerossóis podem ser incluídos.

O **CCATT-BRAMS** (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) é um modelo de química acoplado ao de transporte de aerossóis, desenvolvido juntamente com o modelo brasileiro do Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS). É um modelo Euleriano, ou seja, modelo de transporte químico tridimensional (3D) acoplado em linha (*on-line*) com um modelo de área atmosférica limitada. Projetado para estudos locais e regionais de química atmosférica da superfície e para baixa estratosfera, tanto para fins operacionais quanto de pesquisa (LONGO et al., 2013).

O CCATT prognostica a razão de mistura de gases traço através da solução da equação da conservação de massa. Inclui os processos de advecção na escala de grade resolvida com o esquema avançado *upstream* de segunda ordem, a difusão horizontal é baseada na formulação de Smagorinsky e a difusão vertical é parametrizada de acordo com o esquema de Mellor e Yamada (1982), que utiliza um

prognóstico da equação de energia cinética turbulenta. Considera deposição seca e úmida, ascensão da pluma associada com focos de queimadas e transporte vertical associado à convecção rasa (não precipitante) e profunda. O modelo é capaz de simular as emissões, o transporte, os processos de remoção de gases traços, a interação de aerossóis com a radiação solar e terrestre (onda curta e longa) e as reatividades químicas com total coerência com a dinâmica de simulações atmosféricas.

O sistema CCATT-BRAMS foi desenvolvido utilizando ferramentas digitais avançadas, a fim de se obter um modelo flexível multiuso, que permite ao usuário flexibilidade na escolha das espécies químicas, tipos de emissão e bases de dados. O sistema é composto por três pré-processadores: para os mecanismos químicos, para o banco de dados de emissões e para as condições de contorno e iniciais.

Resumidamente a ferramenta *Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics* (SPACK) permite a escolha do mecanismo químico. O *Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models* (PREP-CHEM-SRC) (FREITAS et al., 2011), é uma ferramenta para a preparação dos campos de emissões para modelos regionais e globais de qualidade do ar. E o DPREP-CHEM gera as condições iniciais e de contorno de química a serem utilizadas na simulação do CCATT-BRAMS.

O modelo BRAMS é baseado no RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), com diversas melhorias associadas com a representação de convecção cumulus, a

inicialização da umidade do solo e regime de superfície, entre outros. RAMS é um modelo de previsão numérica multiobjetivo desenhado para simular circulações atmosféricas com escalas variando da escala hemisférica até simulações de grandes turbilhões (LES- *Large Eddy Simulations*) da Camada Limite Planetária (CLP). O modelo é equipado com um esquema de aninhamento múltiplo que permite que as equações do modelo sejam solucionadas simultaneamente em qualquer número de grades computacionais com resoluções espaciais diferentes que interagem entre si. Também possui um complexo conjunto de módulos para simular processos como: transferência radiativa, troca de água, calor e momento entre a superfície e a atmosfera, transporte turbulento na CLP e microfísica das nuvens. As condições iniciais podem ser definidas a partir de vários conjuntos de dados observacionais que podem ser combinados e processados com um pacote isentrópico e mesoescala de análise de dados. Para as condições de contorno, os esquemas 4DDA permitem que os campos atmosféricos sejam aproximados aos dados de grande escala. Pacotes do BRAMS utilizados nesse sistema incluem uma versão ensemble do esquema de convecção profunda e rasa baseado no formalismo de fluxo de massa e dados de inicialização da umidade do solo.

Com relação aos modelos numéricos usados para estudos de dispersão e química da atmosfera na escala global cita-se: o **MOZART** (*Model of Ozone and Related Chemical Tracers* - HOROWITZ et al., 2003), operacionalmente na sua

segunda versão que assimila os campos meteorológicos gerados pelo *Middle Atmosphere version of the Community Climate Model (MACCM3)* a cada 3 horas, e possui resolução horizontal de  $2,8^\circ \times 2,8^\circ$  com 34 níveis verticais; o modelo *Geórgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model (GOCART)*, que assimila os campos meteorológicos gerados pelo *Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS)* e atualmente roda com resolução horizontal de  $2^\circ \times 2,5^\circ$  ou  $1^\circ \times 1^\circ$  com 20 – 55 níveis sigma na vertical (dependente da versão do GEOS DAS).

### **5.5 Representação de processos químicos nas escalas local e regional**

A boa representatividade dos processos químicos na atmosfera em modelos regionais depende de vários fatores: o nível de especificidade e distribuição das emissões, o tipo de abordagem para a inclusão dos processos químicos que ocorrem na baixa troposfera nos mecanismos químicos, o nível de detalhamento das parametrizações do modelo atmosférico, dentre inúmeros outros fatores. Todos estes fatores tornam a previsão do tempo químico uma ferramenta complexa e dependente da capacidade computacional disponível. Essa relação comumente é expressa em termos de resolução espacial e temporal. Tie et al. (2010) estudaram o impacto da resolução espacial do modelo e dos inventários de emissão na simulação da formação do ozônio sobre a cidade

do México, com o modelo WRF-CHEM. Os resultados sugerem importante impacto da resolução no cálculo do ozônio e precursores, e estabeleceram 24 km como limite máximo para uma boa representatividade local da distribuição espacial e do comportamento temporal desses poluentes em modelos de qualidade do ar. A melhoria na resolução espacial dos inventários de emissões também impactou positivamente os resultados.

Outro fator de extrema importância nas simulações de qualidade do ar é a escolha do mecanismo químico. Gross et al. (2003) compararam três dos esquemas químicos comumente utilizados em modelagem regional (EMEP, RACM e RADM2). Os mecanismos foram aplicados para simulações de cenários com e sem emissões. Os resultados mostraram valores próximos de ozônio e precursores entre os esquemas químicos sobre áreas rurais, porém, considerável diferença sobre a área urbana, especialmente para simulações com emissões.

### **5.6 Aplicação da modelagem numérica no estado do Rio Grande do Sul: Estudo de Caso**

No que diz respeito ao estudo de emissão, transporte, deposição e concentração de poluentes na atmosfera, a modelagem numérica é um dos métodos mais importantes para o estudo da poluição fotoquímica. Esta seção apresenta os resultados de dois modelos numéricos de previsão da qualidade do ar para estudar o comportamento das

concentrações de ozônio (O<sub>3</sub>) troposférico, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) emitidos na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA). As simulações são realizadas utilizando os modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem. Os resultados das simulações são comparados com dados medidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM).

### **5.6.1 Metodologia**

#### **5.6.1.1 Características da simulação**

Para a validação dos modelos sobre a RMPA, foi escolhido um período que compreende as características atmosféricas necessárias para a concentração de poluentes precursores e com tempo necessário para a formação, transporte, deposição e destruição do ozônio. Assim, o período favorável à concentração do ozônio começou às 00 UTC do dia 5 e terminou a 00 UTC do dia 9 de janeiro de 2009. E o período desfavorável para a concentração começou às 00 UTC do dia 9 e terminou a 00 UTC do dia 12 de janeiro de 2009 (CUCHIARA, 2011).

Os modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem foram executados em uma configuração de grade centrada na cidade de Porto Alegre (30.05°S e 51.16°W), configuradas com 62 x 62 pontos, resolução horizontal de 10 km e 33 níveis na vertical. O domínio da simulação foi delimitado pelas

coordenadas 28.5°S e 32°S de latitude e 53°W e 49°W de longitude, abrangendo parte dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e o Oceano Atlântico adjacente à costa gaúcha.

Na simulação do modelo atmosférico BRAMS foram utilizadas as análises do modelo global do CPTEC (T245L65) para compor a condição inicial e de contorno de meteorologia. Os dados do CPTEC têm resolução horizontal de 2 graus e resolução temporal de 6 horas. Já o modelo WRF/Chem foi inicializado com análise FNL do NCEP, com resolução espacial de 1° x 1° e resolução temporal de 6 horas. Um resumo das configurações dos dois modelos é apresentado na tabela 2.

**Tabela 2.** Características do domínio da simulação e opções de configuração dos modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem.

|  | CCATT-BRAMS                                 | WRF/Chem       |
|--|---|----------------|
| Período  | 00UTC -24/12/2008 até as 00UTC - 13/01/2009 |                |
| Condições iniciais de contorno da meteorologia | CPTEC (T245L65)                             | GFS/FNL - NCEP |
| Grade horizontal                               | 62 x 62 pontos                              |                |
| Espaçamento da grade                           | 10 km                                       |                |
| Níveis na vertical                             | 33  |                |
| Mecanismo Químico                              | RACM  | RADM2          |
| Pré-processador de emissões                    | PREP-CHEM                                   |                |
| Inventários Antropogênicos                     | RETRO, emissions_yevich_logan, FEPAM        |                |

## Meteorologia em tópicos – volume 5

|  |                                 |                                |
|--|---------------------------------|--------------------------------|
| Inventários Biogênicos                     | MEGAN                           |                                |
| Simulação do pacote químico                | Sim                             |                                |
| Condições iniciais de climatologia química | MOCAGE                          | MOZART-4                       |
| Passo no tempo                             | 160s meteorologia e 40s química | 60s meteorologia e 30s química |

### **5.6.1.2 PREP-CHEM-SRC (*PREProcessor of Trace gas and Aerosol Emission fields for Regional and Global Atmospheric CHEMistry Models*)**

Segundo Freitas et al. (2011) o PREP-CHEM-SRC é uma ferramenta para a preparação das emissões de poluentes para uso nos modelos de qualidade de ar, desenvolvida no CPTEC/INPE. Os dados de emissão provêm da ação de queimada ou pelo próprio processo de fotossíntese e outros processos de transformação da floresta, pela combustão de produtos derivados de petróleo através de veículos ou indústrias, carvoarias e muitos outros fatores. O sistema vem sendo mantido e aperfeiçoado no CPTEC-INPE, pelo Grupo de Modelagem Atmosférica e Interfaces (GMAI – <http://meioambiente.cptec.inpe.br>).

Os campos de emissões gerados para os modelos CCATT-BRAMS e WRF/Chem para este experimento compreendem o período das 00UTC do dia 01/01/2009 às 00UTC do dia 13/01/2009. Foram utilizados os conjuntos de dados dos inventários de fontes antropogênicas RETRO

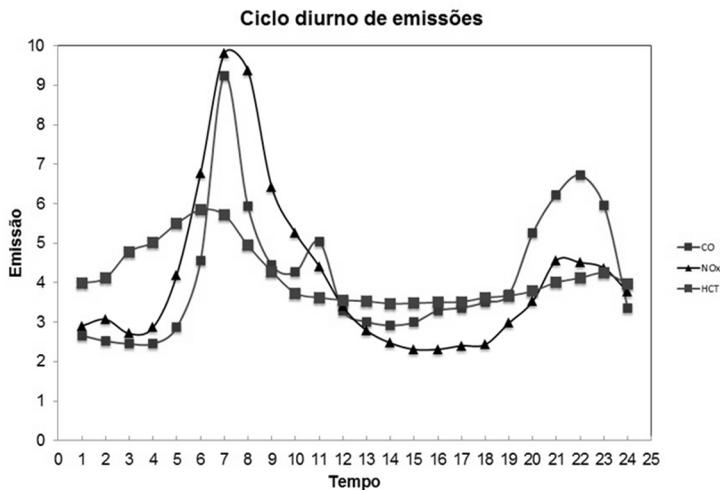
(*REanalysis of TROpospheric chemical composition over the past 40 years* – <http://www.ceip.at/>) e EDGAR (*Emission Database for Global Atmospheric Research* - OLIVIER e BERDOWSKI, 2001), além do inventário de emissões que insere na simulação a influência das emissões pelo uso de biocombustíveis e de queima de resíduos agrícolas (YEVICH e LOGAN, 2003). Foram acionados, ainda, os dispositivos de emissão de fontes biogênicas baseados no banco de dados gerados pelo modelo MEGAN (GUENTHER et al., 2006) e o modelo *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM - LONGO et al., 2010) que interpola dados de queima de biomassa e parâmetros de ascensão de pluma. O modelo 3BEM utiliza os dados de cobertura de terra do Programa Internacional da Geosfera-Biosfera (IGBP/INPE) e dados de densidade de carbono.

A inserção de fontes antrópicas móveis foi realizada usando as taxas de emissão de CO, NOX e HCT de cada um dos 33 municípios da RMPA. Essas informações foram agrupadas em um arquivo texto e, seguindo a metodologia de ALONSO (2011), foram lidas pelas rotinas do PREP-CHEM-SRC. Trabalhou-se também na especificação dos hidrocarbonetos totais (HCT) para RMPA (tabela 3), baseada no estudo feito por Cuchiara (2011).

**Tabela 3.** Porcentagem de emissão de hidrocarboneto particionado por espécie, para a cidade de Porto Alegre.  
**Fonte:** Cuchiara, 2011

| <b>Espécie</b> | <b>Porcentagem (%)</b> |
|----------------|------------------------|
| HC3            | 29,8                   |
| HC5            | 9,26                   |
| HC8            | 2,47                   |
| OL2            | 13,31                  |
| OLT            | 4,46                   |
| OLI            | 8,13                   |
| TOL            | 22,66                  |
| XYL            | 9,81                   |

O ciclo diurno das taxas de emissão da RMPA, calculado a partir de dados de médias horárias de concentração observadas pela FEPAM, foi implementado nas simulações dos dois modelos. Os ciclos diurnos de emissão de CO, HCT e NOX podem ser considerados conforme a Figura 7, em que é apresentado o peso de emissão de cada precursor no período de 24 horas. Observações das concentrações de poluentes na RMPA indicam que os picos de emissão dos precursores de ozônio ocorrem nas primeiras horas da manhã e no final da tarde (CUCHIARA, 2011).



**Figura 7.** Ciclo diurno de emissões na RMPA.

**Fonte:** CUCHIARA, 2011

## 5.6.2 Resultados

### *Simulação com o modelo CCATT-BRAMS*

Os resultados da análise estatística das variáveis meteorológicas são apresentados na tabela 4. Os índices estatísticos considerados são índice de concordância (d), correlação (R) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Os índices de concordância apresentaram resultados satisfatórios para as três variáveis consideradas. Já os índices de correlação estão em torno de 60 % para pressão, em torno de 40% para a velocidade do vento e 99% para a temperatura.

**Tabela 4.** Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo BRAMS.

**Fonte:** Souza, 2013

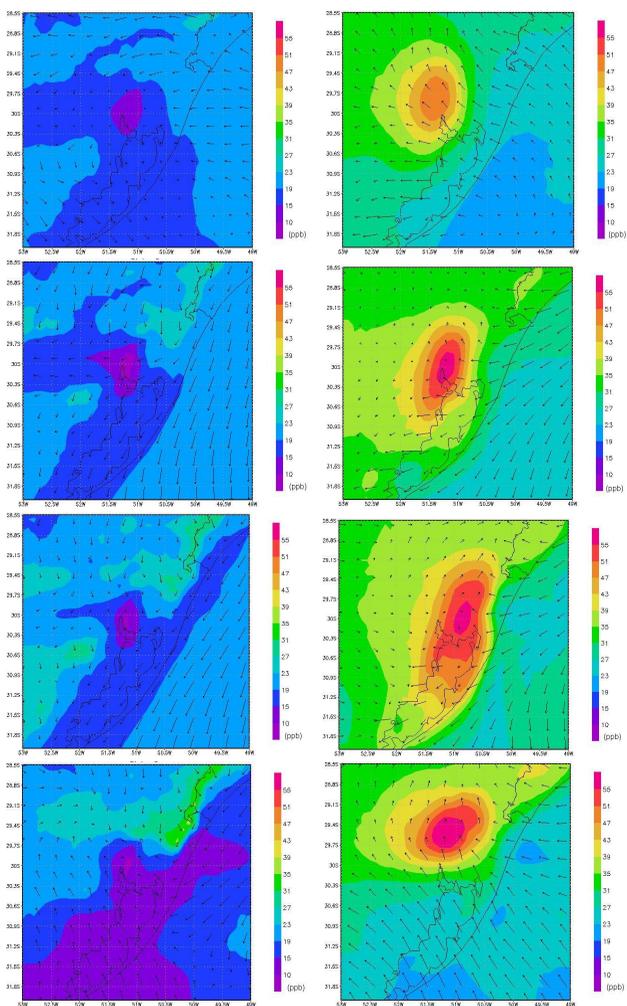
| Variável            | Estação | d    | R    | RMSE (mb)                |
|---------------------|---------|------|------|--------------------------|
| Pressão             | FEPAM   | 0,99 | 0,58 | 12,25                    |
|                     | INMET   | 0,99 | 0,60 | 6,21                     |
|                     |         |      |      | RMSE (°C)                |
| Temperatura         | FEPAM   | 0,99 | 0,93 | 2,25                     |
|                     | INMET   | 0,99 | 0,94 | 1,81                     |
|                     |         |      |      | RMSE (ms <sup>-1</sup> ) |
| Velocidade do vento | FEPAM   | 0,92 | 0,46 | 1,34                     |
|                     | INMET   | 0,86 | 0,42 | 1,73                     |

Para verificar como ocorreu o transporte de poluentes na RMPA, é realizada uma breve análise da circulação do vento na região. A área é caracterizada por consideráveis variações do uso e cobertura do solo, com centros urbano-industriais e, também, pela presença de grandes reservatórios de água. Naturalmente, o transporte de poluentes emitidos nesta região está sob a influência de circulações locais, como brisa marítima, brisa lacustre, escoamento de vale/montanha e circulação de ilha de calor urbano. As variações do tipo de superfície têm consequências diretas no campo de vento horizontal, gerando acelerações e estagnações do vento em algumas áreas (CUCHIARA, 2011).

As figuras 8 e 9 apresentam a sequência dos campos de razão de mistura em superfície de  $O_3$  no período de 05 a 12 de janeiro de 2009, as 06 e 15 HL. Os resultados mostram que os valores máximos de concentração ocorrem em torno das 15 HL, horário em que já aconteceu a concentração máxima diária de  $NO_X$  e  $CO_V$  e o pico diário de temperatura, e os valores mínimos ocorrem em torno das 06 HL, horário em que a concentração chega ao seu mínimo por não haver radiação disponível para fotólise.

Observa-se que nos dias 05, 06, 08 e 09, durante o dia, a pluma de  $O_3$  é transportada de leste para oeste. Nota-se, também, que no dia 08 o vento transportou a pluma de  $O_3$  para fora da área da RMPA. Já no dia 07 as 15 HL, a pluma de  $O_3$  permanece estagnada sobre a RMPA, devido à convergência do campo de vento gerada pelas brisas e ventos de oeste. Esses resultados corroboram as simulações realizadas por Cuchiara (2011), com o modelo WRF/Chem.

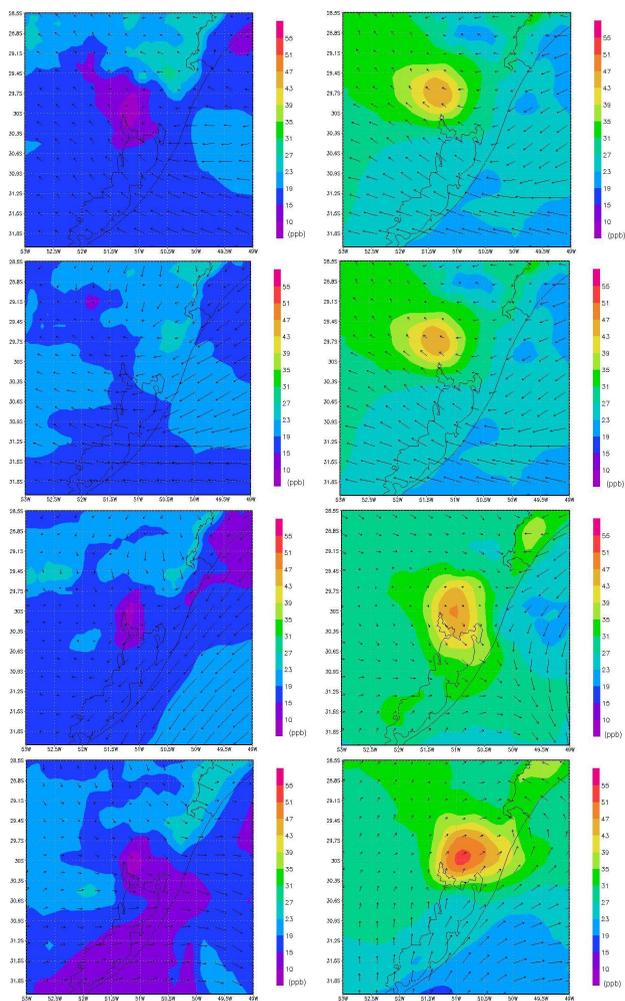
## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 8.** Razão de mistura de O<sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 03 e 15 HL nos dias 05 (linha 1),06 (linha 2), 07(linha 3) e 08(linha 4) de janeiro de 2009.

**Fonte:** Souza, 2013

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 9.** Razão de mistura de O<sub>3</sub> simulada pelo modelo CCATT-BRAMS as 03 e 15 HL nos dias 09 (linha 1),10 (linha 2),11(linha 3) e 12(linha 4) de janeiro de 2009.

**Fonte:** Souza, 2013

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Na tabela 5 é apresentada a análise estatística das concentrações de O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC simuladas pelo CCATT-BRAMS nas duas estações de monitoramento. Consta-se que, segundo a estatística, a simulação do ozônio troposférico obteve bons resultados para o índice de concordância, ficando de 0,91 para Esteio e de 0,80 para Porto Alegre. E para simulação de seus precursores, os índices de concordância (d) ficaram todos acima de 0,7, caracterizando que os valores previstos pelo modelo concordam razoavelmente com os observados.

**Tabela 5.** Análise estatística das concentrações de O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC simuladas pelo CCATT-BRAMS, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).

**Fonte:** Souza, 2013

| Poluente        | Período | d      |      | R      |      | RMSE (ppb) |        |
|-----------------|---------|--------|------|--------|------|------------|--------|
|                 |         | Esteio | PA   | Esteio | PA   | Esteio     | PA     |
| O <sub>3</sub>  | 7 dias  | 0,91   | 0,80 | 0,52   | 0,52 | 13,71      | 16,47  |
|                 | 4 dias  | 0,89   | 0,77 | 0,67   | 0,59 | 15,56      | 18,16  |
| CO              | 7 dias  | 0,88   | 0,73 | 0,07   | 0,32 | 99,94      | 306,03 |
|                 | 4 dias  | 0,87   | 0,69 | 0,21   | 0,39 | 105,85     | 322,47 |
| NO <sub>x</sub> | 7 dias  | 0,85   | -    | 0,19   | -    | 5,19       | -      |

## Meteorologia em tópicos – volume 5

|    |        |      |          |      |          |          |       |
|----|--------|------|----------|------|----------|----------|-------|
|    | 4 dias | 0,87 | -        | 0,41 | -        | 4,41     | -     |
| HC | 7 dias | -    | 0,7<br>0 | -    | -        | -        | 11,58 |
|    | 4 dias | -    | 0,7<br>6 | -    | 0,0<br>6 | -        | 11,25 |
|    |        |      |          |      | -        | 0,1<br>8 |       |

### *Simulação com o modelo WRF/Chem*

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação dos campos meteorológicos (pressão à superfície, temperatura e velocidade do vento), utilizando o modelo WRF. As simulações são comparadas com dados observados pelas duas estações de superfície instaladas pela FEPAM nos municípios de Esteio e Porto Alegre.

Os resultados da análise estatística para as variáveis meteorológicas são apresentados na tabela 6. Os índices estatísticos utilizados são: índice de concordância (d), correlação (R) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). O modelo WRF obteve altos índices de concordância e correlação para pressão e temperatura nas duas localidades. Já para a velocidade do vento, as simulações geraram valores de índice de concordância consideravelmente altos, mas com correlações baixas. Observa-se, também, valores relativamente baixos de RMSE, indicando que o modelo WRF simula bem a magnitude do campo de vento. Como exemplo, destaca-se a velocidade do vento simulada para Porto Alegre,

onde a diferença em relação à velocidade observada é de apenas 2,08 m/s. Para Esteio esse valor diminui para 1,49 m/s. Destaca-se, ainda, que os índices para os valores simulados de magnitude do vento para Porto Alegre e Esteio são melhores quando comparados aos gerados no trabalho de Cuchiara (2011), utilizando uma versão anterior do modelo WRF.

**Tabela 6.** Análise estatística das variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo WRF/CHEM.

**Fonte:** Souza, 2013

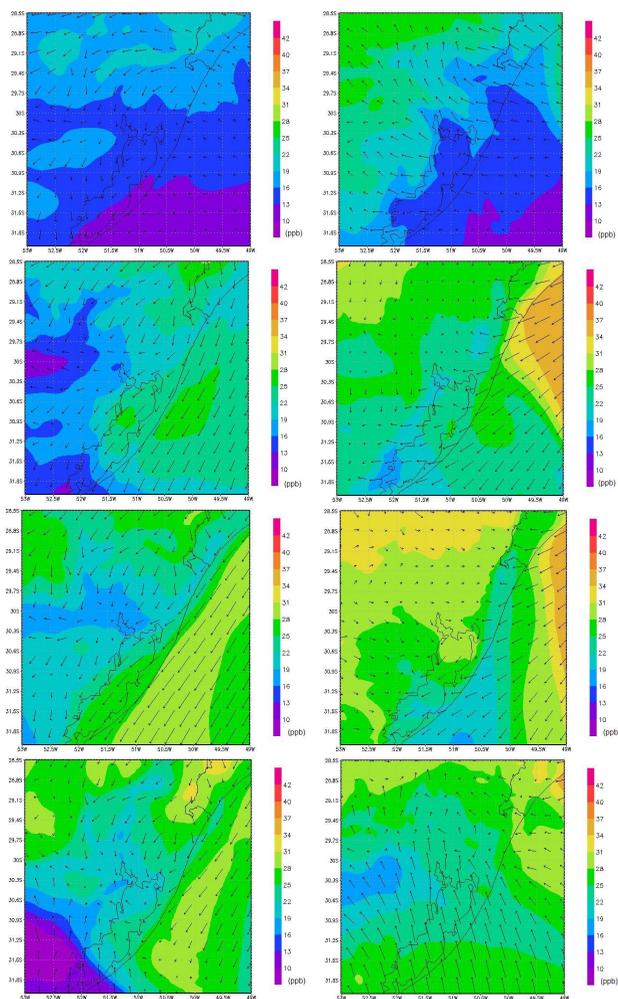
| Variável            | Estação | d    | R    | RMSE<br>(mb)                |
|---------------------|---------|------|------|-----------------------------|
| Pressão             | FEPAM   | 0,99 | 0,93 | 6,31                        |
|                     | INMET   | 0,99 | 0,95 | 0,81                        |
|                     |         |      |      | RMSE<br>(°C)                |
| Temperatura         | FEPAM   | 0,99 | 0,93 | 1,67                        |
|                     | INMET   | 0,99 | 0,93 | 1,56                        |
|                     |         |      |      | RMSE<br>(ms <sup>-1</sup> ) |
| Velocidade do vento | FEPAM   | 0,93 | 0,47 | 1,49                        |
|                     | INMET   | 0,84 | 0,53 | 2,08                        |

Nas figuras 10 e 11 são mostrados os campos de razão de mistura de O<sub>3</sub>, as 03 HL e 15 HL. De um modo geral, observam-se diferenças entre os campos de razão de mistura

no dia e na noite, mas não são diferenças consideráveis. Nota-se que mínimos e máximos não apresentam grande diferenças, como deve acontecer para as condições meteorológicas do período selecionado.

Na tabela 7 está organizada a análise estatística das concentrações de O<sub>3</sub>, CO, NOX e HC simuladas pelo WRF/Chem, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA). Todos os poluentes considerados obtiveram bons resultados. Salienta-se que para o ozônio, mesmo que o modelo não tenha conseguido demonstrar uma amplitude razoável entre máximos e mínimos, os índices de concordância foram muito bons, sendo de 0,81 para Porto Alegre e 0,93 para Esteio. Dentre os três precursores do O<sub>3</sub> estudados, o HC foi o que obteve melhores resultados para o índice de concordância, ou seja, 0,91.

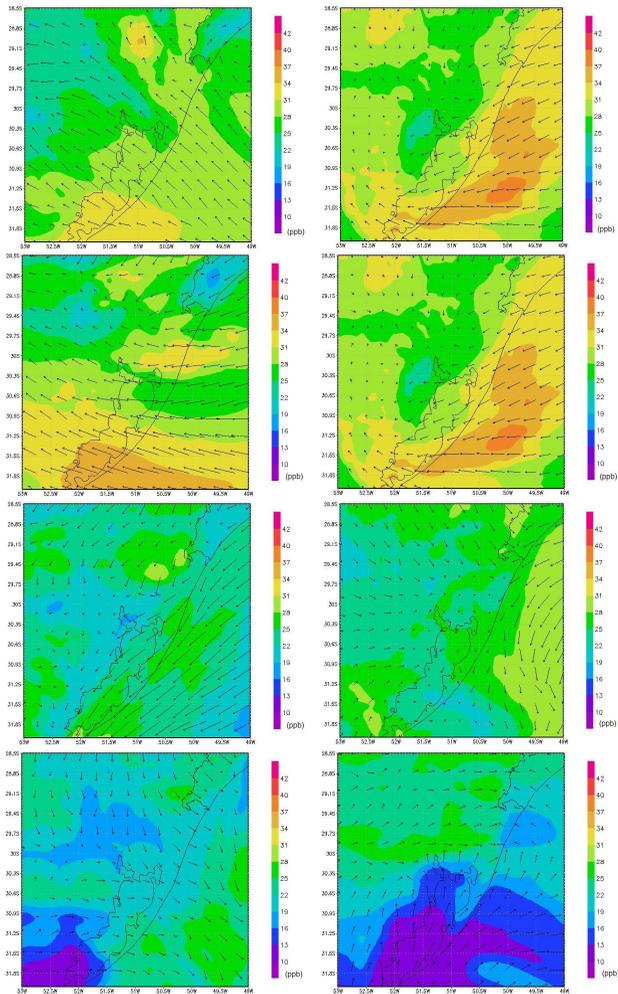
## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 10.** Razão de mistura de O<sub>3</sub> simulada pelo modelo WRF/CHEM as 03 e 15 HL nos dias 05 (linha 1),06 (linha 2),07(linha 3) e 08(linha 4) de janeiro de 2009.

**Fonte:** Souza, 2013

## Meteorologia em tópicos – volume 5



**Figura 11.** Razão de mistura de  $O_3$  simulada pelo modelo WRF/CHEM as 03 e 15 HL nos dias 09 (linha 1),10 (linha 2),11(linha 3) e 12(linha 4) de janeiro de 2009.

**Fonte:** Souza, 2013

**Tabela 7.** Análise estatística das concentrações de O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC simuladas pelo WRF/Chem, para as estações de Esteio e Porto Alegre (PA).

**Fonte:** Souza, 2013

| Poluente        | Dias de simulação | d      |      | R      |      | RMSE (ppb) |        |
|-----------------|-------------------|--------|------|--------|------|------------|--------|
|                 |                   | Esteio | PA   | Esteio | PA   | Esteio     | PA     |
| O <sub>3</sub>  | 7 dias            | 0,93   | 0,81 | 0,28   | 0,19 | 10,99      | 14,88  |
|                 | 4 dias            | 0,91   | 0,82 | 0,54   | 0,48 | 10,98      | 12,41  |
| CO              | 7 dias            | 0,87   | 0,70 | 0,01   | 0,37 | 97,51      | 317,83 |
|                 | 4 dias            | 0,87   | 0,67 | 0,11   | 0,37 | 108,31     | 333,75 |
| NO <sub>x</sub> | 7 dias            | 0,83   | -    | 0,26   | -    | 6,81       | -      |
|                 | 4 dias            | 0,85   | -    | 0,34   | -    | 6,15       | -      |
| HC              | 7 dias            | -      | 0,92 | -      | 0,36 | -          | 3,78   |
|                 | 4 dias            | -      | 0,95 | -      | 0,36 | -          | 4,22   |

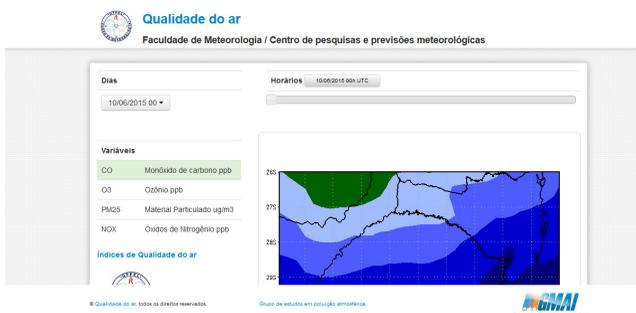
## 5.7 Modelagem operacional para o estado do Rio Grande do Sul

Em parceria com o Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que possui uma ferramenta operacional de previsão da qualidade do ar para a América do Sul (<http://meioambiente.cptec.inpe.br>), o Centro de Pesquisa e Previsões Meteorológicas Prof. Darci Pegoraro Casarin, vinculado à Faculdade de Meteorologia, da Universidade

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Federal de Pelotas está testando a aplicação regional desse sistema (<http://ccatt.ufpel.edu.br>).

A operação está em fase de testes, consiste no prognóstico em 72 horas de monóxido de Carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOX), ozônio (O<sub>3</sub>) e Material Particulados (MP) para o estado do Rio Grande do Sul, num domínio com 30 km de resolução espacial.



**Figura 12.** Layout do beta de testes para a operacionalização do CCATT-BRAMS no Rio Grande do Sul (<http://ccatt.ufpel.edu.br>).

### 5.8 Conclusões

O presente capítulo é uma compilação dos conceitos básicos envolvidos na aplicação da modelagem numérica no estudo da dispersão e química de poluentes em áreas urbanas na escala local e regional. Procurou-se estender o estudo didático com aplicações práticas voltadas ao diagnóstico e

prognóstico da qualidade do ar no estado do Rio Grande do Sul.

Um aspecto fundamental a ser considerado em pesquisas atmosféricas envolvendo a dispersão de poluentes é a preservação da saúde humana, ou seja, o desenvolvimento do conhecimento com vistas à aplicação em benefício da saúde e bem-estar do ser humano. Considerando o exposto, pode-se afirmar que o uso de uma ferramenta de simulação de dispersão de poluentes em meio atmosférico é bastante útil na medida em que permite fazer simulações e previsões das concentrações de um determinado poluente, podendo oferecer à população a oportunidade de evitar exposições a concentrações elevadas; às empresas, condições de prever investimentos em equipamentos que permitam reduzir emissões na atmosfera; e aos órgãos públicos, a possibilidade de realizar questionamentos acerca de novos empreendimentos, cujos efluentes atmosféricos contribuam para a degradação das condições de qualidade do ar.

## 5.9 Referências bibliográficas

ABELSOHN, A.; STIED, D.; SANBORN, M.D.; WEIR, E. Identifying and managing adverse environmental health effects: 2. Outdoor air pollution. **Canadian Medical Association Journal**, v.166, p.1.161-1.167, 2002.

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M. e SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking

rain clouds over the Amazon. **Science**, v. 303, p. 1337-1342, 2004.

ALONSO, M. F., **Previsão do tempo químico para a América do Sul: Impacto relativo das emissões urbanas nas escalas local e regional**. 2011. 188p.(Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

BERKOWICZ, R., WINTHER, M., KETZEL, M.. Traffic pollution modelling and emission data. **Environmental Modelling & Software.**, v. 21, p. 454–460, 2006.

CARTER, W.P.L. A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds. **Atmospheric Environment**, v. 24A, p. 481–518, 1990.

CRASSIER, V.; SYHRE, K.; TULET, P.; ROSSET, R. Development of a reduced chemical scheme for use in mesoscale meteorological models. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 2633–2644, 2000.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC/INPE). Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso em: 13 de novembro de 2016.

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. RAMS 2001: Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, Issue 1-4, p. 5-29, 2003.

CETESB 2006 - **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2005**. São Paulo. Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acessado em 05 de setembro de 2016.

CUCHIARA, G.C.; **Modelagem da poluição do ar por reações fotoquímicas associada à fontes veiculares na região metropolitana de Porto Alegre**. Dissertação, 127 p. (Mestrado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia – Universidade Federal de Pelotas, 2011.

DALLAROSA, J.B.; TEIXEIRA, E.C.; ALVES, R.C.M. Application of Numerical Models in the Formation of Ozone and its Precursors in Areas of Influence of Coal-Fired Power Station – Brazil. **Water Air Soil Pollution.**, v. 178, p. 385-399. 2007.

DALVI, M.; GRELL, G.; PECKMAN, S. **Development of an offline WRF/Chemistry model**. In: WRF USERS WORKSHOP Abstracts, 2007. Disponível em: <[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/8-3\\_Dalvi.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/8-3_Dalvi.pdf)> Acesso em: 25 de novembro de 2015

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO (DETRAN/RS). Disponível em: <http://www.detran.rs.gov.br>. Acesso em: 11 de outubro de 2016.

EPA. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors**, volume I, 5ª edição, AP-42, 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER – RS (FEPAM) – Fundação

Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - **1º Inventário de emissões atmosféricas das fontes móveis do Estado do Rio Grande do Sul** – Ano Base - 2010.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M.; SILVA DIAS, P.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G.; RECUERO, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, n. 1-2, p. 135-167, 2005.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; CHATFIELD, R.; LATHAM, D.; SILVA DIAS, M. A. F.; ANDREAE, M. O. ; PRINS, E.; SANTOS J. C.; GIELOW R.; CARVALHO J. A. JR. Including the sub-grid scale plume rise of vegetation fires in low resolution atmospheric transport models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.7,p.3385-3398, 2007.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n.2, p. 188-207, 2009.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ALONSO, M. F.; PIRRE, M., MARÉCAL, V., GRELL, G.; STOCKLER, R.; DA FONSECA, R.M.; SÁNCHEZ GÁCITA, M. A pre-processor of trace gases and aerosols emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 419-433, doi:10.5194/gmd-4-419- 2011, 2011.

GERY M. W.; WHITTEN G. Z.; KILLUS J. P. **Development and Testing of the CBM-IV For Urban and Regional Modeling**. EPA-600/ 3-88-012 report, Washington, 1988.

GILLANI, N.V., PLEIM, J.E. Subgrid scale features of anthropogenic emissions of NO<sub>x</sub> and VOC in the context of regional eulerian models. **Atmospheric Environment**, v. 30, p. 2043–2059, 1996.

GRELL, G. A.; PECKMANN, S.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S. A.; FROST, G.; SKAMAROCK, W. C.; EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 6957–6975, 2005.

GROSS, A.; STOCKWELL W.R. Comparison of the EMEP, RADM2 and RACM Mechanisms. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 44, n. 2, p. 151-170, 2003.

GUENTHER, A.; KARL, T.; HARLEY, P.; WIEDINMER, C.; PALMER, P. I.; GERON, C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 3181–3210, doi:10.5194/acp-6-3181-2006.

HOROWITZ, L. W.; WALTERS, S.; MAUZERALL, D. L.; EMMONS, L. K.; RASCH, P. J.; GRANIER, C.; TIE, X.; LAMARQUE, J. F.; SCHULTZ, M. G.; TYNDALL, G. S.; ORLANDO, J.J.; BRASSEUR G. P. A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: Description and evaluation of MOZART, version 2. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, D24, ACH 16:1 - 18, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas Regionais do Brasil 2010**, <Avaliado em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasregionais/2010/default.shtm> - acessado em 27 de novembro de 2015.

JACOB, D.J. Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 2131-2159, 2000.

JENKIN, M.E.; CLEMITSHAW, K.C. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 2499-2527, 2000.

KNOWLTON, K.; ROSENTHAL, J. E.; HOGREFE, Ch.; LYNN, B.; GAFFIN, S.; GOLDBERG, R.; ROSENZBEIG, C.; CIVEROLO, K.; KU, J.-Y.; KINNEY, P. L. Assessing Ozone-Related Health Impacts under a Changing Climate. **Environment Health Perspectives**, v. 112, n.15, p. 1557–1563, 2004.

KUHN, M. ; BUILTJES, P.J.H. ; POPPE, D. ; SIMPSON, D. ; STOCKWELL, W.R.; ANDERSON-SKOLD, Y. ; BAART, A. ; DAS M. ; FIEDLER, F. ; HOV, O. ; KIRCHNER, F. ; MAKAR, P.A. ; MILFORD, J.B. ; ROEMER, M.G.M. ; RUHNKE, R. ; STRAND, A. ; VOGEL, B. ;VOGEL, H. Intercomparison of the gasphase chemistry in several chemistry and transport models. **Atmospheric Environment**, v. 32, p. 693-709, 1998.

LAWRENCE, M.; JÖCKEL, G., P. J.; VON KUHLMANN R. What does the global mean OH concentration tell us? **Atmospheric Chemistry and Physics**, v, 1, p. 37-49, 2001.

LIN, C. A.; Pereira, L. A. A.; Braga, A. L. F.; Conceição, G. M. S.; Kishi, H. S.; Milani, R. Association Between Air Pollution and Ischemic Cardiovascular Emergency Room Visits. **Environmental Research**; v. 92, p. 53-63, 2003.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATTBRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 8571–8595, 2010.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROSARIO, N. E.; MOREIRA, D. S.; GACITA, M. S.; ARTETA, J.; FONSECA, R.; STOCKLER, R.; KATSURAYAMA, D. M.; FAZENDA, A.; BELA, M. The chemistry CATT-BRAMS Y (CCATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1173–1222, 2013.

MELLOR G.L. e YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.20: 851-875, 1982.

OLIVIER, J.G.J.; BERDOWSKI, J.J.M. **Global emissions sources and sinks**. In: Berdowski, J., Guicherit, R. and B.J. Heij (eds.) "The Climate System", p. 33-78. A.A. Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands. ISBN 90 5809 255 0, 2001.

PIELKE, R.A.; COTTON, W.R.; WALKO, R.L.; TREMBACK, C.J. ; LYONS, W.A.; GRASSO, L.D. ; NICHOLLS, M.E. ; MORAN, M.D.; WESLEY, D.A. ; LEE T.J. ; COPELAND, J.H. A comprehensive meteorological modeling system –RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p. 69-91, 1992.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Rev. Saúde Pública** [online]. v.42, n.2 p. 370-376, 2008.

SALDIVA, P. H. N; LICHTENFELS, A. J. F. C; PAIVA, P. S. O; BARONE, I. A; MARTINS, M.A; MASSAD, E; PEREIRA, J. C. R; XAVIER, V.P; SINGER, J. M, BOHM, G. M. Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminary report. **Environment Research**, v. 65, p. 218- 225, 1994.

SALDIVA, P. H. N; POPE, C. A; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D. W.; LICHTENFELS, A. J; SALGE, J. M.; BARONE, I.; BOHM, G. M. Air pollution and mortality in elderly People: a time-series study in São Paulo, Brazil. **Archives of Environmental & Occupational Health**, v. 50,n. 2, p. 159-163, 1995.

SIMPSON, D.; OLENDRZYNSKI, K.; SEMB, A.; STØREN, E.; UNGER, S. **Photochemical oxidant modelling in Europe: multi-annual modelling and source-receptor relationships**. Oslo, Noruega: Norwegian Meteorological Institute, 1997.

SILLMAN, S., J.; LOGAN, A.; WOFSY, S. C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone

episodes. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 1837–1851, 1990.

SILLMAN, S. The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. Millennial Review series. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 12, p. 1821-1845, 1999.

SILLMAN, S.; HE, D. Some theoretical results concerning O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC chemistry and NO<sub>x</sub>-VOC indicators. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D22, p. 26.1 – 26.13, 2002.

SILLMAN, S. Tropospheric ozone and photochemical smog. in B. Sherwood Lollar, ed., Treatise on Geochemistry, Vol. 9: **Environmental Geochemistry**, Ch. 11, Elsevier, 2003.

SOUZA, L. P. **Estudo do impacto das emissões de poluentes na Região Metropolitana de Porto Alegre** – RS. 2013, 156 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Faculdade de Meteorologia, UFPel, Pelotas.

STOCKWELL, W. R. A homogeneous gas phase mechanism for use in a regional acid deposition model. **Atmospheric Environment**, v. 20, p. 1615–1632, 1986.

STOCKWELL, W. R.; MIDDLETON, P.; CHANG, J. S.; TANG, X. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16343–16367, 1990.

STOCKWELL, W. R.; KIRCHNER, F.; KUHN, M.; SEEFELD, S. A. New mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D22, p. 25847–25879, 1997.

TEIXEIRA, E. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de porto alegre, rio grande do sul. **Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 244-248, 2008.

TIE, X.; BRASSEUR, G.; YING, Z. Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City: application of the WRF/Chem model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 8983–8995, 2010.

UNO, I.; CARMICHAEL, G. R.; STREETS, D. G.; TANG, Y.; YIENGER, J. J.; SATAKE, S.; WANG, Z.; WOO, JUNG-HUN; GUTTIKUNDA, S.; UEMATSU, M.; MATSUMOTO, K.; TANIMOTO, H.; YOSHIOKA, K.; IIDA, T. Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D23, p. 8668, 2003.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Reducing Global Health Risks Through Mitigation of Short-Lived Climate Pollutants**. Scoping Report For Policy-makers, ISBN 978 92 4 156508 0, Geneva, 2015.

WRF ARW Online Tutorial. Disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/index.html>. Acesso em: 20 de junho de 2013.

Meteorologia em tópicos – volume 5

YEVICH, R.; LOGAN, J. A. An assesment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. **Global Biogeochemistry Cycles**, v. 17, n. 4, p. 1095, doi:10.1029/2002GB001952, 2003.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

## **Sobre os autores**

### **Capítulo 1**

**Matheus José Arruda Lyra** – Possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (2016). Atualmente é bolsista de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas. Publicou 4 artigos em congressos. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia Sinótica. Atua principalmente no tema: previsão de tempo em curto prazo.

**Natalia Fedorova** - Doutora em meteorologia, formada pela Universidade Federal de Moscou, Rússia e doutorado pelo Centro Hidrometeorológico da Rússia, Moscou. Por mais de 20 anos foi pesquisadora Sênior do Centro Hidrometeorológico da Rússia e professora da Universidade de Moscou para chefes dos departamentos de meteorologia da Rússia. Desde 1995 foi professora da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e desde 2001 da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Publicou 8 livros, 10 capítulos de livros, 61 artigos em revistas e 162 em congressos; tem patente de invenção. Orientou mais de 100 trabalhos, incluindo 26 teses de mestrado e uma de doutorado. Atua nas áreas de meteorologia sinótica, previsão de tempo em curto prazo e meteorologia sinótica por satélite.

### **Capítulo 2**

**Vladimir Levit** - doutor em física. Foi formado na

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Universidade Federal da Ural da Rússia e fez doutorado no Instituto de Física dos Metais de Academia de Ciências da Rússia. Por muitos anos trabalhou no Centro principal da Energia Nuclear da Rússia “Instituto Kurchatov”, em Moscou, na área da segurança dos Reatores Nucleares. Em seguida, trabalhou na Universidade da Califórnia, EUA, e no Instituto de Segurança Nuclear de Rossendorf, Alemanha. Em 1995, foi professor da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) e em 2002 migrou para a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), onde atua na profissão até hoje. Publicou 2 livros, 14 capítulos nos livros, 43 artigos em revistas e 121 nos congressos. Orientou mais de 60 trabalhos, incluindo 12 teses de mestrado.

**Lucas Carvalho Vieira Cavalcante** - mestrando em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Bacharel em Meteorologia pela mesma universidade, onde apresentou Trabalho de Conclusão de Curso com ênfase em Termodinâmica. Durante a graduação, alcançou pesquisas de Iniciação Científica por 3 anos (2013 à 2015), em sinótica, e com isso, foi excelência acadêmica em 2014. Possui publicações em livros, revistas e congressos.

### Capítulo 3

**Maria Luciene Dias de Melo** - possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal da Paraíba (2001), Mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande (2003) e Doutorado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007). Atualmente é professora da Universidade Federal de Alagoas e desenvolve pesquisa com ênfase em Climatologia estatística, atuando principalmente

nos seguintes temas: modelagem climática e de paleoclimas, climatologia estatística e índice de vegetação por diferença normalizada.

#### Capítulo 4

**Ericka Voss Chagas Mariano** - Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestrado em Meteorologia (UFAL) e doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Atua na área de geociências, com ênfase em poluição atmosférica. Atualmente é professora da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

**Glauber Lopes Mariano** - Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e graduação em Sistemas de Informação pelo Centro Federal de Ensino Tecnológico do estado de Alagoas (CEFET/AL). Mestrado em Meteorologia (UFAL) e doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Atua na área de geociências, com ênfase em poluição da atmosfera e sensoriamento remoto da atmosfera. Atualmente Professor da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) com orientações de iniciação científica e mestrado nas áreas de sensoriamento remoto, poluição atmosférica e climatologia.

**Marcos Antônio Lima Moura** - Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (1984), Estudos de Aprofundamento em Meteorologia no Instituto de Meteorologia da Universidade de Hannover (Alemanha) com Especialização em Recursos Hídricos pela Universidade de Hannover (Alemanha) entre 1986 e 1989, Mestrado em

Agronomia (Energia na Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1992) e Doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2000). Atualmente é Professor Associado I do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Micrometeorologia de Ecossistemas Ameaçados (Mata Atlântica e Amazônia), mas com foco em Mudanças Climáticas e Radiação Solar, atuando principalmente nos seguintes temas: Ambientes Estuarinos, Mata Atlântica, Floresta Amazônica.

### Capítulo 5

**Marcelo Felix Alonso** - Possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas (2003), mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas (2006) e doutorado em meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia, atuando principalmente na área de modelagem atmosférica. Atualmente é professor da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas.

**Jonas da Costa Carvalho** - possui graduação em meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), mestrado em meteorologia pela Universidade de São Paulo e doutorado em meteorologia pela Universidade de São Paulo e Istituto di Cosmo Geofisica, Turin, Itália. Foi coordenador do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia e Diretor da Faculdade de Meteorologia da UFPel. Tem experiência na

## Meteorologia em tópicos – volume 5

área de Geociências, com ênfase em Meteorologia, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem da dispersão de poluentes, modelagem de mesoescala, modelos de simulação dos grandes turbilhões e solução de equações diferenciais estocásticas.

**Ludmila Pochman de Souza** - Atual doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Possui mestrado em ciências atmosféricas pelo Programa de Pós-Graduação em meteorologia da Universidade Federal de Pelotas (2013). Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas (2011). Busca experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia aperfeiçoando-se principalmente nos seguintes temas: monitoramento ambiental, modelagem atmosférica, CCATT-BRAMS, WRF/Chem, WRF/Hydro, eventos extremos, dispersão de poluentes e ozônio troposférico.

**Gustavo Copstein Cuchiara** - Possui graduação (2008) e mestrado (2011) em meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas e doutorado em ciências atmosféricas - University of Houston (2015). Recém-doutor atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem atmosférica, WRF/chem, modelagem qualidade do ar e ozônio troposférico.

## Meteorologia em tópicos – volume 5

Meteorologia em tópicos – volume 5

## Créditos / Expediente

**Capa:** Renata Voss

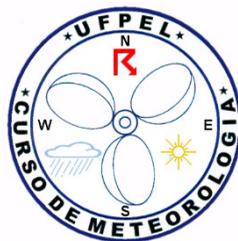
**Fotografia da capa:** Renata Voss

**Editoração e diagramação:** Glauber Lopes Mariano e  
André Becker Nunes

**Editora:** DR LTDA



**Instituto de Ciências  
Atmosféricas - ICAT  
Universidade Federal da  
Alagoas - UFAL**



**Faculdade de Meteorologia  
- FMET  
Universidade Federal de  
Pelotas - UFPEL**

A série de livros "Meteorologia em tópicos", tendo como objetivo o aprofundamento de assuntos vistos na graduação em meteorologia e usualmente pouco explorados em língua portuguesa, nesse volume 5 aborda temas das áreas de Meteorologia Sinótica, fontes de energias, paleoclimatologia, química da atmosfera e modelagem numérica da qualidade do ar escritos por professores da Universidade Federal de Alagoas e Universidade Federal de Pelotas com a colaboração de profissionais de outras instituições.

