

ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA DE BLOQUEIO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A POLUIÇÃO DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Andréa D. de Almeida Castanho⁽¹⁾, Maria Assunção F. Silva Dias⁽²⁾, Ricardo Camargo⁽²⁾, Pedro Silva Dias⁽²⁾, Paulo Artaxo⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, Travessa R, 187, CEP 05508-900, São Paulo, Brasil.
E-mail: castanho@if.usp.br

⁽²⁾ Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, Brasil

ABSTRACT

Varias são as ocasiões onde a concentração de material particulado inalável na cidade de São Paulo ultrapassa o padrão de qualidade do ar durante o período de inverno. Muitas vezes as altas concentrações de poluentes chegam a permanecer por dias seguidos. A permanência por vários dias destes poluentes na atmosfera é devido às condições meteorológicas estáveis da atmosfera que não propicia a sua dispersão. Em um episódio destes observado em São Paulo em agosto de 2000 procurou-se identificar qual o principal mecanismo sinótico que propiciou as condições observadas. Realizando-se a análise sinótica verificou-se que neste período ocorreu o desenvolvimento de um sistema de bloqueio no Oceano Pacífico, indicando uma possível causa para a manutenção da Alta próxima ao continente Sul Americano propiciando as condições desfavoráveis à dispersão dos poluentes na RMSP. Este trabalho identifica e caracteriza o sistema de bloqueio no Pacífico Sul no período citado e o relaciona com as condições sinóticas encontradas nas demais regiões e conseqüentemente com a estabilidade termodinâmica gerada na região sudeste do Brasil o que propiciou as elevadas concentrações de poluentes no período.

INTRODUÇÃO

Durante o período de inverno as concentrações de material particulado inalável freqüentemente superam o padrão de qualidade do ar de 24 horas ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Isto ocorre devido aos elevados níveis de emissão de poluentes na região, por veículos, ressuspensão de solo e indústrias durante todo o ano (Castanho e Artaxo, 2001). Porém no período de inverno em particular a situação se agrava devido às condições meteorológicas desfavoráveis a dispersão destes poluentes (Andrade et al, 94).

O objetivo deste trabalho é explorar a influência dos sistemas de bloqueios, que ocorrem no Oceano Pacífico Sul na costa oeste da América do Sul, sobre as condições sinóticas da região metropolitana de São Paulo. As condições sinóticas sobre a região definem situações meteorológicas favoráveis ou não a dispersão de poluentes que influenciam conseqüentemente a qualidade do ar atmosférico. Desta forma uma previsão ou mesmo indicação de início de formação de sistemas de bloqueios no Pacífico Sul é uma condição determinante para previsão de episódios de elevadas concentrações de poluentes na região urbanizada de São Paulo.

A circulação atmosférica em latitudes médias, segundo Willet (1949) (Nascimento, 98), segue basicamente dois tipos de padrões. No primeiro padrão prevalece o escoamento zonal. No segundo, o escoamento meridional é mais intenso agindo como obstrução (bloqueio) aos deslocamentos dos transientes atmosféricos que tenderiam a fluir zonalmente. O sistema sinótico que caracteriza o bloqueio é uma anomalia de alta pressão persistente em altos níveis em latitudes mais elevadas que o normal (que seria o cinturão de anticlones em torno de 30° de Latitude). A presença deste anticiclone faz com que o escoamento zonal de oeste de altas latitudes desvie do sistema de alta pressão gerando uma circulação na direção meridional sentido pólo (tipo ômega invertido no Hemisfério Sul), ou ainda gerando no lado equatorial da alta um sistema de baixa pressão formando um padrão do tipo dipolo nos campos de geopotencial em 500mb (Nascimento,98).

Os bloqueios atmosféricos no HS são encontrados com maior freqüência no Oceano Pacífico a sudeste da Austrália e Nova Zelândia com magnitudes comparáveis as do HN. Na seqüência os setores que apresentam ocorrências do fenômeno são o Atlântico Sul a sudeste da costa da América do Sul, e o Oceano Índico a sudeste da costa da África. Mais recentemente foi identificado como região propícia a região sudeste do Oceano Pacífico (a oeste da costa da América do Sul), que representa o alvo principal deste trabalho. Os bloqueios do Oceano Pacífico e Atlântico apresentam uma dependência sazonal marcante, onde período de máximo de ocorrência é o final do inverno e início da primavera (HS) e máximo secundário entre os meses de abril e maio (Casarin, 83; Fuentes, 96).

XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002

Existem alguns critérios qualitativos para identificação do fenômeno de bloqueio sugerido por alguns autores como relacionado por Nascimento, 98. Rex (1950) determina um critério de identificação de bloqueios do Hemisfério Norte. Neste trabalho será utilizado o critério de Van Lon (1956) que se baseou especificamente nas características de bloqueios do Hemisfério Sul dado por:

- O deslocamento do sistema de bloqueio deve ser menor do que 25° de longitude e 45°S durante o período de bloqueio;
- O Centro da alta deve estar pelo menos 10° ao Sul da posição normal do cinturão subtropical de alta pressão;
- bloqueio deve durar pelo menos 6 dias.

Existem ainda métodos mais quantitativos para se identificar a presença de bloqueios que consiste de indicadores que verificam a variação anômala de algumas propriedades da atmosfera, entre as latitudes em que ocorrem os bloqueios (Nascimento, 98). O primeiro índice zonal a ser descrito utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Lejeñas (1984) para o Hemisfério Sul. Este índice identifica a variação da altura geopotencial em 500 mb entre as latitudes de 35° e 50° S em uma dada longitude λ :

$$I ZP (\lambda) = Z_{35^{\circ}S}(\lambda) - Z_{50^{\circ}S}(\lambda) \quad \text{onde} \quad I ZP (\lambda) < \text{zero}$$

A condição para que o fenômeno seja classificado como um sistema de bloqueio é a de que este índice seja menor do que zero, ou seja haja um aumento da altura geopotencial com a latitude, durante um período de pelo menos seis dias sobre uma região média de aproximadamente 30° meridional.

O segundo critério utilizado neste trabalho foi o desenvolvido por Kayano e Kousky (1990), (Nascimento, 98). Desenvolveram dois índices zonais para o HS, apropriado para regiões oceânicas, que é caso deste trabalho. O primeiro índice verifica a variação da pressão ao nível do mar (PNM) entre as latitudes de 35° e 55° S em uma dada longitude λ :

$$I PNM (\lambda) = PNM_{35^{\circ}S}(\lambda) - PNM_{55^{\circ}S}(\lambda) \quad \text{onde} \quad I PNM (\lambda) < 10 \text{ mb}$$

O segundo índice utilizado neste critério verifica uma variabilidade média entre latitudes da velocidade do vento zonal, dado pela relação:

$$I u(\lambda) = 0,5 * \{u_{35^{\circ}S}(\lambda) + u_{30^{\circ}S}(\lambda) + u_{55^{\circ}S}(\lambda) + u_{60^{\circ}S}(\lambda) - u_{40^{\circ}S}(\lambda) - u_{50^{\circ}S}(\lambda) - 2 * u_{40^{\circ}S}(\lambda)\}$$

$$\text{onde} \quad I u(\lambda) > 35 \text{ m/s}$$

Para que este critério identifique a presença de um bloqueio devem ser satisfeitas as condições dos dois índices simultaneamente, a primeira é a de que o índice zonal de PNM seja menor do que 10 mb e a segunda de que o índice da velocidade zonal seja superior a 35 m/s durante o período em questão.

Existem ainda outros critérios de identificação de bloqueios, porém estes foram considerados suficientes para caracterizar o sistema neste trabalho.

METODOLOGIA

Foi realizada uma campanha de amostragem intensiva no período de julho a setembro de 2000 para estudo da poluição do ar na região metropolitana de São Paulo. Em uma primeira etapa é apresentada a variabilidade das concentrações do PM₁₀ no período em questão. Estes dados foram obtidos pelo monitor de material particulado, TEOM (*Tapered Oscillating Monitor*), conectado a um sistema de seleção de partículas (*inlet*) com diâmetro aerodinâmico menores que 10 μm . O equipamento operou no topo do prédio do Instituto de Física da USP, na Cidade Universitária, com resolução temporal de 10 minutos.

Em uma segunda etapa é realizada uma caracterização das condições meteorológicas da região de São Paulo em estudo. Foram utilizados os parâmetros meteorológicos (pressão, temperatura, UR, direção e velocidade do vento) da estação meteorológica da Água Funda e da USP, disponíveis em períodos de uma hora (IAG, 2000). Para a análise termodinâmica foram utilizados dados de radiossondagens que são realizadas regularmente no Aeroporto de Congonhas às nove horas da manhã e às nove horas da noite, horário local. As análises das radiossondagens fornecem informações do perfil termodinâmico da atmosfera, a partir da superfície até 20 km de altura. As variáveis medidas, a cada nível, são: pressão, temperatura, depressão do ponto de orvalho, direção e velocidade do vento.

Uma terceira parte deste trabalho visa descrever o processo de identificação e caracterização dos bloqueios atmosféricos e então relacionar a sua influência nas condições sinóticas e termodinâmicas identificadas para a região de estudo em São Paulo. Para isto foram utilizados os dados de análise do modelo global do NCEP disponíveis em intervalos de 12 horas. O GRADS foi utilizado para a visualização dos dados do NCEP. As imagens da América do Sul utilizadas foram obtidas pelo satélite GOES-8 na região do Infravermelho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Análise das concentrações de material particulado e caracterização meteorológica local do período

Neste item são apresentadas as concentrações de material particulado inalável (PM_{10}) observadas durante o mês de agosto de 2000 em uma campanha de amostragem intensiva, realizada na cidade de São Paulo. São discutidas também as condições meteorológicas locais que caracterizam o período em análise.

A variabilidade das concentrações de material particulado no período de inverno na cidade de São Paulo é bastante acentuada como pode ser observado na série temporal do PM_{10} na Figura 1(a). Pode-se notar que as concentrações de PM_{10} variam de 20 a 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de um dia para o outro. Esta variabilidade está altamente relacionada às condições meteorológicas atuantes que hora apresentam-se favoráveis, hora desfavoráveis à dispersão destes poluentes. O período de 23 a 26 de agosto de 2000 se destaca por concentrações máximas bastante elevadas e persistentes. Este período apresenta ainda um perfil de concentrações durante o ciclo diurno bastante característico, com máximos durante a noite e mínimos de concentração durante o dia, devido as intensas inversões térmicas freqüentes no período de inverno na região (Castanho, 2001).

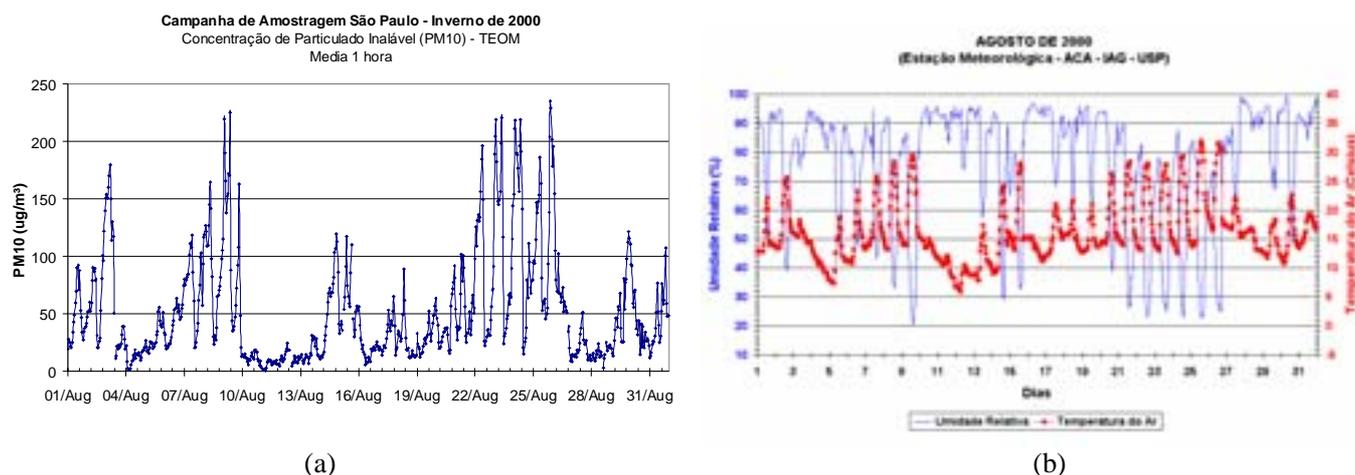


Figura 1: (a) Série Temporal das concentrações de Material Particulado Inalável (PM_{10}), do período de agosto de 2000, obtida pelo monitor TEOM, no Instituto de Física da USP, cidade universitária; (b) Série Temporal dos parâmetros meteorológicos de Umidade Relativa e Temperatura na superfície, do período de agosto de 2000. Estes dados foram obtidos na estação meteorológica do IAG, USP localizada na Água Funda. A figura foi extraída da ref (IAG, 2000).

A região apresentou no período do dia 20 ao dia 26 de agosto de 2000, condições bastante particulares no que tange a temperatura e umidade relativa mostrado na Figura 1(b). Verifica-se grande amplitude térmica com mínimos de temperatura em torno de 13°C durante a noite e máximos chegando a 30°C durante o dia. Verifica-se também que a umidade relativa teve máximos e mínimos inferiores aos valores dos demais dias, chegando a 80% durante a noite e a 22% durante o dia.

Para caracterizar a estrutura vertical da atmosfera foram analisadas as radiossondagens correspondentes ao período. A partir destas informações podemos classificar a atmosfera quanto a sua estabilidade estática ou convectiva, a altura da camada de inversão formada durante a noite e a umidade relativa. Desta forma pode-se identificar a capacidade de dispersão de poluentes da atmosfera no período.

As radiossondagens apresentadas a seguir na Figura 2 representam as principais condições termodinâmicas do período. Foi selecionado para ilustração, o dia 20 as 12z pois representa bem a estrutura atmosférica do início do período em análise e a do dia 23 de agosto que representa a estrutura que predominou do dia 21 ao dia 26 de agosto as 12Z.

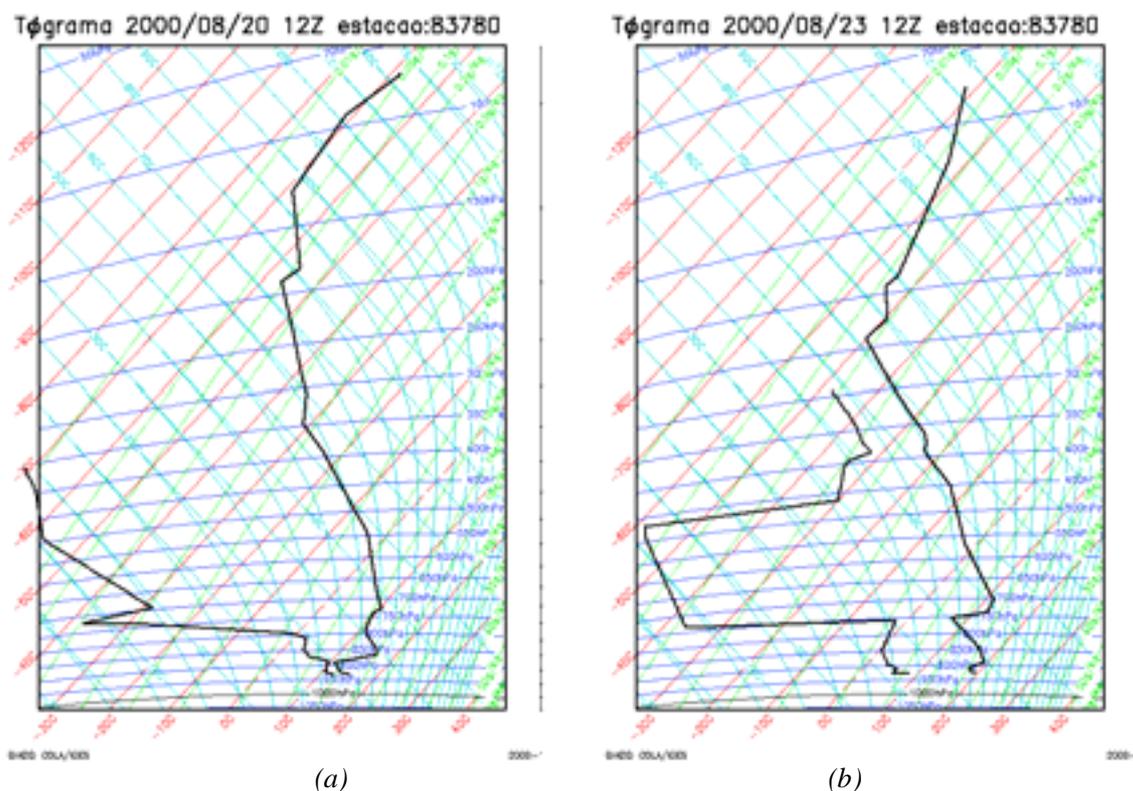


Figura 2: Perfil vertical de temperatura ambiente e temperatura de ponto de orvalho, de dois dias típicos às nove horas local (12Z). (a) Dia 20 de agosto início do período; (b) Dia 23 de agosto representando o restante do período. Obtido pelos dados de radiossondagem cedidos pelo Aeroporto de Congonhas.

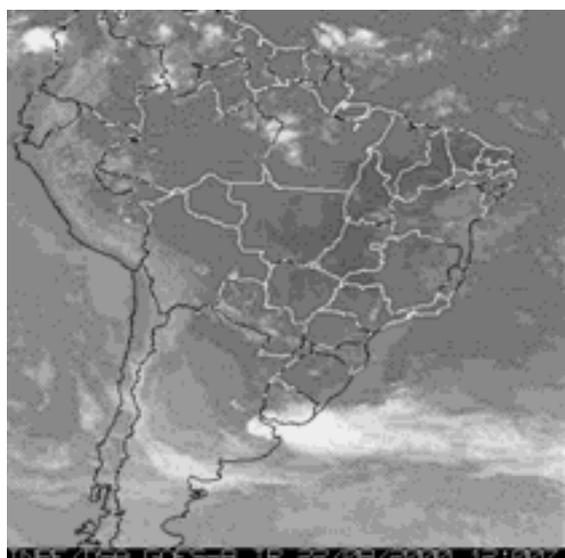
Na Figura 2 são apresentados em um diagrama adiabático (Skew Temperatura log Pressão) os perfis de temperatura ambiente e de temperatura de ponto de orvalho a cada nível de pressão. Uma explicação detalhada deste tipo de diagrama pode ser encontrada na literatura (Hess, 1959). Qualitativamente, quanto mais próximas estiverem as curvas de temperatura maior a umidade relativa do ar em uma determinada altura. Podemos desta forma notar ainda no início do período, Figura 2(a) bastante umidade relativa próxima a superfície até 900 hPa com uma estabilidade estática neutra e estabilidade convectiva instável seguida logo acima por uma camada de inversão térmica, identificada pela análise do gráfico, não apresentado, da temperatura potencial e temperatura potencial equivalente saturada. Na Figura 2(b) nota-se em toda coluna uma baixa umidade relativa. Uma fina camada próxima a superfície já indica o início do aquecimento do dia (estabilidade estática instável) quando inicia-se o movimento convectivo por aquecimento do solo pelo Sol. Logo acima se tem a assinatura da inversão térmica ocorrida durante a noite anterior mostrando a alta estabilidade estática da camada, e a camada residual do dia anterior logo acima. Da Figura 2b pode ainda ser interpretada a intensa subsidência de ar seco de camadas superiores, sobre o nível de 750hPa. Estas condições são desfavoráveis a dispersão de poluentes, que ficam confinados na camada de inversão durante a noite, por isto os máximos de concentração de material particulado observado na Figura 1(a). O mesmo perfil é observado até o final do período, a concentração de poluentes da camada noturna é agregada às concentrações emitidas durante o dia anterior presentes na camada residual quando ocorre a formação da camada de mistura e assim por diante (Stull, 91). O que explica as condições meteorológicas locais para o acúmulo e conseqüentemente aumento de concentrações dos poluentes durante o período. No item seguinte é realizada a análise sinótica que propiciou as condições meteorológicas de estabilidade observadas neste item.

2. Identificação do sistema de bloqueio e os seus efeitos em outras regiões

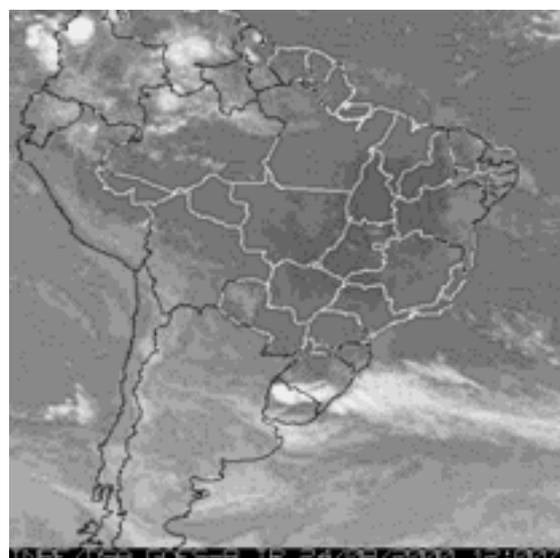
Foi observado que um fator que poderia estar influenciando as condições meteorológicas na RMSP seria um sistema de bloqueio formado sobre o Oceano Pacífico no lado da costa oeste da América do Sul. Neste item é feita uma análise mais detalhada da identificação qualitativa do sistema de bloqueio e posteriormente quantitativa

utilizando-se de indicadores deste sistema, como os índices zonais. Em seguida é feita uma análise da influencia deste nas condições sinóticas da região sudeste do Brasil.

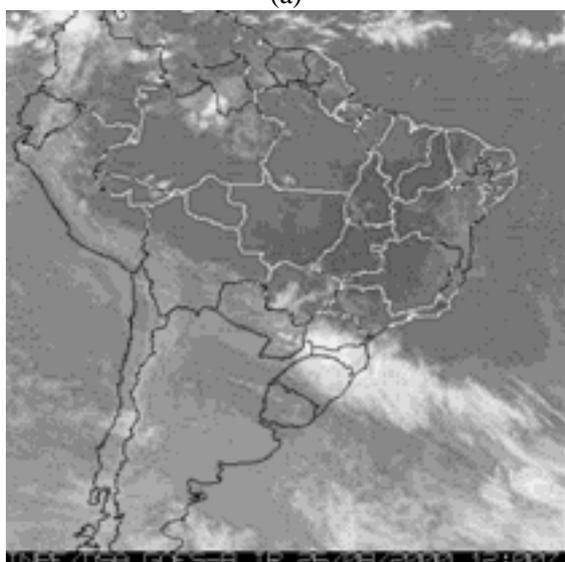
Nas imagens de satélite no infravermelho, Figura 3 nota-se uma marcada nebulosidade na região do Uruguai e sul do Brasil que indica a localização de uma frente fria. Esta nebulosidade permanece estacionária do dia 22, Figura 3(a), ao dia 24 de agosto, Figura 3(b), quando a partir de então começa a se deslocar em direção a região SE do Brasil passando no dia 26 de agosto no Paraná, como mostra a Figura 3(c), chegando a São Paulo no dia 27 de agosto.



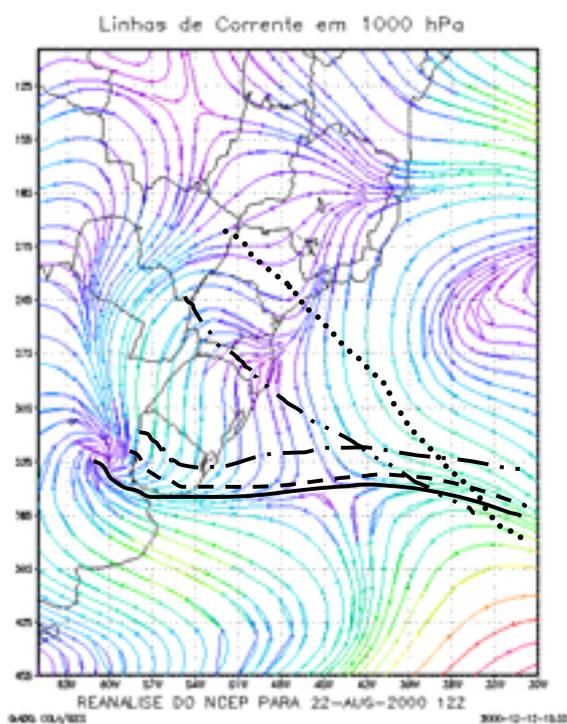
(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda Posição das Frentes (d)

- 22/ago/00 - · · 26/ago/00
- - - 23/ago/00 ······ 27/ago/00
- . . 24/ago/00

Figura 3: Imagens do Satélite GOES 8 no IR para a América do Sul no mês de agosto de 2000 para os dias (a) 22 às 12Z; (b)24 às 12Z; (c)26 às 12Z; (d)Posicionamento das frentes do dia 22 ao dia 27(12Z).

A progressão da frente é indicada na Figura 3(d) de linhas de campo em 1000 mb para a região SE do Brasil, do dia 22 ao dia 27 de agosto. Nota-se nesta análise como a região permaneceu livre da passagem natural das frentes

frias durante o período em questão 20 ao dia 26 de agosto. A frente ter permanecido estacionária é justificado pela presença de um sistema de bloqueio analisada a seguir.

Realizando-se uma análise dos campos de vento em 500 mb no Pacífico Sul na costa oeste da América do Sul, nota-se a presença de um anticiclone gerando uma bifurcação do campo de vento zonal no dia 20 de agosto, Figura 4, e que permanece por aproximadamente 6 dias, do dia 20 ao dia 25 de agosto de 2000. Ele esta localizado aproximadamente a 40°S, que obedece aos ‘pelo menos’ 10° ao sul do cinturão de anticiclones e permaneceu entre 100°W e 80°W. A análise da altura geopotencial também apresentou bem o padrão omega invertido que começa a ser formado neste dia. Pode-se verificar ainda no dia 23 de agosto, Figura 4(b) que se inicia um novo sistema a NW do bloqueio identificado inicialmente, este aos poucos vai se intensificando até que os sistemas conseguem se propagar zonalmente a partir do dia 26 de agosto no término do período.

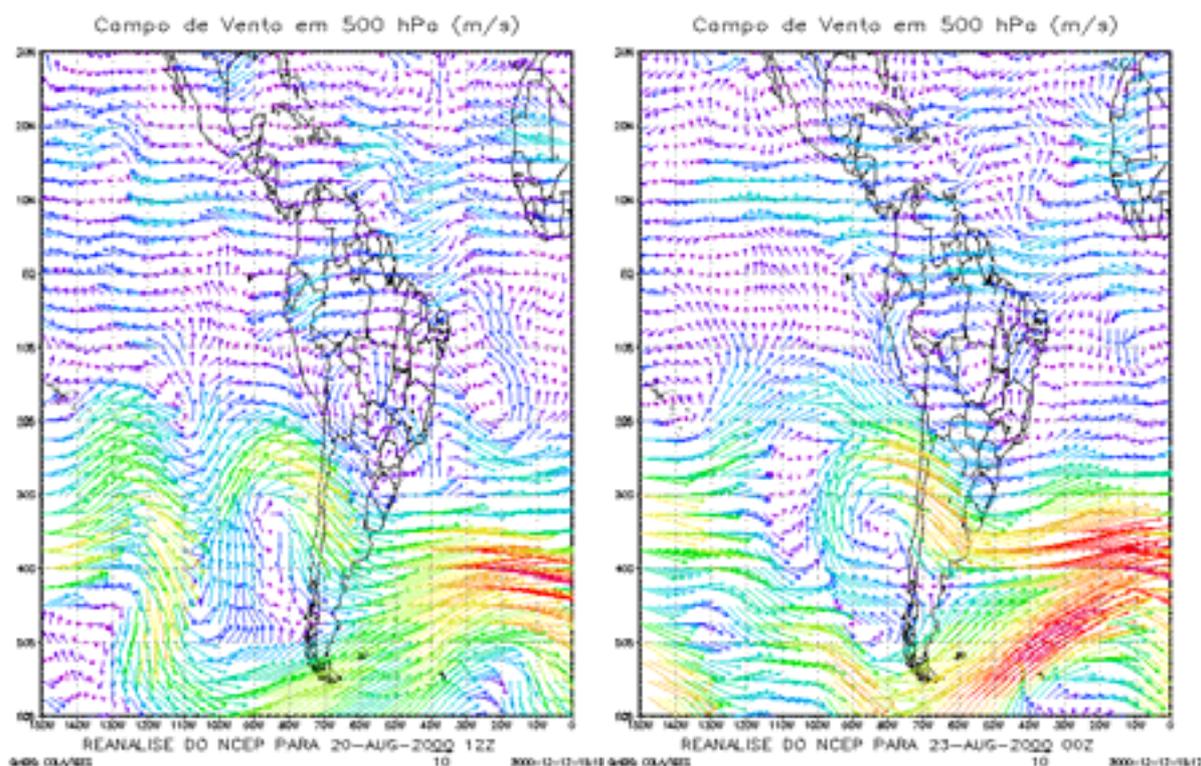
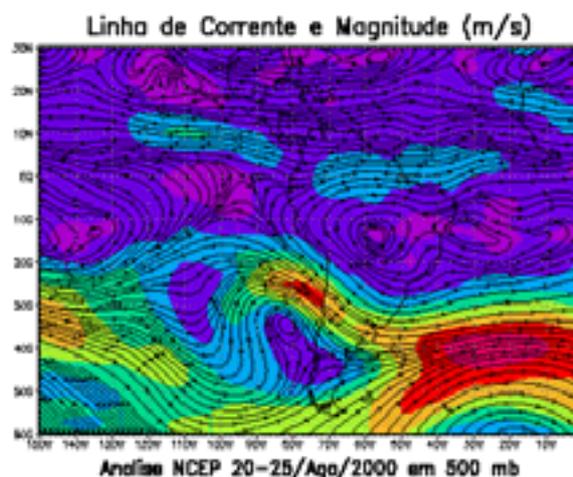


Figura 4: Campo de Vento em 500mb da análise do modelo NCEP, visualizado pelo GRADS, nos dias: (a)20 de agosto de 2000 as 12Z; (b)23 de agosto de 2000 as 12Z.

A Figura 5 apresenta as linhas de corrente e magnitudes médias para o período de bloqueio 20 a 25 de agosto, mostrando a permanência do padrão omega invertido no período. Pode-se ainda notar o forte jato formado no encontro dos dois ramos da bifurcação localizada ao sul do Oceano Atlântico Sul. A presença deste jato nesta posição também contribui para a desintensificação das frentes frias que se deslocam em direção ao SE.

Figura 5: Linha de Corrente e magnitude do vento em 500mb da análise do modelo NCEP, para a média do período de 20 a 25 de agosto de 2000.



A seguir são apresentados os resultados da análise quantitativa feita com alguns índices. A Figura 6 apresenta a variação do índice zonal do geopotencial em 500mb durante todo o mês de agosto. Pode-se notar que, no período de 20 a 25 de agosto o índice permanece abaixo de zero, e da ordem de -100 gpm na região identificada como bloqueio (100W) e não se desloca mais do que 25° de longitude no período, garantindo desta forma a condição para a classificação do sistema como de bloqueio atmosférico, pelo método de Lejeñas.

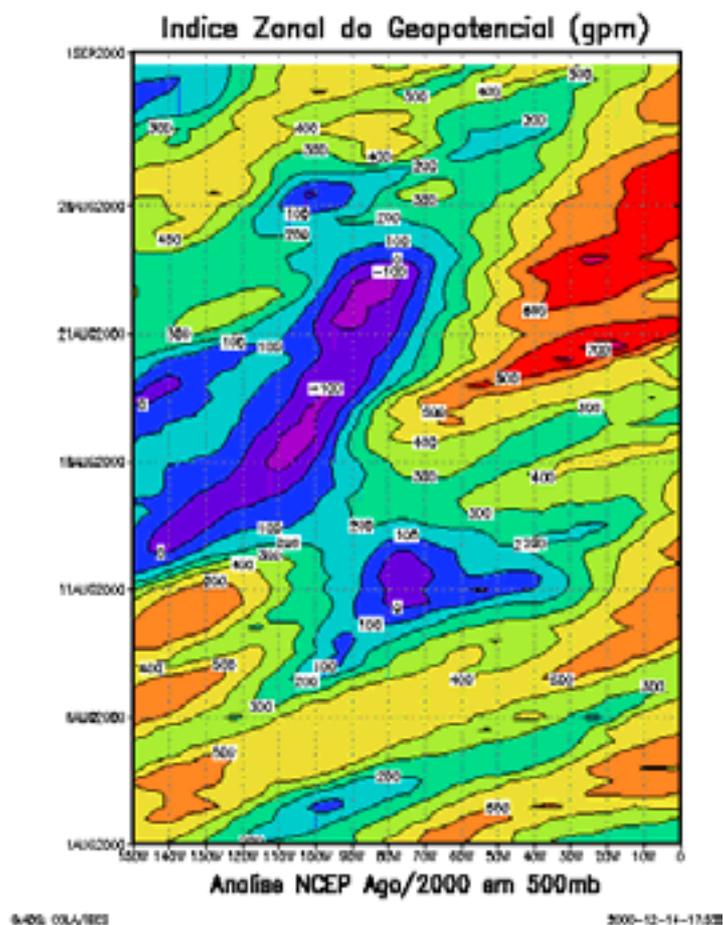


Figura 6: Índice Zonal do Geopotencial aplicado entre 35° e 50° S de latitude a 500mb durante o mês de agosto de 2000.

Um outro sistema de identificação de bloqueio utilizado foi baseado nos índices de Kayano e Kousky. A Figura 7(a) apresenta a variação do índice zonal de pressão ao nível do mar durante todo o mês de agosto de 2000. Pode-se notar que o índice obedece a condição de ser menor do que 10mb durante um período que começa no dia 16 até aproximadamente ao dia 23 de agosto, um pouco antecipado em relação ao período em questão. O segundo índice do vento zonal em 250 mb é apresentado na Figura 7(b). Já para este índice o período em análise é exatamente o que apresenta valores acima de 35 m/s condição para ser considerado um bloqueio juntamente com o índice anterior.

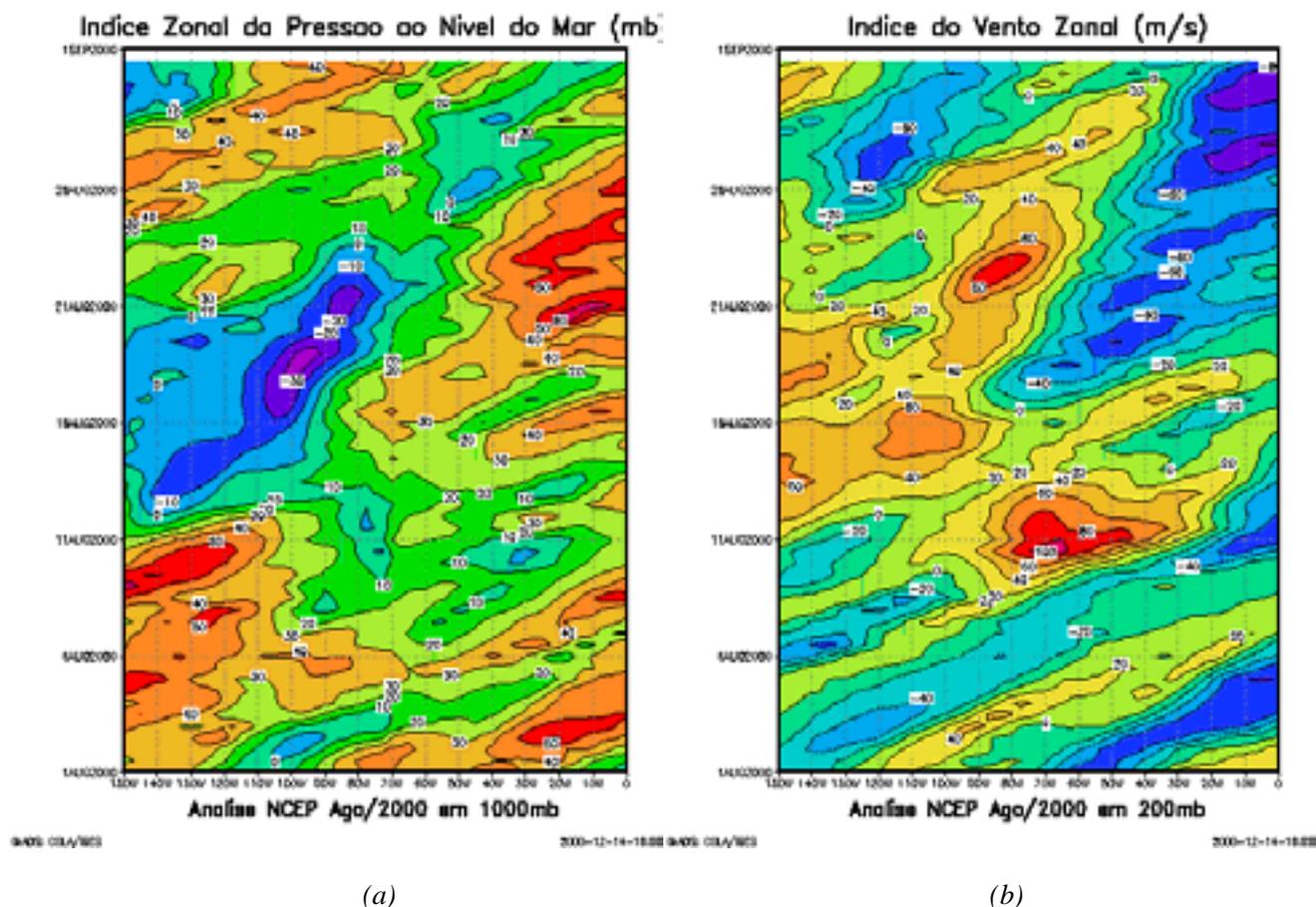


Figura 7: (a) Índice Zonal da Pressão ao Nível do Mar aplicado entre 35° e 55° S de latitude durante o mes de agosto de 2000; (b) Índice da Velocidade do Vento Zonal em 250mb.

Portanto dada a persistência de seis dias das condições impostas pelos índices no período de 20 a 25 de agosto, podemos classificar o sistema observado como um sistema de bloqueio atmosférico, ocorrido sobre o Oceano Pacífico na costa oeste da América do Sul.

A influência do sistema de bloqueio identificado sobre a região metropolitana de São Paulo é analisa a seguir. A primeira observação é com relação ao posicionamento da Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul (APSAS), Figura 8. Durante o período de bloqueio APSAS, na média do período, permaneceu um pouco deslocada a oeste do Oceano Atlântico exercendo uma influência significativa sobre a região SE do Brasil, como mostra a Figura 8(a) de PNM. Já no período seguinte quando não há mais a presença do bloqueio nota-se que a intensidade da APSAS diminuiu e se desloca para leste, diminuindo sua influência sobre a região SE, Figura 8(b).

A variabilidade da intensidade média da pressão ao nível do mar na região onde o centro da alta se localiza (entre 20 a 40° S e entre 10 e 30° W) pode ser observada na Figura 9. Ocorre uma intensificação da PNM exatamente no período de bloqueio. Sabe-se que a presença do sistema de Alta pressão atuando sobre a região SE do Brasil é a situação sinótica que provoca as condições meteorológicas observadas para a região de São Paulo no período de bloqueio, sendo bem identificadas na Figura 8 de média de PNM do período.

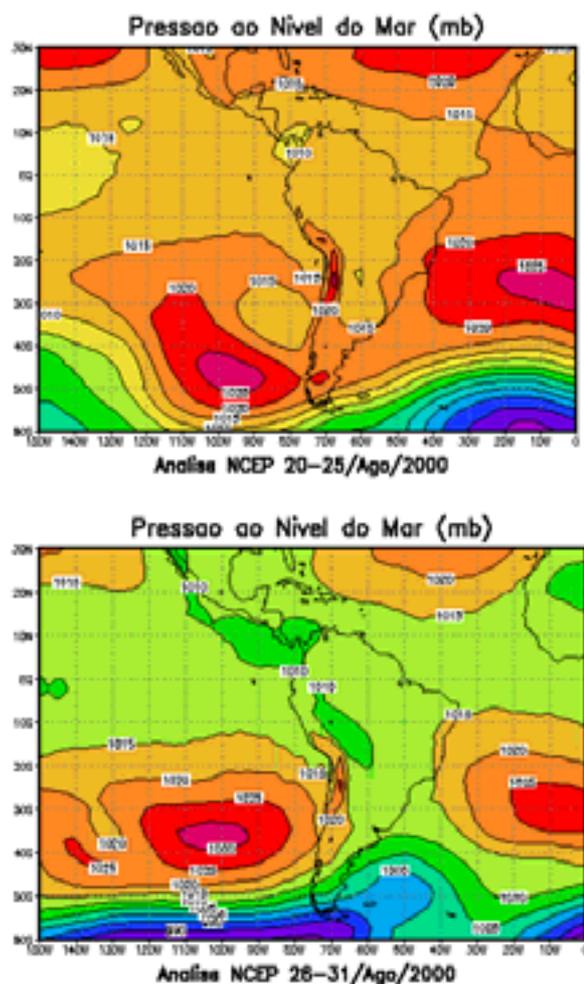


Figura 8: Pressão ao nível do mar média: (a) Período de 20 a 25 de agosto de 2000; (b) Período seguinte 26 a 31 de agosto 2000.

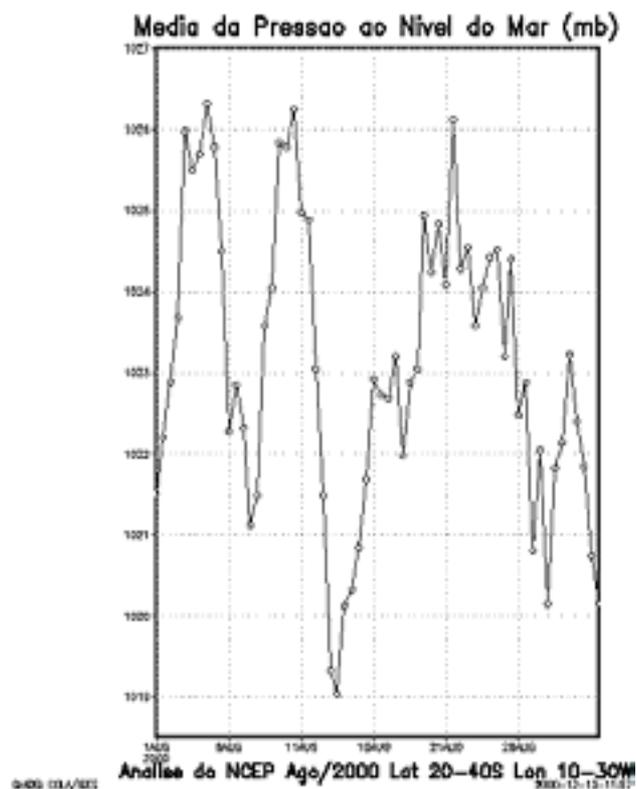
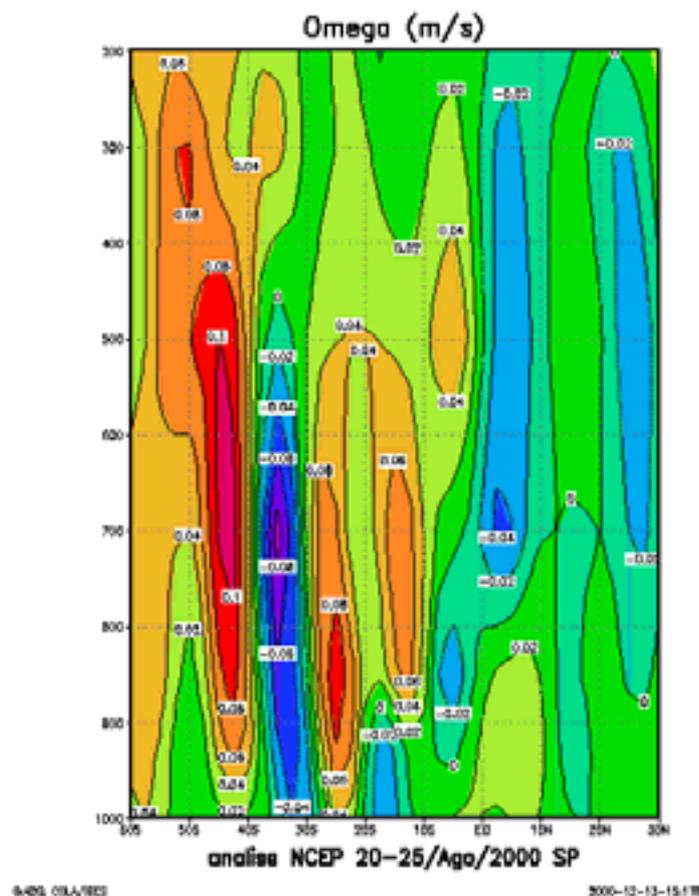


Figura 9: Série temporal da Pressão ao nível do mar média na região do centro da APSAS, do período de agosto de 2000.

A presença da alta pressão gera movimentos de subsidência de ar seco e frio, promovendo céu claro, sem nuvens na região, e as condições observadas na análise termodinâmica de fortes inversões térmicas com subsidência, impedindo a dispersão dos poluentes na região de São Paulo.

O movimento vertical foi analisado na Figura 10 do perfil vertical de Omega médio no período (20-25 de agosto) em um corte feito sobre a longitude de São Paulo em torno de 43° W. Nota-se sobre a região de São Paulo em 23° S elevados valores positivos de omega na coluna que vai da superfície até aproximadamente 600mb, indicando intenso movimento de subsidência já esperado pelas análises anteriores, na região. Já na região Sul do Brasil e Uruguai observa-se altos valores de Omega negativo o que indica convergência em baixos níveis gerando movimento ascendente propiciando a formação de nuvens como as observadas nas imagens de satélite. Mais ao sul tem-se intensa subsidência sobre o oceano.



AGRADECIMENTOS

A FAPESP pelo apoio financeiro ao processo 99/12493-2 sob o projeto temático 96/1403-4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M. F., Orsini, C., Maenhaut, W. (1994). *Relation between aerosol sources and meteorological parameters for inhalable atmospheric particles in São Paulo city, Brazil*. Atmospheric Environment, Vol.28, No.14, p.2307-2315.
- Casarin, D.P. (1983). *Um estudo observacional sobre os sistemas de bloqueio no Hemisfério Sul*. Dissertação de Mestrado. INPE
- Castanho, A.D.A., Artaxo, P. (2001). *Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study*. Atmospheric Environment. Vol 35, p.4889-4902.
- Fuentes, M.V. (1996). Bloqueios. *Climanalise Especial*. Cap 8, INPE
- Hess, S.L. (1959). *Introduction to Theoretical Meteorology*. Holt, Rinehart and Winston, New York, p. 362, Cap.5.
- IAG, 2000. Gráfico obtido na página da internet do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, www.iag.usp.br.
- Marques, R.F.C., V.B. Rao (1996). *Bloqueio Atmosférico no Hemisfério Sul durante o período de 1980 a 1993*. *Climanalise Especial*. Cap 8, INPE
- Nascimento, E. L. (1998). *Influência dos bloqueios atmosféricos na propagação de ondas de Rossby em escoamentos de Inverno no Hemisfério Sul*. Tese de Mestrado. IAG/USP.
- Stull, R.B. (1991). *Mean Boundary Layer Characteristics*. In: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Boston. Capítulo 1, p.2-26.