



TEMA 1 : Processos físicos associados aos sistemas de tempo e clima

Hy

A

A atmosfera é um sistema complexo que interage de diferentes formas com os componentes do sistema climático como a criosfera, litosfera, hidrosfera e biosfera, e ainda possui seus próprios mecanismos e processos dinâmicos, termodinâmicos e físicos inerentes a sua própria natureza interna.

Tempo e clima são diferenciados por questões de escala. Tempo é definido como as condições meteorológicas atuantes num determinado lugar e instante e sua previsibilidade além de ser influenciada por fenômenos de escala global, sofre influência direta dos fenômenos de escala local e que ocorrem num curto espaço de tempo. Já o clima refere-se ao estado médio da atmosfera, sendo sua previsibilidade mais relacionada às interações com os componentes do sistema terrestre.

Processos físicos associados ao tempo e ao clima são aqueles que influenciam os elementos do sistema climático e os processos internos da atmosfera como o aquecimento devido à radiação solar, mudanças de fase da água, trocas de calor, umidade e momento entre a atmosfera e o sistema climático por exemplo.

A radiação solar é a força propulsora de todos os movimentos atmosféricos. A emissão solar de ondas curtas na faixa do espectro visível, provoca variações desiguais de aquecimento devido à latitude, ao ângulo zenital e ao albedo das superfícies, e pode ser refletida, absorvida e reemitida pelos gases atmosféricos e pelas superfícies. Em contrapartida, a superfície terrestre também emite radiação de ondas longas no espectro eletromagnético do infravermelho, sendo 15% dessa radiação absorvida pela atmosfera, o que colabora para o efeito estufa natural do planeta. O aquecimento desigual induz gradientes de pressão, ventos, ^{influencia as} correntes oceânicas, advecção e convecção do ar, que agem no sentido de buscarem o equilíbrio do balanço térmico e energético do planeta. Esses movimentos atmosféricos como os de convecção podem gerar nuvens.

O segundo processo físico citado são as mudanças de estado físico da água dentro da atmosfera. A instabilização de uma parcela de ar contendo vapor pode gerar mudanças de fase



da água, liberação de calor latente, e formação de nuvens. O processo de formação de nuvens também busca equilibrar termicamente a atmosfera, misturando o ar através do transporte de calor e umidade. Na previsão de tempo, as nuvens estão associadas à previsão de distúrbios naturais hidrometeorológicos, tempestades convectivas de efeitos locais, associação com brisas, entre outros. Em escala sinótica, estão presentes nas zonas frontais, ciclones e zonas de convergência, e no clima influenciam no albedo, e regiões úmidas e secas pelo planeta.

Outro processo físico importante são os processos turbulentos inerentes às interações da atmosfera e a superfície terrestre, principalmente aqueles que ocorrem dentro da chamada Camada Limite Planetária (CLP), gerados pela rugosidade da superfície e o atrito, e que provocam alterações nos campos de vento, umidade e calor, podendo também influenciar nos efeitos convectivos.

As interações da atmosfera com a biosfera também é um processo físico a ser considerado. As transferências de calor e umidade entre o solo, ^{a vegetação} e a atmosfera, a evapotranspiração, albedo planetário, tipos de solo, interceptação da precipitação pela vegetação, desmatamento, influenciam no tempo e no clima, como por exemplo no tempo alterações na vegetação podem afetar a fotossíntese e o ciclo do carbono, mudanças na rugosidade e nos fluxos de calor e energia, também podem provocar os chamados ilhas de calor. No clima, as queimadas podem alterar a quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera, a camada de ozônio e o albedo planetário.

Os oceanos também exercem influência nos processos físicos associados ao tempo e ao clima, por possuem um aquecimento mais lento do que a atmosfera, sua capacidade de reter calor e distribuí-lo para as camadas mais profundas dos oceanos, sua temperatura à superfície possui anomalias de poucos graus e milhares de quilômetros, influenciando a atmosfera nos processos de teleconexões e acoplamentos, provocando mudanças na circulação geral da atmosfera.



As trocas de calor, momentum e umidade entre o oceano e atmosfera são constantes e são responsáveis por modos de variabilidade interdecadal, interanual e intrasazonal. Das diferentes teleconexões podem ser citadas: o El-Niño/La Niña, Oscilação decadal do Pacífico e o Modo Anular Sul. No tempo, a temperatura da superfície do mar pode ^{influenciar na} geração de nevoeiros costeiros e oceânicos, e no clima altera-se na circulação geral da atmosfera.

Alterações no gelo marinho e continental do planeta também fazem parte da dinâmica do tempo e do clima, pois além do albedo, o gelo se comporta como um isolante térmico impedindo as trocas de calor e umidade com a atmosfera. Estudos recentes indicam ^{que} a expansão ou retração do gelo antártico influenciam o tempo e o clima no hemisfério sul.

Interações com a superfície do solo, podem alterar microclimas urbanos, aquecimento e circulação local e variações climáticas. A poluição também gera alterações das concentrações de gases na atmosfera, prejudicando o metabolismo das plantas, o equilíbrio climático global, o efeito estufa natural, o regime de chuvas, vazão dos rios, umidade nos solos, distribuição da fauna e da flora, aumento de nuvens e chuvas ácidas.



Tema 3: Técnicas observacionais in situ e remotas para previsão do tempo, sazonal e projeção climática.

Milhares de observações coletadas diariamente pelos serviços meteorológicos de todo o mundo e dados obtidos por sensoriamento remoto são utilizados para inicialização de modelos numéricos e para observar o tempo numa determinada região. Através da utilização de diversas técnicas de assimilação de dados das observações nos modelos numéricos, os sistemas desempenham um papel indispensável para ajustar os modelos de previsão de acordo com as observações, uma vez que não existem observações disponíveis de forma uniforme em todo o globo.

As observações podem ser diretas, contendo informações sobre as variáveis atmosféricas em estações de superfície, marítima e de ar superior ou por sensoriamento remoto como satélites, radar, LIDAR, SODAR, entre outros. Apesar das observações diretas (in situ) serem mais informativas, as observações remotas por sensoriamento remoto possuem cobertura espaço-temporal melhor. A combinação dos dois tipos proporciona melhorias na cobertura espaço-temporal e o entendimento da atmosfera no futuro. Satélites meteorológicos e outros equipamentos de sensoriamento remoto completam a rede de observações convencional, proporcionando observações em regiões pobres como nos oceanos, áreas remotas e na estratosfera. Para previsão numérica de tempo, sazonal e projeção climática os dados de observação são a matéria prima essencial para as análises do tempo, da variabilidade climática através de longas séries de dados, e detecção de tendência de extremos.

Dados de superfície são observados nas estações meteorológicas convencionais, através ^{de} variáveis como: temperatura, umidade, vento, pressão, nebulosidade, visibilidade, precipitação, evaporação, insolação, poluentes, entre outros. Para previsão do tempo elas são importantes como condições iniciais e de contorno dos modelos numéricos, como indicadores de entrada de frentes frias, tempestades ou qualidade do ar. Para previsão sazonal e projeção climática, além de condições iniciais (C-I) e de contorno (C-C) para os modelos numéricos, são importantes para observação de padrões em séries longas de dados.



Observações de *in situ* são observadas por radiossondas lançadas sobre o continente ou a bordo de navios no oceano, e transportam sensores que medem temperatura, pressão, umidade e vento em altitude até 30 km. Outras técnicas como o lançamento de balões-piloto também observam o vento em altitude. Para previsão do tempo essas observações possuem importância elevada nas previsões nowcasting, para o cálculo de índices de instabilidade como CAPE, Total Totals, GDI, índice K entre outros, e para compor a estrutura atmosférica dentro dos modelos numéricos de tempo e clima.

Observações sobre os oceanos ocorrem nos navios, em boias à deriva ou fixas e em plataformas continentais, e além de observar *in situ* as mesmas variáveis atmosféricas das estações no continente, também incluem observações do estado do mar, como altura e período das ondas, e da temperatura da superfície do mar. Além disso, as boias fixas ancoradas possibilitam observações *in situ* do perfil em profundidade dos oceanos. Para previsão do tempo, essas observações possuem importância para observação de brisas, rajadas de vento e formação de nevoeiros. No clima e previsão sazonal, proporcionam uma série de dados sobre informações dos oceanos e conseqüentemente sua influência nos padrões atmosféricos.

Observações remotas por sensoriamento remoto mais abrangentes na escala espacial são as observações por satélites de órbitas polares e geoestacionárias, que possibilitam observações em locais inóspitos e de difícil acesso. Os dados provenientes dessas observações são diversos, e pode-se citar os perfis de temperatura e umidade na atmosfera, sensores como radiômetros, sensores por microondas, scatterômetros, que possibilitam estimativas da velocidade do vento a partir da rugosidade da superfície do mar, velocidade do vento estimado pelos movimentos das nuvens, estimativas de pressão ao nível médio do mar, velocidade do vento e vapor d'água integrados verticalmente na atmosfera, estimativas de precipitação, como por exemplo as técnicas chamadas Hidroestimador, CHMORPH e 3B42RT.



Combinação de sensores para geração de estimativas de precipitação, como no experimento TRMM, que proporcionou o 1º radar espacial meteorológico e o atual Global Precipitation Measurement (GPM) com estudos que indicam estimativas de precipitação com capacidade de estimar a precipitação de poucas milímetros.

Dados provenientes de sensores acoplados a aeronaves também ganham destaque para previsão do tempo. Observações de temperatura, pressão, umidade e vento em rota através do Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) e do Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting (TAMDAR) possibilitam observações remotas da atmosfera superior e até da estratosfera.

Equipamentos como SODAR auxiliam na observação da estrutura térmica e do vento na vertical em diferentes níveis na baixa atmosfera e são aplicados para previsão e pesquisa de turbulência, estabilidade atmosférica, micrometeorologia, qualidade do ar, usinas nucleares, aeroportos, monitoramento e previsão de nevações.

Radares meteorológicos possibilitam observações remotas da precipitação, crescimento de gotas, gelo nas nuvens, previsão de rajadas, tornados, auxiliam na previsão nowcasting, principalmente os do tipo Doppler, e técnicas de algoritmos de "tracking" (rastreamento de tempestades).

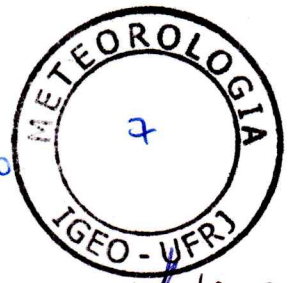
A rede de observações de descargas elétricas distribuídas pelo Brasil e pelo mundo auxiliam na previsão do tempo no monitoramento de tempestades severas, tanto na rede de observação no solo como na recente estimativa por satélite a bordo do projeto GPM.

Os dados de reanálises são dados que possibilitam os estudos de previsão sazonal e climática, e são compostos por assimilação de dados no modelo numérico e reúnem observações de todos os tipos, sendo muito importante na reconstrução de dados históricos e séries longas de dados. Os mais utilizados são os do NCEP/NCAR, ECMWF, ERA, JRA-25.

Dados de satélite também possibilitam observações remotas de expansão e retração do gelo marinho e continental no planeta, assim como o monitoramento de sua distribuição.

Atualmente, surgem novas observações com tecnologias de baixo custo, utilizando plataforma aerodina e sensores de baixo custo acoplados a drones ou veículos aéreos não-tripuláveis (VANT) para observação de nuvens e gotas, ou ainda simulando radiossondas atmosféricas, auxiliando nas previsões do tempo, hidrologia e até previsão de deslizamentos de encostas e queimadas.

Todas as observações citadas, além de contribuírem para previsão numérica, auxiliam na previsão do tempo, sazonal e climática através de recentes estudos de assimilação de dados.



TEMA 5: Previsão por conjunto (ensemble)

Handwritten signature and initials.

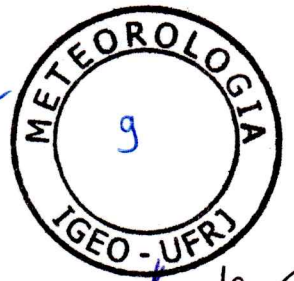
Nas décadas de 50 e 60, Lorenz, como consequência da Teoria do Caos, mostrou que a atmosfera possui um limite de previsibilidade devido a alta sensibilidade às condições iniciais e resolução das equações não-lineares. Melhorias em previsão numérica do tempo precisam levar em consideração as incertezas associadas às observações das condições iniciais. Previsão de tempo por ensemble surgiu como uma técnica elaborada na tentativa de aumentar o prazo de previsão e previsibilidade dos modelos numéricos, baseando-se na suposição de ^{que} os modelos fossem perfeitos e considerando apenas as incertezas relacionadas às condições iniciais.

Lorenz (1965) introduziu os conceitos de modelo adjunto, vetores singulares e vetores Lyapunov para o caos e modelos atmosféricos de pequena ordem.

Atualmente, diferentes técnicas são utilizadas para alterar as condições iniciais, e basicamente estão divididas em duas classes:

① Previsão de Monte Carlo, onde as perturbações nas condições iniciais são "realistas" e estatisticamente semelhantes aos erros das previsões, sendo perturbações escolhidas aleatoriamente, e ② previsões com erros do dia, chamadas "breeding" ou "singular vector", onde utilizam os erros crescentes que dependem da evolução do fluxo atmosférico adjacente.

Mecanismos como perturbações dinâmicas dos campos climatológicos, assimilação de dados, ou as duas técnicas, podem gerar diferentes condições iniciais para os modelos numéricos. A previsão por conjunto aumenta a capacidade de determinação das incertezas, e além de perturbações nas condições iniciais, também podem utilizar a simulação de diferentes modelos atmosféricos ou utilizar diferentes conjuntos paramétricos de um mesmo modelo atmosférico, como na previsão de precipitação, que possui influência direta das parametrizações escolhidas no modelo numérico.



Para geração de diferentes condições iniciais, a técnica de perturbação dinâmica consiste na inserção de valores próximos ao desvio padrão climatológico nas variáveis temperatura, pressão e vento. A técnica de assimilação de dados pode ser do tipo variacional, filtro de Kalman ou interpolação ótima. E também existe a técnica de defasagem no tempo, onde o modelo numérico é inicializado em diferentes horários tentando melhorar a estimativa inicial, corrigindo a falta de identificação de assinaturas sinóticas e de meso-escala.

Operacionalmente, a geração de condições iniciais no NCEP é obtida através da técnica "breeding", e no ECMWF através da "singular vector".

Obtido o conjunto de previsões, ferramentas estatísticas são utilizadas na interpretação dos resultados. A vantagem dessa técnica é que todos os membros da previsão são visualizados, e a desvantagem é a geração de muitos resultados ao mesmo tempo. Cada previsão é determinística, mas o conjunto de previsões tomadas a partir de estados iniciais ligeiramente diferentes da análise fornece uma descrição do caráter caótico da atmosfera.

Os produtos estatísticos mais utilizados são o ensemble médio, o espalhamento do ensemble, diagramas spaghetti e previsões probabilísticas. A dispersão das previsões é uma boa estimativa do desvio padrão da distribuição das probabilidades dos estados da previsão, o que indica que a média do conjunto seria relativamente mais confiável quando a divergência das previsões fosse menor.

Para aplicação em previsão do tempo, previsão por ensemble fica dependente da capacidade computacional do centro operacional na geração do conjunto de previsões diariamente.

Na previsão sazonal e climática, a previsibilidade elevada nos trópicos devido as interações e influência maior das condições de contorno, principalmente dos oceanos, a previsão climática por conjunto ^{se torna eficiente, pois} não pretende prever os sistemas transientes mas sim as propriedades estatísticas de um mês, estação do ano, ou de anos no futuro -

