

INPE 293/RI-082

PROJETO: MESA

TÍTULO: PROGRAMA DE PESQUISA GLOBAL DA  
ATMOSFERA "GLOBAL ATMOSPHERIC  
RESEARCH PROGRAMME" (GARP)

AUTOR: Rolando V. Garcia

PUBLICADO EM: Janeiro 1973

Série de Publicações do GARP nº 1  
Outubro de 1969

## RESUMO

Nesta publicação, que é de nível intermediário entre um trabalho destinado unicamente aos especialistas e um de divulgação, são expostos os objetivos do Programa de Pesquisa Global da Atmosfera e os princípios científicos nos quais se funda.

Depois de examinar as relações existentes entre a explicação e a previsão do comportamento da atmosfera, o documento realça as dificuldades encontradas quando se tenta definir as previsões de tempo em termos físicos precisos. A seguir são estudadas as técnicas atuais baseadas nos modelos físico-matemáticos da atmosfera, e é feita uma análise dos problemas ainda por resolver. O GARP é apresentado como um programa integrado, estabelecido para resolver estes problemas, e orientado para um conjunto de objetivos, e com cada aspecto do programa relacionado a estes objetivos.

## INTRODUÇÃO

As resoluções 1721 e 1802 adotadas pelas Nações Unidas em 1961 e 1962 representam um marco no desenvolvimento da meteorologia internacional. A partir destas resoluções, tem aumentado a colaboração estreita entre os serviços meteorológicos mundiais dentro da estrutura da Vigilância Meteorológica Mundial (VMM) e, durante os últimos anos, do Programa Global da Atmosfera (GARP).

Durante os dois últimos anos, o trabalho de planejamento do GARP tem progredido rapidamente. O Comitê de Organização Conjunta do GARP (JOC) considera agora importante criar uma série de publicações do GARP, nas quais será divulgado o progresso neste planejamento e mais tarde na implementação. O primeiro número desta série é dedicado à definição do que é o GARP, sua relação com a VMM e como foi iniciado. O JOC incumbiu o Diretor do Grupo de Planejamento Conjunto para o GARP (JPS), Professor Rolando V. Garcia, a tarefa de sintetizar os pareceres e opiniões expressos pelos membros por escrito e em discussões no Comitê.

A apresentação do GARP pode ser feita de várias maneiras diferentes. Aqui é feita uma tentativa não somente de descrever os fatos básicos deste programa global, mas também transmitir um pouco do espírito sentido por aqueles envolvidos neste trabalho de planejamento, que é de tanta importância para seu sucesso final.

A opinião do JOC de que é necessário formular tão claramente quanto possível os *problemas científicos* envolvidos, e revê-los frequentemente à medida que o planejamento for avançando, à luz dos desenvoltimentos dentro deste campo, deve ser óbvia, a partir da presente publicação.

O GARP é um esforço científico que irá requerer grandes recursos para alguns de seus experimentos. Para manter tal programa dentro de limites, devemos ter constantemente em mente um objetivo central, isto é, um estudo:

"daqueles processos físicos na troposfera e estratosfera que são essenciais para o conhecimento dos:

a) comportamentos transitórios da atmosfera manifestados em flutuações de larga-escala que controlam as mudanças do tempo: isto levaria a um aumento da precisão das previsões em períodos de 1 dia a várias semanas.

b) fatores que determinam propriedades estatísticas da circulação geral da atmosfera, que levaria a um melhor entendimento das bases físicas do clima".

O presente relatório é uma tentativa de colocar estas definições no centro de nossas considerações, e transmitir a um grande

grupo de pessoas o caminho a ser seguido para enfrentar este gigantesco problema.

Como presidente do JOC tenho o prazer de expressar meu apreço pela maneira pela qual o Prof. Garcia completou seu trabalho e espero que o toque pessoal que ele deu à apresentação, seja um estímulo adicional aos leitores.

Estocolmo, 19 de outubro de 1969

Bert Bolin

## ÍNDICE

Resumo. . . . .	ii
Introdução. . . . .	iii
Índice. . . . .	vi
1 - O PROBLEMA. . . . .	1
1.1 - Meteorologia: Ciência e Prática . . . . .	1
1.2 - Explicação e Previsão . . . . .	4
1.3 - Previsão Numérica - Algumas hipóteses . . . . .	6
2 - O QUE DEVE SER PREVISTO . . . . .	12
2.1 - Movimentos Atmosféricos . . . . .	12
2.2 - O Espectro dos Movimentos . . . . .	15
2.3 - "Falseamento" . . . . .	18
2.4 - Uma Conciliação Difícil . . . . .	19
3 - COMO PREVER . . . . .	21
3.1 - Um pouco da história. . . . .	21
3.2 - Técnicas e Problemas Correntes. . . . .	24
3.3 - A Incorporação dos Efeitos de Pequena Escala nos Modelos de Previsão . . . . .	33
3.6 - Os Limites da Previsão. . . . .	36
4 - DE QUE SE NECESSITA . . . . .	39
4.1 - Sistemas Globais de Observação. . . . .	39
4.2 - Experimentos de Escala Menor. . . . .	42
4.3 - Um Programa Integrado de Pesquisa: GARP . . . . .	46

## 1 - O PROBLEMA

### 1.1 - Meteorologia, Ciência e Prática

Os meteorologistas compartilham com os médicos uma situação um tanto quanto injusta em comparação com a maior parte dos outros cientistas. Ambos são obrigados a fornecer um serviço que exige, na maioria dos casos, meios e recursos não completamente ao seu alcance. Ambos tem de fazer diagnósticos com base em informação limitada, em processos ainda não compreendidos totalmente. Ambos tem de agir e tomar decisões sob pressão de tempo, muitas, antes de poderem explorar totalmente a situação e fazer um julgamento maduro.

Em vários aspectos, os meteorologistas se encontram em desvantagem comparados com os médicos. O previsor tem de entregar o produto de seu trabalho em tempo determinado; não pode "esperar e ver" co

mo a situação se desenvolve. Ele não pode fazer observações e testes, para a atmosfera.

Contudo, no total, parece que os meteorologistas poderão ser capazes de alcançar alguns de seus objetivos mais cedo do que os médicos. Isto porque a meteorologia é um ramo da física. A estrutura conceitual das ciências físicas está muito mais adiantada do que em qual

quer das ciências empíricas, sendo que o uso de métodos matemáticos para lidar com problemas complexos lhes dá acesso às ferramentas mais poderosas desenvolvidas pela ciência até agora.

É, talvez, a característica dual da meteorologia - como serviço público e como um ramo das ciências físicas - que a conduziu a sua posição peculiar dentro das ciências e entre as instituições públicas. No passado, os especialistas de outros ramos da física tinham a tendência para considerar os meteorologistas como ligados em demasia com "métodos empíricos" e "adivinhações", bem como sendo obrigados a fornecer alguns produtos aos fregueses, quer estivessem ou não preparados para lhes garantir a qualidade. Por sua vez, as autoridades governamentais não se sentiam bem com uma instituição que devia fornecer um serviço público de "rotina" e que contudo se mostrava muito exigente em relação ao campo científico e difícil de se acomodar dentro da infraestrutura governamental.

É entretanto este papel duplo que agora traz a esperança de um desenvolvimento sem precedentes. Torna-se mais e mais óbvio que a meteorologia não pode cumprir suas obrigações e fornecer os sempre crescentes serviços, que se lhe solicita, a menos que se desenvolva ainda mais como ciência. E é precisamente neste campo que se espera que se tornem disponíveis os recursos e o grau de cooperação internacionais necessários para resolver os intrincados problemas desta ciência complexa.

Os aspectos utilitários da meteorologia, que costumavam embaraçar o meteorologista "científico", constituem agora seu maior patrimônio. Agora que a tecnologia fez progressos notáveis, particularmente nos campos da pesquisa espacial e computadores eletrônicos, e desenvolveu ferramentas de extraordinário poder, os meteorologistas acreditam que podem conseguir respostas para muitos de seus problemas. Mas nenhum grupo ou instituição isolada, nem mesmo um país isolado, poderá realizar tal empreendimento. A meteorologia é, por excelência, o campo em que a cooperação internacional é não só conveniente mas também absolutamente essencial. Esta cooperação existe e o trabalho da Organização Meteorológica Mundial constitui prova eloquente dos esforços comuns dos países. Entretanto, é necessário agora um esforço muito maior. Os grupos de cientistas que conceberam e desenvolveram a idéia do Programa Global de Pesquisa Atmosférica (GARP) estão a par do fato de que um esforço adicional dispendioso não se materializaria a menos que houvesse boas razões para acreditar que os resultados não seriam de interesse puramente acadêmico. Quais são os problemas que os planejadores do GARP estão propondo? Quais as respostas que eles esperam obter e de que modo? Como se espera que as respostas a problemas puramente científicos relativos ao comportamento da atmosfera dêem resultados práticos que aumentem de maneira considerável os benefícios da meteorologia como um serviço público? Estas são as perguntas que a presente publicação procurará formular de maneira mais precisa e responder.

## 1.2 - Explicação e Previsão

Como cientista, o objetivo do meteorologista é *entender*, isto é, ser capaz de *explicar*, porque a atmosfera se comporta do modo como ela o faz. Como servidor público o objetivo do meteorologista é ser capaz de *prever* o comportamento da atmosfera durante um dado período de tempo, baseado em informações a respeito de certas características obtidas antes do início daquele período. A pergunta sobre se o atingir-se o primeiro objetivo levaria a realização do segundo não é fácil de responder nem tem interesse puramente acadêmico. Constitue, na verdade o problema central com o qual nos preocupamos.

Aceita-se comumente em ciência que uma explicação de um certo evento não é totalmente adequada a menos que pudesse ter servido como base para prever o evento. Isto constitui parte de um conceito geral designado as vezes como *tese da identidade estrutural da explicação e previsão*, e que contém duas sub-teses: (i) que toda explicação adequada contém uma explicação que pode ser usada para prever o evento, e (ii) que toda previsão adequada contém uma explicação. Consideremos esta tese mais detalhadamente.

Uma explicação científica segue em geral o seguinte esquema:

a) Condições antecedentes, isto é, declarações que afirmam

nam a ocorrência de certos eventos  $C_1, C_2, \dots, C_n$ . Nas ciências físicas, estas declarações contêm uma descrição, em um dado instante do sistema físico ao qual o evento a ser explicado pertence. Esta descrição, por sua vez, inclui valores dos parâmetros que definem o sistema físico naquele instante (condições iniciais) e uma especificação das condições de contorno do sistema.

b) um conjunto de hipóteses universais,  $L_1, L_2, \dots, L_m$ , razoavelmente bem confirmados pela evidência empírica. Nas ciências físicas, elas constituem as leis físicas do sistema.

c) uma dedução lógica (matemática) que leva de (a) e (b) à descrição E do fenômeno a ser explicado.

Este padrão parece ser comum à explicação científica e à previsão. Se E for deduzida antes da ocorrência real do evento que ela descreve, a dedução de E é uma previsão. Se o evento descrito por E já tiver ocorrido e os conjuntos de Cs e Ls forem dados depois, a dedução de E fornece uma explicação do fenômeno descrito por E.

Deve-se acrescentar, desde o princípio, que estamos interessados aqui em teorias de previsão e não em previsão baseada em leis empíricas obtidas por indução, isto é, generalização de casos observados. Quando Galileu obteve as leis de movimento de projéteis ele escre

veu em seus *Diálogos Relativos a Duas Novas Ciências*: "Eu já tinha conhecimento, a partir de relatos de atiradores, do fato de que, no uso de canhões e morteiros, obtem-se o alcance máximo quando a elevação é de  $45^{\circ}$ ....; mas entender porque isto aconteceu ultrapassa de muito a simples informação obtida por meio do testemunho de outros ou mesmo pela repetição do experimento". Além disso, ele salienta que depois de ter compreendido o fenômeno ele podia prever "o que talvez nunca foi observado em experiência, a saber, que dos outros tiros os que excedem ou não alcançam  $45^{\circ}$  por quantias iguais atingem distâncias iguais.

### 1.3 - Previsão de Tempo: Algumas Hipóteses

O esboço acima da estrutura lógica de explicação e previsão não nos permite, mesmo se aceito completamente, dar uma resposta afirmativa ao problema proposto automaticamente sobre se uma compreensão completa da atmosfera nos habilitará a prever seu comportamento. Há duas perguntas importantes que precisam ser examinadas antes de podermos chegar a uma tal conclusão. A primeira questão é geral, isto é, ela diz respeito a todas as explicações científicas. A segunda se refere especificamente ao significado de previsão em meteorologia.

A questão geral se refere ao caráter dos fenômenos a serem explicados ou previstos. Na mecânica clássica (de Newton) dos corpos rígidos, parece claro que toda explicação adequada fornece uma previsão potencial. A explicação de Galileu do movimento de projéteis, a

que nos referimos acima, fornece um bom exemplo. Mas dificilmente a te se pode ser mantida com referência à mecânica quântica. A emissão de u ma única partícula beta por uma substância radioativa não pode ser pre vista porque as leis da mecânica quântica não permitem previsão de even tos individuais. O evento pode, contudo, ser *explicado* depois de ocorri do, isto é, pode-se demonstrar que ele é consistente com leis bem esta belecidas. A identidade estrutural da explicação e previsão manter-se-ia portanto para sistemas *determinísticos*, mas não para sistemas que sejam fundamentalmente não determinísticos. Além disso, a distinção entre ambos os tipos dos sistemas é bastante clara nos casos que se aca bou de mencionar, isto é, a mecânica clássica dos corpos rígidos e a te oria quântica, mas é muito mais complexo em um sistema fluido tal como a atmosfera. Os movimentos atmosféricos, mesmo obedecendo às leis da me cânica clássica e sendo, conseqüentemente, estritamente determinísticos em princípio, apresentam características que os tornam imprevisíveis, de pois de períodos suficientemente longos de tempo, com base em qualquer conjunto possível de observações reais feitas num tempo dado.

A segunda questão exige uma explicação da linguagem usa da pelos meteorologistas. Admitamos que a atmosfera seja um sistema de terminístico e que toda explicação adequada seja uma previsão em poten cial. Isto quer dizer que há leis físicas  $L_1, L_2, \dots, L_m$ , tais que, quan do aplicada a condições iniciais de contorno  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , levariam à pre visão dos fenômenos descritos por E que ocorrerão depois de um inter

valo de tempo  $t$ , e que isto é verdade para todos os fenômenos  $E_i$  e para qualquer intervalo de tempo. Contudo, mesmo isto não daria uma resposta afirmativa ao nosso problema. Permanece ainda a questão de se saber se, para os problemas de previsão meteorológica, o conjunto de condições,  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , constitui realmente um conjunto de observações que po  
de ser obtido através de qualquer sistema de observação meteorológica possível. Deve-se entender aqui a palavra "possível" como "possível na prática" e não somente "possível em princípio" ou "fisicamente possível".

Enfrentamos conseqüentemente dois obstáculos que pode  
riam impedir o progresso em direção da tarefa de prever o comportamento da atmosfera. Podemos ser capazes de entendê-la, isto é, explicar o mo  
do pelo qual qualquer situação de tempo dada se desenvolve como uma con  
sequência de condições prévias bem determinadas e de acordo com leis bem estabelecidas. Mas podemos descobrir que (i) não somos capazes de pre  
ver os movimentos atmosféricos porque eles são imprevisíveis em princí  
prio; ou (ii) podemos prever os movimentos atmosféricos em princípio, mas não podemos conseguir na prática as informações (isto é, observações, me  
didas) necessárias para prevêê-los. Qual é a situação da meteorologia ho  
je com referência a estes problemas?

A prática da previsão do tempo até o presente tem demon  
trado que entendemos razoavelmente bem os fenômenos do tempo, caracterís  
tics das condições meteorológicas nas latitudes médias e altas, e al

guns fenômenos de tempo característicos dos trópicos. Obviamente, o significado desta afirmação depende, por sua vez, do significado da expressão "entender razoavelmente bem". Dizemos que entendemos um fenômeno de tempo se pudermos fornecer uma explicação dos processos físicos envolvidos. A explicação segue, em geral, o esquema dado acima. Por "razoavelmente bem" queremos dizer que a descrição E que obtemos em cada caso no nosso esquema dedutivo, i.e., depois de aplicar um conjunto adequado de Ls a um conjunto adequado de Cs constitui uma descrição "muito aproximada" do fenômeno. Há, contudo, um fator chave a ser considerado antes que o significado da afirmação fique completamente claro: a escala de tempo. Atualmente, o intervalo de tempo entre os Cs (condições iniciais) e o *evento* ao qual se aplica a explicação E, em outras palavras o período útil da validade das previsões de tempo, é da ordem de um dia ou dois. Em casos excepcionais ele pode se estender de três a cinco dias. Para períodos mais longos, os resultados, isto é, a descrição E que se obtém no esquema explanatório, se desvia da descrição real do fenômeno além de limites aceitáveis. Isso tudo quer dizer: (a) que os fenômenos atmosféricos a que nos referimos são previsíveis pelo menos até a uma escala do tempo da ordem de alguns dias; (b) que as explicações que fornecemos são também previsões; (c) que as previsões físicas constituem também previsões práticas, isto é, que as previsões são possíveis com base em sistemas de observação meteorológica em funcionamento hoje em dia.

Tão logo tentamos estender a escala de tempo das previsões, ou aumentar sua exatidão, ou incluir fenômenos que ainda não foram previstos, devem ser considerados seriamente os dois problemas mencionados no início desta seção - previsibilidade em princípio e previsibilidade prática. Os principais pesquisadores das ciências atmosféricas se inclinam em aceitar as seguintes hipóteses:

1 - Que a atmosfera se comporta essencialmente como um sistema determinístico, isto é, previsível em um sentido muito específico, a ser descrito na seção 3.4 por um período de tempo mais longo do que o alcance das previsões de tempo de rotina feitas atualmente pelos serviços meteorológicos mais avançados. Estima-se que o limite superior deste período é pelo menos da ordem de duas a três semanas.

2 - Que uma previsão das condições meteorológicas durante um período de tempo longo, isto é, maior do que alguns dias, realizada de maneira científica, não pode ser feita antes de se obter uma compreensão mais profunda de fenômenos que não podem ser descritos de modo preciso com os dados fornecidos pelos sistemas atuais de observação meteorológica.

3 - Que uma tal compreensão mais profunda pode ser alcançada por meio de pesquisa teórica adequada com base em dados especiais obtidos por meio de experimentos cuidadosamente projetados (isto é, pro

gramas de observação) durante períodos limitados de tempo e em regiões limitadas da atmosfera e seu limite inferior.

4 - Que uma vez que os fenômenos em questão sejam fisicamente compreendidos seria possível encontrar meios para incorporar os processos físicos que eles envolvem em esquemas de previsão que utilizam somente dados obtidos por meio de sistemas de observação que possam realmente ser operados rotineiramente.

5 - Que o método a ser aplicado a estas previsões ampliadas fariam uso essencialmente de modelos matemáticos que simulem de maneira muito aproximada o comportamento da atmosfera real e que possam ser manuseados rapidamente com os computadores eletrônicos mais rápidos atualmente em funcionamento ou em fabricação.

O GARP foi concebido como um programa compreensivo, orientado para testar a validade destas hipóteses. Se for executado com sucesso, ele deve aumentar consideravelmente a nossa compreensão dos processos atmosféricos. Isto pode, em si, justificar os que cultivam a meteorologia como uma ciência pura e cujo objetivo é explicar como a atmosfera se comporta e porque ela faz o que faz. Mas, para o meteorologista prático e para os usuários, os resultados esperados vão muito além da "explicação" dos fatos que ocorreram: o GARP tornará possível saber se - e como - se pode ir de uma explicação física mais profunda para

uma previsão prática mais longa.

A presente publicação tentará esclarecer o significado e xato das hipóteses básicas, bem como suas implicações em termos dos expe rimentos concretos necessários para verificá-las.

## 2 - O QUE DEVE SER PREVISTO

A questão do que tem de ser previsto aparentemente tem uma resposta razoavelmente simples. As mensagens meteorológicas incluem informações a respeito de ventos, temperatura, nuvens e precipitação. Po deria parecer que o meteorologista tem de prever os movimentos atmosfê ricos, a distribuição associada de temperatura e a distribuição de água em qualquer de suas formas (vapor, gotículas, gelo, flocos de neve, chu va). Mas a resposta não é tão clara como parece.

### 2.1 - Movimentos Atmosféricos

Uma das dificuldades principais que os meteorologistas teóricos encontram ao formular um modelo adequado da atmosfera para pre visão do tempo é a nossa incapacidade para especificar a expressão "mo vimentos atmosféricos". O meteorologista teórico visa descrever os movi mentos de ar com equações matemáticas, mas ele não pode na verdade es tar interessado em todas as diferentes espécies de movimentos de ar. Por exemplo, os movimentos produzidos pelo barulho de uma demonstração de

estudantes na rua, ou os que começam pelo atrito de milhares de aviões ou pelo bater de asas de milhares de pássaros são imediatamente desprezados pelo crítico como sendo de escala muito pequena para serem significativos. Mas mesmo alguns tipos de movimentos de escala maior, como os devidos ao aquecimento local ou a obstáculos naturais em uma corrente de vento, não podem ser descritos por um modelo único da atmosfera. Consequentemente, o problema de definir os movimentos *significativos* é da maior importância. Descreveremos estes movimentos em termos gerais.

Para qualquer pessoa familiarizada com os mapas de tempo o significado de sistemas "sinóticos" é bem claro. Ciclones e anticiclones, frentes e ondas, cavados e cunhas, monções e furacões constituem configurações bem identificadas cujos ciclos de vida podem ser seguidos de um mapa para o seguinte. São "entidades" cuja evolução o previsor tem de prever para começar, antes de tentar prever em detalhe os ventos locais, temperatura, etc. Estes sistemas sinóticos possuem tamanhos característicos que vão da ordem de algumas centenas de quilômetros a 5.000 ou 6.000km. Podemos dizer que estas são as configurações significativas de movimento que um modelo da atmosfera deveria ser capaz de descrever e prever. Infelizmente, esta resposta não é suficiente.

Para representar os sistemas sinóticos mais significativos de um mapa precisamos saber o valor dos parâmetros que definem o sistema com certo detalhe. Por exemplo, um sistema característico de

pressão baixa em latitudes médias poderia ser descrito com "exatidão su  
ficiente" dando-se os valores da pressão e da temperatura em pontos se  
parados por uma distância horizontal de algumas centenas de quilômetros.  
Por "exatidão suficiente" queremos dizer que, em nenhum lugar do mapa, o  
valor da pressão ou da temperatura em uma das curvas isobáricas ou cur  
vas isotérmicas, delineados pelo uso de técnicas de interpolação entre  
os pontos em que os valores observados são dados, diferem do valor real  
no lugar correspondente da atmosfera de mais do que um certo valor que  
é considerado como um "erro aceitável". Se estivermos lidando com previ  
são de tempo convencional a curto prazo com base em aplicação razoavel  
mente subjetiva de regras principalmente qualitativas, uma diferença de  
um milibar pode ser considerada como um "erro aceitável" no campo da  
pressão. Mas se estivermos lidando com uma previsão de tempo a longo  
prazo (isto é, da ordem de uma semana ou mais) enfrentamos outros tipos  
de questões complexas. A evolução dos sistemas sinóticos durante tais  
períodos depende da liberação de energia que se encontra presente em  
configurações do movimento que são completamente eliminados quando se e  
com limites dentro dos erros aceitáveis definidos anteriormente.

O problema não pode ser resolvido com a procura de valo  
res mais exatos dos parâmetros e de observações mais próximas no espaço  
e no tempo. Por um lado, precisamos reconhecer o problema prático rela  
cionados com a impossibilidade de se obter observações muito próximas

sobre o globo inteiro ou mesmo sobre um hemisfério. Por outro lado, se fizermos observações muito apertadas no espaço podemos incorporar os movimentos de pequena escala que não constituem movimentos meteorologicamente significativos. Obviamente temos aqui um dilema: se "suavizarmos" os dados para eliminar os últimos, eliminaremos também os primeiros.

Qualquer abordagem racional deste problema exige antes de mais nada, uma formulação precisa dos conceitos "movimentos significativos", "erros aceitáveis" e "suavização de dados atmosféricos", que mencionamos acima. A base desta formulação pode ser encontrada na teoria da análise de Fourier.

## 2.2 - O Espectro dos Movimentos

A velocidade do movimento atmosférico em um dado tempo, latitude e altitude, pode ser expressa como uma função da longitude. Seja qual for o tipo de função, em outras palavras, seja qual for a forma do perfil, a velocidade pode ser representada por uma série de Fourier (isto é, como a soma de curvas senoidais de diferentes comprimentos de onda). Cada componente (isto é, cada curva senoidal) pode ser considerada como um campo de velocidade parcial, de tal modo que a velocidade em cada ponto é o resultado da soma dos valores das velocidades correspondentes a todos os componentes senoidais naquele ponto. Por analogia com a ótica, onde a imagem é formada por raios de luz dispostos em uma série progressiva de acordo com seu

comprimento de onda se chama "espectro de luz". Uma representação semelhante, das componentes de Fourier do campo de velocidades chama-se o "espectro do movimento", sendo que os componentes são referidos como "componentes espectrais". Já que cada um dos componentes pode ser visualizado como uma onda que dá volta a Terra, cada componente deve ter um comprimento de onda tal que o quociente entre o comprimento do círculo paralelo e o comprimento de onda seja um número inteiro. Cada componente pode conseqüentemente ser identificado por este número inteiro, que indica quantas ondas cobrem o círculo paralelo completo.

Uma vez feito isto, pode-se estudar separadamente cada um dos componentes espectrais. Resulta que a evolução de cada componente pode ser seguida como uma entidade que subsiste, cresce ou decresce, e que interage com outros componentes, com permuta de energia cinética. Isto tem conseqüências vastas, sendo que algumas tornar-se-ão claras em capítulos posteriores.

O conceito do movimento total como sendo formado pela adição dos componentes de onda nos permite falar de maneira precisa a respeito de "erros aceitáveis" ou "exatidão exigida". A técnica de Fourier fornece um método para se dar um significado preciso a estes termos, referindo-se eles aos requisitos para a detecção dos movimentos do componente até um certo comprimento de onda que se considera ser o menor que ainda tem influência no campo total do movimento durante o período de

tempo a ser coberto pela previsão.

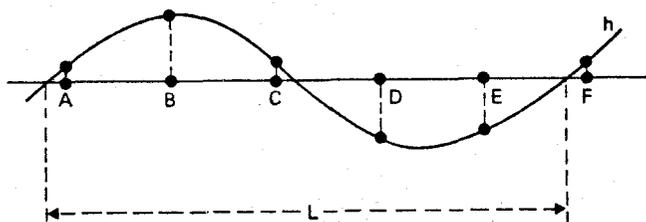
Examinemos agora o significado da suavização dos dados por meio da análise de Fourier. É costume fazer uso do vocabulário da engenharia elétrica. Consideremos uma corrente alternada a que nos referimos como "sinal". A atenuação da amplitude das frequências muito altas, sem afetar os componentes de frequência baixa, é chamada "suavização". A suavização é um caso especial de "filtragem". Os filtros elétricos podem ser projetados de tal modo que somente frequências baixas do sinal podem passar enquanto as altas frequências são atenuadas ou completamente eliminadas (filtro passa baixa). A suavização ou filtragem é feita com a consideração de que as frequências altas são processos aleatórios (chamados "ruído") que não têm nenhum significado ou perturbam a parte do "sinal" que se deseja. Nesta terminologia, a suavização de dados atmosféricos é análoga à filtragem das frequências altas de uma corrente elétrica.

A decisão final a respeito do grau de suavização aceitável, isto é, a seleção do menor comprimento de onda desejável de se medir, seria um compromisso entre considerações teóricas e o problema prático de se obter observações muito próximas em todo o hemisfério. O problema é difícil e não tem uma solução direta. Voltaremos a ele em outros capítulos. Admitamos, contudo, que um compromisso satisfatório tenha sido alcançado. Podemos ser levados a acreditar deste modo que a

tingimos uma solução definitiva do nosso problema. Mas tal não se dá. Permanece ainda um sério obstáculo inerente à apresentação de qualquer campo contínuo por meio de medidas tomadas a intervalos discretos. O fenômeno a que isto se refere chama-se "falseamento".

### 2.3 - "Falseamento"

Vamos admitir que estamos fazendo observações de um fenômeno contínuo a intervalos regularmente espaçados. Admitamos, além disso, que desejamos detectar um componente de comprimento de onda  $L$  e decidimos que esta onda pode ser descrita com exatidão suficiente tomando-se valores a distâncias  $\Delta S = L/5$ .



Observando-se o valor da variável nos pontos A, B, C, D, E e F separados uns dos outros por uma distância  $\Delta$ , não podemos, contudo, estar certos de que estamos medindo os valores que correspondem à onda  $n$ . Há outras ondas, mais curtas do que  $n$ , que poderiam dar exatamente os mesmos valores nos mesmos pontos. Isto acontece, por exemplo, com a onda  $n'$  de comprimento de onda  $L' = L/4$  cujos valores em A, B, C, D, e F, não são distinguíveis dos valores de  $n$ , como pode ser visto no diagrama seguinte em que ambas se encontram superpostas.

de um sistema ótimo de observações não é na verdade possível. As dificuldades podem ser resumidas como segue:

a) Podemos desejar ter uma determinação "muito exata" dos sistemas sinóticos que aparecem nos mapas meteorológicos. Dessa forma, seria necessário pedir que se medisse as variáveis em pontos muito próximos um dos outros. Enfrentamos então três tipos de problemas de natureza completamente diferentes, a saber: (i) a impossibilidade *prática* devida a razões econômicas, geográficas e tecnológicas, de cobrir o globo todo com medidas feitas a intervalos tão pequenos; (ii) a impossibilidade de executar todos os cálculos necessários, em um tempo razoável, com a massa dos dados que resultarão; (iii) a inadequabilidade das ferramentas físico-matemáticas disponíveis para tratar em uma escala global, dados que incluem medidas de fenômenos de escala muito pequena.

b) Somos forçados conseqüentemente a estabelecer um limite inferior para as distâncias entre pontos onde as medidas são tomadas e em seguida encontramos: (i) problemas de falseamento, discutidos acima; (ii) todos os fenômenos meteorológicos de pequena escala são eliminados e não obstante eles desempenham um papel fundamental como fontes e sumidouros de energia para os movimentos de grande escala que estamos interessados em prever.

Enfrentamos conseqüentemente um dilema que não pode ser

resolvido totalmente de modo direto. Veremos que há modos indiretos para atacá-lo. Isto exige que analisemos em primeiro lugar as ferramentas usadas para prever a evolução dos sistemas meteorológicos. Somente então poderemos voltar a estes problemas a partir de um outro ângulo.

### 3 - COMO PREVER

#### 3.1 - Um pouco da história

A história da meteorologia mostra, de maneira vívida, a interação da ciência, tecnologia e as exigências da sociedade. A descoberta de um padrão climático sazonal em grandes partes da superfície terrestre no século dezessete relacionou-se, obviamente, com as primeiras explorações geográficas e subsequente estabelecimento de rotas de navegação. Nos continentes, à medida em que o número de observações, de pressão, temperatura e chuva pelo menos diariamente aumentava, tornou-se possível, no começo do século dezenove, a confecção do que chamamos de mapas sinóticos. Sem dúvida, foram feitas muitas tentativas para estabelecer padrões de desenvolvimento de tempo, mas pode-se dizer que a arrancada da meteorologia moderna como ciência surgiu quando a telegrafia tornou possível o envio de observações sinóticas em uma escala de tempo pequena comparada com a dos próprios fenômenos sinóticos. A rotina de "acompanhamento do tempo" constituiu o reconhecimento de que a atmosfera é um sistema cujo estado em um momento determina - em certo

sentido e até certo grau - seu estado em momentos subsequentes; formu  
lando-se assim, prática e cientificamente, o problema da previsão.

Enquanto as observações se limitavam à superfície da Ter  
ra, o sistema estava determinado de maneira incompleta e chegou-se à  
previsão por meio de extrapolação e outras técnicas análogo-estatísticas  
intuitivas. Contudo, com as ascensões sistemáticas de instrumentos de  
registro em papagaios ou balões recuperados posteriormente, os cientis  
tas tinham em princípio à sua disposição os dados de um sistema determi  
nístico completo e toda a maquinária da física matemática tornou-se de  
repente disponível para sua solução. Isto foi reconhecido em primeiro  
lugar por V. Bjerkness em 1904. Ele formulou o problema de previsão de  
tempo, pela primeira vez, como um problema de valor inicial bem defini  
do em dinâmica de fluidos, sem tornar explícito, contudo, o tipo de e  
quações a serem resolvidas. Isto ele fez alguns anos mais tarde. Uma  
vez que não havia esperança de solução analítica, ele propôs uma série  
de operações gráficas como aproximações das operações matemáticas con  
tidas nas equações do sistema. Uma avaliação mais realista dos requisi  
tos para se manejar os dados observados foi feita por L. F. Richardson  
(publicada em 1922), o qual formulou um sistema de equações surpreenden  
temente igual ao dos modelos mais avançados de hoje, juntamente com as  
técnicas para sua solução. Isto envolve a avaliação das derivadas das  
equações dinâmicas, num sistema tri-dimensional de pontos coordenados,  
comumente chamado grade.

Contudo, as pesquisas de Bjerknes e Richardson foram, isolados e sem influência imediata, porque a tecnologia estava atrasada neste ponto em dois aspectos. Primeiro, não havia observações de rotina em altitude e, em segundo lugar a quantidade de dados que tais observações forneceriam, não poderia, dentro dos domínios da praticabilidade, ser manejados sistematicamente por mãos e cérebros humanos da maneira prescrita por Richardson. Mas a tecnologia não ficou atrás por muito tempo: as observações de rotina da atmosfera superior por meio de radiosondas foram introduzidas em meados da década de 1930, e a expansão da rede recebeu grande ímpeto durante a Segunda Guerra Mundial, e o desenvolvimento de computadores eletrônicos começou sua incrível aceleração durante os últimos anos da década de 1940. Os meteorologistas deviam ter como ponto de honra a aplicação imediata desta nova capacidade ao problema da previsão, feita pelo grupo Von Neumann - Charney, bem como, o estabelecimento por volta de 1956 da previsão numérica em base operacional.

Certamente, neste começo foram empregados modelos físicos muito mais simples do que os de Richardson e Bjerknes. Esta circunstância foi ditada pela capacidade dos primeiros computadores, mas de qualquer forma era o caminho apropriado para se prosseguir. Nos primeiros anos de previsão o modelo aplicou simplesmente o princípio da conservação da vorticidade ao nível de 500 mb (5,5 km). Na literatura meteorológica, isto é referido como "previsão barotrópica". Isto não era,

afinal, tão diferente do deslocamento e ajuste da intensidade dos ciclones e anticiclones feitos no mapa do tempo e, na verdade, a diferença entre previsões feitas pela máquina e pelo homem durante este período não foi maior do que suas diferenças em relação ao mapa de controle. Além disso, havia falhas óbvias. Não se podia obter do sistema mais do que havia sido colocado nele - isto é, as alturas da superfície de 500 mb. E um esquema que não permite a ciclogênese está fadado a falhar dentro de pouco tempo.

### 3.2 - Técnicas e Problemas Correntes

Dessa forma, o anseio científico de entender e a necessidade prática de prever colocou a meteorologia face a face com o problema formulado originalmente por Richardson. Um pouco modificado pelas concepções e terminologia contemporâneas, isto pode ser afirmado, de maneira breve, como segue. O que desejamos prever são as mudanças no estado presente da atmosfera, sendo que as leis físicas para prevêê-las se encontram disponíveis. As leis são aplicadas a uma entidade um pouco arbitrária chamada "parcela de ar" que pode ser considerada como um volume de ar bastante pequeno a fim de que suas propriedades possam ser consideradas constantes em um dado instante. Acontece que a atmosfera da Terra constitui uma casca fina, de modo que os movimentos em qualquer escala horizontal considerável são hidrostáticos (isto é, a força de pressão vertical quase equilibra a gravidade). A rotina de previsão se

processa como segue.

A taxa de variação da quantidade de movimento  $\bar{e}$ , de acordo com a lei de Newton, igual ao equilíbrio das forças de pressão, Coriolis e atrito. Estas forças podem ser determinadas a partir de, somente, observações correntes da pressão (ou altura de uma superfície de pressão) e velocidade, podendo dessa forma computar-se a variação. Como temos um erro pequeno ao computar a pressão a partir da equação hidrostática, a qual exige somente conhecimento da temperatura. A temperatura, por sua vez, pode ser computada a partir da primeira lei da termodinâmica, uma vez dados o movimento vertical e o aquecimento diabático. Finalmente, a velocidade vertical  $\bar{e}$  computada pela integração vertical da equação de continuidade. As mudanças no conteúdo do vapor da água são computadas com base no fato de que a substância da água na parcela  $\bar{e}$  conservada, exceto quando ocorrer precipitação. Neste ponto, cada quantidade avançou um intervalo de tempo, podendo o processo ser repetido. O procedimento total parece ser notavelmente claro. simples mesmo; e na verdade, como a maior parte dos conceitos, ele  $\bar{e}$  realmente assim. Havia, contudo, duas áreas nas quais sérios problemas surgiram e a consideração deles nos levará à "raison d'être" do GARP.

*O primeiro conjunto de problemas que teve de ser enfrentado foi o associado com a formulação das equações em termos de diferenças finitas. A relação entre a solução de uma equação diferencial e a de sua aproximação com diferenças finitas constitui um problema matemá*

tico complexo. Sabia-se já que se usarmos um intervalo de tempo muito grande pode resultar uma instabilidade, chamada de instabilidade computacional, uma vez que não é uma propriedade das equações exatas. Isto pode ser evitado usando-se um intervalo de tempo que pode parecer, sob o ponto de vista físico, absurdamente curto. Dificuldades muito mais sérias surgiram do truncamento do espaço. O fenômeno de falseamento mencionado acima (página ) é tão relevante para a previsão quanto para a representação, uma vez que um sistema não linear criará energia em ondas curtas mesmo que não houvesse nenhuma no início. Esta energia é então ficticiamente atribuída às ondas longas e aparece como uma instabilidade. Os vários dispositivos engenhosos para controlar este efeito são complexos demais para se discutir aqui, como também o são os muitos outros problemas que podem estar associados com qualquer esquema de diferenças finitas. Foram dispendidos esforços prodigiosos na formulação e programação destes esquemas, que não podem ser apreciados totalmente, olhando-se somente os resultados.

É importante notar neste ponto que a modelagem do fluxo de grande escala, como a maioria dos outros fenômenos hidrodinâmicos, tem sido sempre limitada pela capacidade da geração de computadores em uso. Somente agora os problemas verdadeiramente tri-dimensionais estão sendo atacados pelos métodos computacionais, de modo que podemos considerar uma circunstância feliz o fato de que o equilíbrio hidrostático a proximado da atmosfera permite uma resolução relativamente grosseira. Mesmo com, digamos, dez superfícies de malha na vertical e o equivalen

te de um ponto de malha para cada três graus de latitude e longitude do globo, resulta um total de 56.000 pontos da malha, o que, com o resto do programa, sobrecarrega a capacidade dos computadores atuais.

Este não é um ponto puramente técnico. Encontramos aqui, imediatamente, os problemas e o dilema salientados em 2.4 acima, e que analisaremos mais detalhadamente.

Uma resolução horizontal de três graus de latitude não de importância no desenvolvimento do sistema de tempo

Mas esta questão de resolução nos leva diretamente ao *segundo conjunto de problemas* que os sistemas de previsão enfrentam, a maioria dos quais se encontram longes de serem resolvidos. A impressionante simplicidade do programa computacional delineado acima disfarça deficiências severas em nossa habilidade para fornecer *entradas adequadas para os modelos numéricos* da sofisticação agora corrente.

Em primeiro lugar, é absolutamente impossível continuar a fingir que podemos definir um estado inicial realista do sistema atmosférico. Mesmo na era da previsão barotrópica ficou evidente que esta vamos prevendo mudanças a partir de um mapa de 500 mb inicial imperfeitamente conhecido. Importava pouco então, quando somente um processo físico simples estava sendo incorporado no modelo. Agora que os modelos

são, ou serão, tão completos quanto saibamos fazê-los, o maior obstáculo ao aperfeiçoamento adicional passou a ser (subitamente) os grandes vazios em nossos dados observacionais. Já que dois terços da superfície da Terra são constituídos de água e que cerca de dois por cento das radio-sondas não se encontram baseadas em terra, é evidente que o preenchimento destes vazios não constitui de maneira alguma uma extensão trivial ou direta dos métodos presentes.

Em segundo lugar, precisamos nos perguntar: quais são as entradas que desejamos idealmente? Por causa das limitações do computador é inútil dar uma resposta tal como "observações a cada hora em cada quilômetro cúbico da atmosfera". (Devemos portanto considerar o problema do que fazer com os dados uma vez obtidos). Além disso, fora do problema da resolução, a forma da representação das entradas físicas heterogêneas ou forçantes - contorno, fontes e sumidouros de energia no contorno ou internos - ainda está por ser determinada de maneira satisfatória. Estamos lidando aqui com processos físicos que não entendemos realmente, e que não podemos portanto representar matematicamente com confiança.

Como um exemplo conjunto de fontes de energia e movimentos de sub-escala de malha, consideremos uma corrente de ar continental fria sobre a superfície quente do oceano. A energia, na forma de calor (sensível e latente) e a humidade são transportadas através da interface. Estes fluxos, que podem ser relativamente uniformes na interface, se

tornam fortemente concentrados nas colunas convectivas dos cumulus. Das partes mais altas destas colunas é emitida radiação para o espaço, o que pode ser ou não um fator em sua desestabilização e crescimento contínuo. Processos mecânicos transportam quantidade de movimento para a superfície do mar com uma taxa dependente da taxa de variação da temperatura na vertical e da irregularidade da superfície, mas que afetam, por sua vez, a ambos. A escala de todos esses processos é ordens de magnitude menor do que a resolução da rede de malha numérica, e é evidente ainda, que ao alterar a variação da temperatura na vertical, incrementando a umidade, etc., eles estão influenciando os movimentos de grande escala de um modo que não pode ser determinado pelo esquema de previsão. Na verdade, por causa da premissa básica do esquema de que o intervalo da malha da rede constitui uma distância apropriada para derivadas, uma tentativa direta para incorporar estes efeitos de pequena escala destruirá eventualmente a previsão. Dessa forma, eles precisam ser introduzidos e representados de modo que faça sentido físico. Não sabemos como fazer isso - em parte, pelo menos, porque não tem havido suficientes experimentos que dêem informação quantitativa.

Neste ponto é conveniente fazer um levantamento sistemático muito breve das três áreas do problema principal relacionadas com a interação entre movimentos de escalas diferentes. (a) Um requisito óbvio de todos os modelos de fluxo de larga escala é a representação adequada dos *sumidouros de energia*. O solo é uma superfície sólida e o ar é um fluido em contato com ele, que se move em relação a ele. A atmosfe

ra tem, conseqüentemente, uma camada limite, mais complexa do que a de um túnel de vento por causa da rotação e esfericidade da Terra. Para fins deste relatório, a camada limite planetária pode ser considerada como tendo cerca de um quilômetro de espessura. Encontra-se em um estado de turbulência completa e, como no túnel de vento, constitui uma camada na qual a taxa de dissipação da energia cinética é muito alta. Conseqüentemente a camada limite não pode ser ignorada neste contexto, mas a dinâmica desta região é muito diferente da expressa pelas equações do modelo. Os processos primários são aqueles que transportam quantidade de movimento atmosférico verticalmente para a Terra e trocam calor e vapor de água com ela - processos que exercem uma influência controladora sobre a circulação em grande escala.

Na maioria das vezes, a teoria atmosférica da camada limite postula uma rugosidade superficial uniforme e uma atmosfera estratificada de maneira neutra. Mas, na verdade, os problemas mais difíceis surgem da natureza mutável da camada limite, isto é, do fato de que não se pode considerá-la em geral em um estado estacionário. As modificações a serem introduzidas para levar conta as homogeneidades da superpesquisa. Quando a "rugosidade" de superfície for da ordem da altura da própria camada limite (por exemplo, uma montanha), surge um fenômeno inteiramente novo, a onda a sotavento, cuja dinâmica não é nem a do modelo nem a da camada limite, e que possui um mecanismo de pequena escala próprio para transportar quantidade de movimento para a Terra a partir

de níveis troposféricos ou mesmo estratosféricos. Não se conhece o suficiente a respeito de todos estes processos, e muito menos a respeito de sua incorporação nos modelos de previsão.

Além disso, está se acumulando evidência de que a atmosfera livre abriga muitos fenômenos de estrutura fina, dentre os quais a turbulência de ar claro tem recebido mais atenção. O mecanismo ou mecanismos precisos de instabilidade operando na atmosfera livre, especialmente próximo do nível da corrente de jato, não foram identificados com certeza, mas a dissipação de energia nestes processos não pode ser ignorada. (b) *convecção e a fonte tropical de calor*. A troca de calor por meio, digamos, da subsidência nos anticiclones sub-tropicais ou pelo transporte por uma tormenta de ar frio para o sul e ar quente para o norte - estes processos são muito bem representados pelas equações de previsão de larga escala. Eles envolvem precisamente a dinâmica que as equações foram formuladas para representar.

Por outro lado, temos evidência visual, confirmada por medidas, de que grandes quantidades de calor e de umidade são transportadas para a troposfera superior e estratosfera pelas grandes correntes ascendentes nos cúmulos e cúmulo-nimbos.

Um problema aqui é que a convecção pode ocorrer em várias circunstâncias, que provavelmente exigem estudo e experimentação separados. Há convecção sobre uma superfície aquecida, como nos cúmulos

de verão em áreas terrestres. Estes cumulos, podem se encontrar organizados em linhas de trovoadas. Incluídas nas áreas de convergência ciclônica dos ciclones extra-tropicais se encontram colunas convectivas, e a precipitação total dependerá grandemente do número e intensidade destes. Os cumulos dos aliseos e os estratus oceanicos cobrem grandes áreas subtropicais e embora não sejam muito intensos e não alcancem grandes alturas, são responsáveis por uma considerável troca de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água com a superfície do oceano, e a radiação de suas partes superiores pode afetar decisivamente a dinâmica da grande escala. Finalmente, na grande fonte de calor e umidade dos oceanos tropicais, a situação é ainda mais complexa. Aqui o aquecimento da superfície não pode ser considerado como a fonte propulsora e os cumulos se juntam em áreas de convergência de meso-escala. O mecanismo de sua formação não é compreendido, nem seu papel na gênese de tormentas tropicais. (c) Uma outra área essencial de conhecimento é a da interação atmosférica com o oceano. Sem dúvida os modelos de previsão do futuro próximo terão de tratar os oceanos e a atmosfera como um sistema único. As transferências de quantidade de movimento, calor e umidade através da interface são naturalmente bastante diferentes dos processos correspondentes sobre terra e, além disso, os dados oceanográficos são extremamente pobres.

A escala da interação pode variar desde efeitos pequenos, como na geração de ondas de superfície pelo vento, até efeitos globais de mudança climática. Uma pesquisa recente indica que anomalias na tem

peratura da superfície do oceano podem se refletir em anomalias sazonais de configurações atmosféricas em lugares bastante distantes. Isto tornou a incorporação dos efeitos oceano-atmosfera ainda mais imperativa para qualquer modelo sério de previsão.

### 3.3 - A Incorporação dos Efeitos de Pequena Escala nos Modelos de Previsão

Cabem aqui algumas observações para explicar o problema das escalas de movimento no contexto presente para os não familiarizados com métodos numéricos, mesmo com o risco de super-simplificação. Como se viu acima, o esquema de previsão de larga escala usa a equação hidrostática, o que é inteiramente apropriado para sua escala de malha de 300 quilômetros mais ou menos, sendo que este sistema nunca poderia dar origem a, digamos, convecção de cúmulos ou ondas de montanha a sotavento, ambas fundamentalmente não hidrostáticas, possuindo escalas típicas de cinco quilômetros. Os movimentos verticais destes fenômenos são duas ordens de grandeza maior do que nos ciclones de larga escala (metros por segundo em comparação com centímetros por segundo).

Estes fenômenos não hidrostáticos são suscetíveis de serem computados. E isto tem sido feito com sucesso por esquemas apropriados de previsão, usando intervalos de tempo e espaço menores, e estas computações exigem tanta capacidade de memória do computador quanto os modelos de circulação geral. Dado o desenvolvimento

da tecnologia do computador durante os últimos 20 anos, seria temerário prever que nunca poderíamos computar ambas as escalas em um programa único.

Quando se está computando um fenômeno de pequena escala, o fluxo de larga escala entra como uma constante ou com uma variação lenta. Por exemplo, uma corrente de ar com uma certa velocidade e um certo perfil de temperatura flui sobre uma montanha, computando-se o fluxo perturbado resultante. Esta corrente básica pode ser devida a um ciclone de grande escala que esteja se movendo para o oriente. O movimento do ciclone não pode ser computado; ele deve ser dado, ou simplesmente ignorado durante as duas horas mais ou menos que a onda de sotavento leva para se desenvolver. Isto é simples de se entender.

É mais difícil levar em consideração os movimentos da escala de sub-malha quando estão sendo computados parâmetros na escala grande. Estamos acostumados a pensar no efeito estatístico, por exemplo, do movimento browniano de Brown sem, naturalmente, seguir-se o movimento de cada molécula. Contudo, a situação que enfrentamos neste relatório é muito mais complexo do que aquela. Em primeiro lugar, o movimento de larga escala pode determinar ou afetar o de pequena escala: se não houver nenhuma corrente contra a montanha, não haverá nenhuma onda a sotavento; se houver forte subsidência, a convecção fica inibida. E, por sua vez, o movimento de pequena escala (pequeno na escala mas de nenhuma forma em magnitude) afeta a grande escala: a onda a sotavento reduz a velo

cidade do fluxo de larga escala, transportando-o para a terra, e a con  
vecção aumenta a temperatura e a umidade dos níveis superiores às cus  
tas dos inferiores.

Dessa forma, a tarefa pode ser representada como segue:  
O movimento de larga escala, a qualquer momento na computação, constitui o pano de fundo para fenômenos da escala de sub-malha determinados por aquela situação sinótica particular. Estes fenômenos de pequena escala, determinados dessa forma, estão produzindo realimentação para a grande escala. A média destes efeitos na grande escala de malha, deve ser in  
troduzida quantitativamente no esquema de previsão quando se avança de um intervalo de tempo para o seguinte, incorporando os efeitos médios dos movimentos de pequena escala, mas sem computá-los detalhadamente. Se  
gue-se que precisamos entender perfeitamente a dinâmica dos movimentos da escala da sub-malha para obter seus efeitos médios. Se a situação si  
nótica for favorável à convecção de cúmulos em uma grande região, de que modo a variação da temperatura com a altura - transformada em média em um grande quadrado de malha - será mudada pela convecção? Deve-se de  
terminar uma expressão quantitativa para isto em termos do fluxo de gran  
de escala. Este processo é chamado de parametrização do efeito de peque  
na escala.

Os modelos de previsão exigem atualmente técnicas de pa  
rametrização muito mais efetivas e refinadas, e cobrindo uma gama muito maior de fenômenos.

### 3.4 - Os Limites da Previsão

Admitamos por enquanto que o GARP tenha sido completado com sucesso e que seus resultados tenham sido incorporados em uma compreensão tão profunda e um esquema de previsão tão completo quanto seja possível em nossa geração. O que podemos esperar de tudo isto em termos de "resultados"? Para esta discussão podemos deixar de lado o incremento na qualidade e na exatidão das previsões, devido à maior densidade e extensão da rede de obtenção dos dados. Esta melhoria na previsão pode ser considerável e seria interessante tentar estimá-la, mas ela não constitui o objeto principal deste relatório.

Dentro de todas as previsões acima, temos ainda três fontes principais de erros. Uma se encontra nos valores da entrada das variáveis dependentes - alturas das superfícies de pressão, temperatura, etc. Isto pode resultar de erro instrumental ou da interpolação nos pontos da malha no processo de fazer a análise objetiva das observações.

Um segundo problema é a parametrização dos fenômenos de escala menor. Isto é por definição um procedimento estatístico e não pode, mesmo teoricamente, ser considerado como exato. O terceiro problema é o próprio esquema de previsão, que constitui uma aproximação em forma de diferenças finitas ao conjunto das equações primitivas. Estes erros, chamados "erros de truncamento", tanto aleatório como sistemáticos, podem ser em princípio reduzidos por um aumento no grau das aproximações.

Nossa pergunta é a seguinte: o que acontece aos erros ? Eles permanecem com a mesma magnitude ou, à medida que a previsão prossegue no tempo, crescem até esconderem a previsão "verdadeira" ? Trata-se de uma pergunta difícil de responder. Pode-se pensar, em princípio, que à medida em que a computação prossegue os erros serão eliminados pela suavização dos resultados. Mas este raciocínio não leva em conta duas propriedades da atmosfera, de tal maneira básica que todos os modelos deverão incorporá-las. Uma é a instabilidade ou mais precisamente várias espécies delas; a outra é a não linearidade das equações fundamentais. Obviamente, em um sistema que permita instabilidade, os erros crescerão tanto quanto crescerão os dados válidos. A não linearidade é importante porque em um sistema não linear os componentes de onda interagem para formar novas ondas e os espectros dos campos mudam em cada passo de tempo da previsão. Se pensarmos em erros concentrados principalmente nas escalas menores, nas quais a rede de grande escala não resolve os movimentos, segue-se que estes erros não permanecerão na pequena escala. Ao invés, eles interagirão com o fluxo de grande escala que estamos tentando prever e pela distorção do espectro verdadeiro, invalidarão a previsão. Esta é uma declaração a respeito do modelo. Há uma pergunta precisamente análoga, feita muitas vezes a respeito da própria atmosfera: pode o esvoaçar das asas de uma borboleta no Rio de Janeiro mudar o tempo em Bombaim ? ou de maneira um pouco mais realista, os testes nucleares atmosféricos tiveram um efeito mensurável sobre a configuração do fluxo em grande escala ?

Não há dúvida de que a instabilidade e a turbulência (interação não-linear forte) têm os efeitos descritos na atmosfera e nos modelos de previsão. Mas precisamos saber até que tamanho o erro chegou depois de um dado intervalo de tempo. Referimo-nos a isto como o problema da previsibilidade da atmosfera. Está sendo estudado por técnicas matemáticas, muito complexas para serem discutidas aqui, bem como por experimentos numéricos. Estes tomam a seguinte forma. Entra-se com os dados observados em um modelo, e faz-se uma previsão a longo prazo. Em seguida, um erro aleatório, digamos, na temperatura, é acrescentado ao valor inicial de cada ponto da malha, repetindo-se a previsão toda. Nos modelos existentes, as duas previsões ficam razoavelmente próximas uma da outra durante cerca de uma semana, e bastante separadas depois de três semanas. Uma vez que os próprios modelos representam ainda somente de maneira incompleta a física das influências atmosféricas, estes experimentos são indicativos mas não conclusivos. Atualmente, chegamos até este ponto na determinação da previsibilidade da atmosfera.

Naturalmente, a previsão de prazo muito longo e climática não são a previsão de um mapa de tempo de um certo dia, mas o objetivo é a obtenção de certo conjunto de estatísticas - o campo médio da pressão no inverno, por exemplo. Os modelos existentes podem reproduzir um tal campo médio, por exemplo, embora seus mapas de previsão convencionais sejam muitas vezes inexatos depois de 72 horas. As perguntas referentes à previsão a prazo muito longo e climática precisam ser formuladas de maneira precisa para ter significado, e este trabalho se encontra

em sua infância. Um objetivo principal do GARP é fornecer dados que ve  
nham a maximizar a validade e utilidade desta pesquisa.

#### 4 - DE QUE SE NECESSITA

##### 4.1 - Sistemas Globais de Observação

Neste ponto, é conveniente recapitular os requisitos dos esquemas de previsão a longo prazo. O primeiro é um sistema de observa  
ção global com resolução de larga escala, que aumentaria e melhoraria a rede sinótica existente. O segundo é uma compreensão maior dos fenôme  
nos de pequena escala, e seus efeitos de realimentação sobre o fluxo de grande escala. Isto deve ser conseguido por meio de experiências de cam  
po, bem como, através de análise.

Os dois requisitos sã podem ser atingidos por meio de grandes empreendimentos, essencialmente internacionais em carater, e é para implementá-los que o GARP foi estabelecida. Ambas as categorias de programas observacionais são parte da GARP, que é uma tentativa integra  
da para melhorar a compreensão científica e a previsão prática.

A necessidade de melhor cobertura de dados é tão ampla  
mente aceita que não nos estenderemos mais sobre ela aqui, mas podemos insistir na ênfase sobre a palavra "global". Sem considerar os benefi  
cios locais para regiões próximas a áreas anteriormente sem observações,

o ponto importante é que o esquema de previsão relaciona cada parte da atmosfera a todas as outras partes, e quanto maior o tempo da previsão, tanto mais extensa a interação. Os dados globais são absolutamente es s enciais para a circulação geral e a previsão climática.

Além disso, a pergunta "qual é o sistema de observação global ótimo?" não é fácil de se responder, tendo-se em vista os pro blemas discutidos na seção 2.4. Na verdade, um objetivo importante do GARP é fornecer informação sobre a qual sua resposta possa se fundamen tar. Há alguns problemas adicionais que podem ser discutidos aqui de ma neira breve.

Em primeiro lugar, muitas técnicas instrumentais novas ou relativamente novas estão agora disponíveis para uso em um sistema de observação. As considerações de custo-efetividade entram aqui, e to da a área foi submetida a planejamento e pesquisa extensivos. Obviamen te, as técnicas de satélites desempenharão um papel extensivo; por exem plo: sondagens (infra-vermelho e micro-ondas) para determinar a tempera tura e o perfil de vapor de água, observações de cobertura de nuvens, computação de ventos pelo movimento de nuvens, rastreamento de balões de altitude controlada. Não é possível dar aqui uma idéia do alcance surpreendente da nova instrumentação ora considerada; isto será coberto em publicações posteriores do GARP. A menção de satélites e balões tra çadores revela contudo um aspecto importante: seja qual for o sistema a dotado, muitas observações serão contínuas e o conceito de sinótico, no

sentido de conjunto simultâneo de observações não é mais relevante agora. O conceito que o deve substituir foi denominado "assimilação de quatro dimensões". Em vez de computar de uma hora de observação sinótica para a seguinte, o esquema de previsão deve poder assimilar partes arbitrárias de informação em tempos arbitrários durante sua integração. Esta nova informação pode se encontrar em discordância com dados próximos - que não serão em geral simultâneos com ela - de modo que surgirá a necessidade de interpolação um tanto ou quanto complexa e de rotinas de suavização em espaço tri-dimensional e em tempo. O procedimento de previsão torna-se dessa forma uma operação contínua.

Um outro problema embaraçador para um sistema global de observações é o de cobertura na vertical. As técnicas instrumentais que atualmente são básicas para o sistema existente - balões, sensores de pressão e de temperatura - tem um limite efetivo de cerca de 30 km (12 mb). Há, naturalmente, uma rede esparsa de foguetes meteorológicos, que estende este limite até mais ou menos 60 km (0.2 mb) mas esta claro que qualquer tentativa para estabelecer um teto acima de 30 km para o sistema global de observações exigirá desenvolvimento instrumental extensivo e caro. Além disso, pode-se argumentar que os dados de um por cento da massa da atmosfera superior não podem ser essenciais para o desenvolvimento dos modelos de previsão dinâmica, que constitui a finalidade central da GARP. Por outro lado, a região acima de 30 km, e especialmente a camada D (60 - 100 km) é a menos explorada da atmosfera. Os aquecimentos do inverno das regiões polares a partir de 25 km para cima consti

tuem um fenômeno que tem atraído muita atenção, e talvez sejam necessá-  
rias observações estratosféricas e mesosféricas para sua compreensão.  
Hã evidência, obtida na ionosfera, indicando que há também muitos fenô-  
menos de escala menor de interesse nestas regiões. O problema da exten-  
são vertical do sistema de observação global se encontra ainda sob con-  
sideração.

Os problemas muito difíceis associados com a resolução  
necessariamente grosseira do sistema de observação global já foram dis-  
cutidos. Eles nos levam naturalmente a uma consideração da segunda cate-  
goria de programas de observação patrocinados ou associados com o GARP.

#### 4.2 - Experimentos de Escala Menor

Seria fora de propósito descrever aqui em detalhes os ex-  
perimentos planejados ou sugeridos para o GARP; eles serão objeto de fu-  
turas publicações do GARP. Contudo, as discussões acima talvez adquiram  
mais sentido se mencionarmos os tipos de dados que devem ser obtidos e  
o modo como seriam usados. É neste ponto que a diferença entre estes  
experimentos e o sistema global de observações torna-se mais aparente.

Os experimentos destinados a melhorar os modelos de pre-  
visão por meio da parametrização dos fenômenos na escala da sub malha  
devem necessariamente ser experimentos de escala média, que exigem sis-  
temas especiais de observação. Nem podemos projetar uma rede de escala

média para todos os experimentos, uma vez que serão feitas diferentes perguntas relativas aos diferentes fenômenos.

Consideremos, por exemplo, um experimento que se relaciona com a convecção de cúmulos. Um requisito fundamental a saber é onde se encontram e qual é a altura das nuvens e onde se acham os espaços claros, à noite, bem como durante o dia. Para tanto, é claramente indicado o sensoriamento por meio de infra-vermelho a partir de satélite, com uma resolução prescrita. Este tipo especial de sondagem teria uma prioridade muito inferior em, digamos, uma investigação das ondas de gravidade e turbulência de ar claro. Por outro lado, em ambos os fenômenos é da maior importância medir com grande exatidão o movimento vertical, de modo que se precisa aeronaves com instrumentação adequada. Uma vez que os fenômenos de escala menor devem ser relacionados com a situação sinótica, uma região com uma boa rede sinótica deveria ser selecionada, se possível. Faz-se então, dois conjuntos de perguntas a respeito de cada experimento.

a) O primeiro conjunto será familiar ao previsora sinótica: **quais são**

**ção sinótica ? Seguem-se alguns exemplos.**

(i) O cúmulo tropical está associado principalmente com configurações de convergência de nível baixo ou alta ? Os campos de divergência devem ser cuidadosamente medidos para se responder isto, exigindo-se extrema exatidão dos ventos, possivelmente

mesmo maior do que pode ser obtido por meio dos métodos de ob  
servação existentes;

(ii) Quão essencial é o papel da estabilidade ou instabilidade es  
táticas na formação de conjuntos de cúmulos tropicais ? Aqui  
a exatidão e a resolução vertical e horizontal das medidas de  
radio-sonda ou "drop-sonda" devem ser maiores do que as da re  
de sinótica;

(iii) A turbulência de ar claro é definitivamente uma instabilidade  
de produzida nas cortantes fortes do vento ? Qual é o papel  
das ondas de montanha em sua produção ? O requisito aqui é  
de um número considerável de aeronaves instrumentadas, fazen  
do passagens horizontais com sondagens de alta resolução pa  
ra dar dados entre estes níveis.

(b) O outro grupo de perguntas seria menos familiar em caráter e deve-  
se dessa forma tomar cuidado para não ignorá-las ao projetar os ex  
perimentos. Estas tomam a forma: qual é o efeito dos fenômenos de  
escala menor sobre o fluxo de escala sinótica ? Seguem-se exemplos:

(i) Qual a quantidade de calor latente liberada por um conjunto  
de cúmulos ? Qual é o movimento vertical médio no conjunto ? As  
respostas para tais perguntas são essenciais a uma modelagem  
numérica do fluxo de grande escala, e para uma compreensão do

papel dos trópicos na circulação geral. Além disso, elas revelam a magnitude do experimento exigido, uma vez que é claro que a investigação dos cúmulos individuais nunca podem fornecer respostas;

(ii) Ambos uma pequena linha organizada de cúmulos nimbo, e uma forte onda de montanha, transportam quantidade de movimento para baixo, isto é, aumentam o arrasto da Terra na atmosfera. Espera-se que o fluxo de grande escala seja afetado de maneira apreciável por este aumento, mas o efeito deve ser expresso de maneira quantitativa. Estas informações podem ser obtidas de medidas de ventos de alta resolução com aeronaves e "drop-sondas" (Obviamente a rede sinótica é inadequada para esta finalidade);

(iii) A existência de turbulência de ar claro significa que há dissipação de energia, isto é, a energia cinética está se transformando em calor. O efeito quantitativo desta dissipação na grande escala deve ser avaliado. Para isto, a *estrutura* da turbulência deve ser conhecida, bem como a extensão e as circunstâncias de sua ocorrência. Novamente, as observações por meio de aeronave são essenciais, embora seja desejável também o uso de métodos indiretos de medida.

A discussão dos experimentos acima limita-se, de propósi

to, a aspectos mais simples dos problemas e técnicas; ela não dá nenhuma indicação do alcance do projeto do experimento, nem da sofisticação da instrumentação. Uma apreciação verdadeira deste grupo de programas do GARP deve esperar os relatórios mais detalhados.

Além disso, para dar uma idéia um pouco mais concreta dos experimentos do GARP, somente algumas áreas de investigação foram mencionadas. Nos relatórios apropriados, e em época oportuna, serão discutidos os experimentos que envolvem a inversão dos aliseos, a camada limite planetária e a área muito grande e importante da interação oceano-atmosfera (durante períodos de tempo curtos e longos), que são, naturalmente, de grande importância.

#### 4.3 - Um Programa Integrado de Pesquisa: GARP

Estamos agora em posição de unir as várias atividades do GARP a que nos referimos anteriormente e ver o programa como um todo.

O aspecto principal a ser ressaltado aqui é de que o GARP é um programa integrado, com um conjunto geral de objetivos, e com cada aspecto do programa relacionado com estes objetivos. Os próprios objetivos são científicos por natureza. Aqui marcham lado a lado a compreensão e a previsão: não é possível melhorar e estender as previsões ou controlar o clima sem entender os fenômenos físicos envolvidos; nem podemos adotar qualquer outro padrão que não seja a concordância da pre

visão com a natureza para testar definitivamente as hipóteses científicas.

Dentro deste programa integrado, salientaremos os seguintes aspectos fundamentais:

*primeiro*, precisamos projetar e *implementar um sistema global de observações* com características especiais para o GARP. Isto é ditado pelas necessidades *a priori* dos modelos de previsão, e limitado pela capacidade dos modelos disponíveis, bem como por considerações mais práticas. Todas as técnicas exequíveis de aquisição de dados estão sendo consideradas. Ao mesmo tempo, a pesquisa com modelos numéricos indicará se as estimativas *a priori* dos requisitos de dados estavam corretas, a fim de que os ajustes possam ser feitos de acordo.

*segundo*, há os *experimentos de pequena escala*, projetados para fornecer conhecimento sobre o qual um sistema deve ser baseado para incorporar os efeitos dos fenômenos desta escala nas equações de previsão. Aqui alguns dos experimentos serão internacionais em sua natureza e organizados dentro da estrutura WMO/ICSU, mas muitos serão projetos de pesquisa patrocinados por países, com seu projeto formulado de modo a contribuir para o programa total do GARP. Como um dos resultados importantes destes experimentos, espera-se que eles contribuam para um aperfeiçoamento muito necessário de nossa habilidade para especificar os fenômenos de escala menor a partir da configuração sinótica - isto é, prevê-los com

base nos mapas de previsão. Uma outra contribuição, como a descrita acima, será prover a base física e os dados dos quais se pode deduzir uma descrição quantitativa do efeito de realimentação sobre a circulação de grande escala. Deve-se pensar a respeito deste aspecto do programa como continuando durante uma década ou mais, com experimentos sendo projetados e executados a medida em que foram necessitados, e nos quais nem se pensa atualmente.

*finalmente*, no centro das atividades do GARP encontra-se a *computação de previsão* dos modelos teóricos em computadores digitais eletrônicos de alta velocidade. O sistema global de observações fornece dados de entrada; os experimentos de pequena escala fornecem as informações sobre as quais certas características muito importantes dos modelos são elaboradas.

A palavra "modelos" foi usada no plural. Mesmo com toda a teoria desenvolvida agora e experiência adquirida, não é possível de terminar *a priori* qual será mais satisfatória, dentre várias formulações técnicas do modelo. Muitos grupos estarão trabalhando nesta área com uma grande variedade de estruturas de modelos.

A previsão a partir dos dados observados, como se mencionou, será uma operação contínua que incorpora ou assimila as informações em tempos arbitrários e de pontos arbitrários na atmosfera. Estes dados devem enquadrar-se na malha finita de quatro dimensões do siste

ma, e serem ajustados aos campos existentes por meio de alguma técnica de assimilação. O procedimento de previsão torna-se por essa razão uma operação contínua no tempo.

Estas computações são portanto ao mesmo tempo uma ferramenta de pesquisa básica e um sistema que fornece as melhores previsões de que a ciência é capaz. E a medida em que elas contribuem para a pesquisa, isto é, para uma compreensão mais profunda e para aperfeiçoamentos dos modelos, as previsões melhorarão de maneira correspondente. Aqui, o termo "previsão" deve ser entendido em seu sentido mais geral - inclusive os fatos detalhados do tempo local a curto prazo e estimativas estatísticas de tendências e oscilações climáticas. Um aspecto importante deste trabalho é uma avaliação dos limites de previsão inerente da atmosfera, como se discutiu na seção 3.4. Espera-se, à medida em que o GARP se desenvolve, que nos encontremos em uma posição tal que nos permita conhecer com certa confiança o tipo e extensão das previsões possíveis e, conseqüentemente, saber quanto do controle do comportamento da atmosfera encontra-se ao nosso alcance.