

O HOMEM, O CLIMA E O AMBIENTE-III

INFLUÊNCIA DO HOMEM  
NO CLIMA  
E NO AMBIENTE

---

*JOSÉ PINTO PEIXOTO*

---

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS



A "mariazinha" para ler  
aos seus meninos de Chela,  
para que amem o ambiente  
e meditem nas citações  
de Umberto e de fecho de  
forma "beata", isto é, feliz!

O HOMEM, O CLIMA E O AMBIENTE — III

### INFLUÊNCIA DO HOMEM NO CLIMA E NO AMBIENTE

Os Fernando que levaram  
esta "prodigiosa" ou ou  
de textura e de cavidade  
para ganhar o céu...  
e perder tanta graça.



Que seja tudo  
em desquite dos nossos  
pecados, por amor  
do próximo e do  
Ministério da Qualidade  
de Vida" e dos seus temas

Que o autor ganhe muitas indulgências,  
Com a Vossa Caridade... Assim seja!  
Luziados que foi depois dum episódio santos da Mariazinha



para abafar os honrosos desgostos, contra tempo,  
fraquezas e desastres dos técnicos, que  
ganham tanto dinheiro... a revés  
provas!

! mais vas digo!

Jose Trusubexoz

---

15 julho 1987

A presente edição é da responsabilidade do  
Gabinete de Estudos e Planeamento da Administração  
do Território (SEARN — MPAT)

Tiragem: 3000 exemplares

Abril 1987

Realização gráfica:  
Gráfica Europam, Lda.  
Mem-Martins

Depósito legal n.º 16 822/87

JOSÉ PINTO PEIXOTO  
Director do Instituto Geofísico D. Luís  
da Universidade de Lisboa

O HOMEM, O CLIMA E O AMBIENTE — III

# INFLUÊNCIA DO HOMEM NO CLIMA E NO AMBIENTE

Ministério do Plano e da Administração do Território  
SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE  
E DOS RECURSOS NATURAIS  
*GABINETE DE ESTUDOS E PLANEAMENTO DA ADMINISTRAÇÃO  
DO TERRITÓRIO*

**Obras publicadas nesta colecção:**

- A PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DA TERRA  
— Luís F. Barreto
- O CICLO DA ÁGUA EM ESCALA GLOBAL  
— José Pinto Peixoto
- A ECOLOGIA DOS RECURSOS DA TERRA  
— M. Gomes Guerreiro
- A TEMPERATURA COMO FACTOR ECOLÓGICO  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- A VIDA E O AMBIENTE  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- A ECOLOGIA DA LUZ E VIDA  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- A RADIAÇÃO SOLAR E O AMBIENTE  
— José Pinto Peixoto
- AS SECAS  
— Luís Veiga da Cunha
- O ALGARVE NA PERSPECTIVA ECOLÓGICA  
— M. Gomes Guerreiro
- A ÁGUA. A ESCASSEZ NA ABUNDÂNCIA  
— Zózimo Castro Rego
- O AMBIENTE E A ECONOMIA  
— Luís F. Barreto
- A BIO-ECOLOGIA DA ÁGUA  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- O ECOSISTEMA E O MEIO FÍSICO  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- O MEIO BIOLÓGICO  
— Germano da Fonseca Sacarrão
- A PROTECÇÃO INTEGRADA EM AGRICULTURA  
— Pedro Amaro
- A POLÍTICA DO AMBIENTE E A QUALIDADE DE VIDA  
— M. Gomes Guerreiro
- O CULTO DA NATUREZA  
— J. Vieira Natividade
- CONTRIBUTOS PARA UMA TEORIA DO DIREITO DO AMBIENTE  
— J. Pereira Reis
- O SISTEMA CLIMÁTICO E AS BASES FÍSICAS DO CLIMA  
— J. Pinto Peixoto
- AS VARIAÇÕES DO CLIMA E O AMBIENTE  
— J. Pinto Peixoto



## ÍNDICE

	Pág.
PREFÁCIO .....	11
I — <i>A ACÇÃO DO HOMEM SOBRE O CLIMA E O AMBIENTE: ASPECTOS GERAIS</i> .....	15
1 — <i>O problema</i> .....	17
1.1 — Deterioração do ambiente .....	19
1.2 — Gestão do ambiente .....	23
2 — <i>Efeitos das actividades humanas sobre o clima</i> .....	27
II — <i>POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA</i> .....	31
1 — <i>A poluição do ar</i> .....	33
1.1 — Introdução .....	33
1.2 — Aspectos gerais da poluição .....	34
1.3 — Estabilidade da atmosfera .....	36
2 — <i>Factores meteorológicos da poluição</i> .....	42
2.1 — Efeito da estabilidade da atmosfera .....	42
2.2 — Efeito dos ventos e da turbulência .....	45
3 — <i>Os principais poluentes da atmosfera</i> .....	49
4 — <i>O ciclo da poluição atmosférica</i> .....	51
a) A primeira fase do ciclo: produção e lançamento da poluição na atmosfera .....	53
b) A segunda fase do ciclo de poluição: dispersão e trans- porte .....	55
c) A terceira fase do ciclo: deposição .....	58

5 — <i>Previsão meteorológica local da poluição</i> .....	61
6 — <i>O carácter global da poluição atmosférica. A poluição transfronteira</i> .....	63
7 — <i>A poluição e o clima</i> .....	67
III — <i>MODIFICAÇÕES DELIBERADAS DO AMBIENTE E DO CLIMA. O PROBLEMA DA PRECIPITAÇÃO PROVOCADA</i> .....	71
1 — <i>As modificações intencionais do clima e do ambiente: aspectos gerais</i> .....	73
2 — <i>Controlo das nuvens e microfísica das nuvens</i> .....	76
3 — <i>Controlo da precipitação: a precipitação provocada</i> .....	80
3.1 — <i>Mecanismos da precipitação</i> .....	80
3.2 — <i>Os processos naturais de precipitação</i> .....	84
3.3 — <i>A precipitação provocada</i> .....	86
3.4 — <i>Análise dos resultados da precipitação provocada</i> ..	89
4 — <i>Dissipação do nevoeiro</i> .....	93
5 — <i>A supressão do granizo e de trovoadas</i> .....	94
6 — <i>Alguns comentários finais</i> .....	94
IV — <i>INFLUÊNCIA DO HOMEM NO CLIMA EM ESCALA GLOBAL</i> .....	97
1 — <i>Introdução</i> .....	99
2 — <i>Adição de gases à atmosfera: influência da poluição da atmosfera</i> .....	99
3 — <i>Aquecimento da atmosfera: poluição térmica</i> .....	102
4 — <i>Modificação do albedo. Implicações do aquecimento da Terra</i> .....	103
5 — <i>O problema do dióxido de carbono e o clima</i> .....	105

5.1 — Os combustíveis fósseis e o aumento da concentração em dióxido de carbono na atmosfera .....	105
5.2 — Efeito na temperatura do ar: um aquecimento global .....	110
5.3 — Efeitos potenciais na precipitação, na agricultura, no nível médio dos mares e nos ecossistemas ...	111
6 — <i>Precipitação ácida</i> .....	115
6.1 — Formação da precipitação ácida .....	115
6.2 — Efeitos ecológicos e erosivos da precipitação ácida	120
7 — <i>O metabolismo das grandes cidades e o clima</i> .....	123
V — <i>O CLIMA E OS GRANDES PROBLEMAS DA HUMANIDADE</i> .....	127
1 — <i>Introdução</i> .....	129
2 — <i>A problemática do clima e o homem</i> .....	131
3 — <i>O clima e a alimentação</i> .....	135
3.1 — O clima e a agricultura .....	135
3.2 — O clima e as pescas. A oscilação do hemisfério Sul e o fenómeno «El Niño» .....	137
4 — <i>O clima e energia</i> .....	140
4.1 — Aspectos gerais .....	140
4.2 — Energia e poluição: dióxido de carbono e óxidos de enxofre .....	142
5 — <i>A desertificação: um problema universal</i> .....	144
VI — <i>CIÊNCIA, TECNOLOGIA, CLIMA AMBIENTE</i> .....	149
1 — <i>Problemática da poluição e o ambiente</i> .....	151
2 — <i>O grande desafio de hoje e o futuro</i> .....	154
3 — <i>Epílogo: Glória, Desespero e Esperança</i> .....	155
BIBLIOGRAFIA .....	161



Para a realização deste trabalho contámos com o apoio dos Dr. José M. Rocha Faria e do Dr. Carlos Valente Marques, que deram o seu tempo e o seu saber. Os seus comentários nalgumas das secções deste ensaio foram fundamentais para a sua preparação definitiva. Aqui deixamos expressos os nossos agradecimentos pela colaboração prestada.

## PREFÁCIO

*«A Terra está desolada e murcha; o Céu e a Terra esmorecem. A Terra está profanada pelos seus habitantes, porque transgrediram a lei e violaram o direito...»*

Isaias, 24

*O presente volume encerra a trilogia de ensaios que nos propusemos escrever sobre a problemática do clima e das suas relações com o ambiente. No primeiro ensaio, intitulado Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima, procurámos dar os fundamentos da teoria do clima, alicerçada nos princípios fundamentais da Física, numa abordagem, sempre que possível, enquadrada na teoria dos sistemas.*

*No segundo, Variações do Clima e o Ambiente, tratámos o clima como uma entidade dinâmica, em evolução. Estudamos as possíveis causas das mudanças do clima no decurso da idade da Terra e da História e demos as teorias que actualmente procuram explicar essas mudanças.*

*Por fim, no estudo actual, Influência do Homem no Clima e no Ambiente, damos conta dos efeitos da actividade humana nas possíveis alterações do clima e do ambiente, umas de natureza intencional, com o fim de melhorar as condições ambientais, e outras, inadvertidas e contínuas, resultando de consequências colaterais da degradação da energia e da matéria.*

*As exposições são baseadas nas observações, na empirologia do real e na aplicação simples dos princípios da Física. Procuram ter uma índole simultaneamente explicativa e interpretativa ultrapassando a fase qualitativa e indo muito além de uma atitude meramente descritiva. Esperamos que os três trabalhos possam interessar, em primeiro lugar, a um público preocupado*

com os grandes problemas do ambiente e, depois, a um espectro vasto de estudantes.

Destacamos, de entre os estudantes, dois grupos principais. O primeiro será constituído por aqueles que procuram alargar os seus conhecimentos sobre o papel que a atmosfera tem nas Ciências do Ambiente, ou recorrer à Climatologia para as suas aplicações à Geografia, à Geologia, à Agronomia e à Silvicultura, à Ecologia, à Engenharia e ao Planeamento. O segundo será constituído por estudantes que enveredaram pela especialização em Ciências da Atmosfera e dos Oceanos e que pretendam alargar a sua formação técnica e científica em problemas do ambiente, resultantes do comportamento e da interacção dos subsistemas atmosféricos, oceânicos e criosféricos.

No estudo presente tratamos das consequências da interferência do homem no sistema climático natural. Nalguns casos, a intervenção é planeada no sentido de «melhorar e aperfeiçoar» o ambiente atmosférico para fins específicos e bem definidos (v. g. combate às geadas). Esta modificação é intencional ou deliberada. As modificações resultam de interferências que introduzem variações nas cascatas da energia e no ciclo da água, por um lado, e no movimento do ar, por outro.

Além das intervenções intencionais do homem no clima, temos que considerar aquelas, que não são deliberadas, nem planeadas e que provêm dos efeitos da actividade humana. Estas modificações inadvertidas resultam da alteração das condições fronteira, como a cobertura vegetal (v.g. deflorestação, agricultura, urbanização, etc.), através da modificação do albedo, ou resultam ainda, da contaminação directa da atmosfera, pela poluição química, térmica e outras.

Por vezes, é difícil traçar uma linha de separação entre estes dois grandes tipos de interferência. Por exemplo, a construção duma casa, concebida e planeada para nos dar um ambiente e um clima interior controlável, vai, com sua presença, alterar o regime de ventos e o balanço da energia térmica que existiam antes da sua construção. A urbanização duma dada área, ou duma região, generaliza estes efeitos, e vai interferir nas cascatas da energia e da água e no regime predominante dos ventos, com aspectos sinérgicos, às vezes, muito difíceis de prever.

As intervenções deliberantes, no sistema climático, tais como a construção dum reservatório de água, duma barragem,



*o desvio dum curso de água, a dissipação do nevoeiro etc., provocam modificações no clima e podem ter um impacte decisivo no ambiente.*

*As práticas agrícolas procuram, por vezes, sem dar por isso, tirar partido das modificações que introduzem no clima da camada limite na área de cultivo. De facto, com as lavras altera-se a geometria do solo e os regos aumentam a exposição à radiação solar e, com esta, a absorção da energia solar. Com a cobertura das plantas e dos solos, principalmente na estação de Inverno, e com a construção de estufas originam-se, afinal, verdadeiros microclimas favoráveis ao desenvolvimento das plantas. O mesmo se passa com a rega, em que se fornece a água necessária aos solos e às culturas e se utilizam as propriedades termodinâmicas da água, designadamente, a sua grande capacidade calorífica e os valores elevados dos calores latentes. A construção de sebes, para a protecção de outras culturas contra a acção dos ventos, é uma prática antiquíssima de alteração local do clima.*

*O combate às geadas, a dissipação de nevoeiros e a precipitação provocada são outros exemplos de modificações deliberadas do clima, infelizmente nem sempre bem sucedidas.*

*Como se vê são vários os efeitos da actividade humana sobre o clima e sobre o ambiente e, em princípio, resultam de interferências na operação e no funcionamento dos sistemas naturais. A interferência, ainda que em escala reduzidíssima, pode ter uma acção catalítica sobre as cascatas naturais da energia e do ciclo da água, podendo desencadear processos no sistema climático, incluindo fenómenos de retroacção, nem sempre desejáveis. Em muitos casos, as relações da teia causa-efeito são tão complexas e, por vezes, até, desconhecidas, que o impacte do homem sobre um subsistema do ambiente pode ser, mesmo, imprevisível. No entanto, esperamos que o aumento do conhecimento das inter-relações melhore a nossa capacidade de actuação. Por outro lado, vai permitir-nos desenvolver modelos que retenham, dentro do possível, a «mímica» dos sistemas naturais constituindo uma réplica adequada, na simulação matemática, da fenomenologia do mundo real.*

*Nestas condições será possível começar a prever os efeitos do homem sobre o clima e encontrar alternativas ou novas estra-*

*tégias, que permitam reduzir, ou, até, evitar as modificações inadvertidas, não desejáveis para a humanidade.*

*Nós não queremos que «a Terra fique desolada e murcha» nem que «o céu e a Terra esmoreçam». Nós queremos que «os seus habitantes não transgridam as leis nem violem o direito» para legarmos às gerações vindouras um ambiente são, puro e castro em que apeteça viver.*

**I — A ACÇÃO DO HOMEM SOBRE  
O CLIMA E O AMBIENTE:  
ASPECTOS GERAIS**



## 1 — O PROBLEMA

Num discurso que ficou famoso, pronunciado em 1965, nas Nações Unidas, o Embaixador Adlai Stevenson declarou:

«We travel together, passengers in a little spaceship dependent upon its vulnerable reserves of air and soil; all committed for our safety to its security and peace; preserved from annihilation only by care, the work and, I will say, the love we give our fragile craft.»\*

Passadas quase duas décadas, esta é a mensagem inadiável que temos que transmitir para não comprometermos com a degradação do clima e do ambiente a nossa qualidade de vida mas também a das gerações vindouras. Só há uma Terra! E constitui um sistema fechado: É-lhe vedado contrair empréstimos do exterior, mesmo a título precário, em termos de massa ou de quantidade de meio. Os seus recursos são, portanto, limitados.

Estamos em presença duma situação, aquela em que actualmente vivemos, que parece ser única na história da humanidade. É uma situação em que os resultados das observações de que dispomos e os progressos tecnológicos do conhecimento que temos dos factores que regem o clima nos levam à convicção de que o homem, através das suas actividades, está a interferir no processo climático e a contribuir para um aumento da temperatura do globo. As consequências deste possível aquecimento não são, por enquanto, muito claras, mas poderão vir a ter uma influência profunda na qualidade de vida do homem em décadas futu-

\* «Nós viajamos todos juntos, passageiros num pequeno navio espacial, dependente das suas reservas vulneráveis em solo e ar. Todos acometidos para nossa salvaguarda à sua segurança e à paz; que só pode ser preservado do seu aniquilamento pelo cuidado, pelo trabalho, eu direi mesmo, pelo amor que dedicamos à frágil embarcação.»

ras. As acções, que porventura se devam tomar, designadamente as que se relacionam com o uso da energia, têm que ter um escopo global.

O clima é um recurso natural, precioso. É um património colectivo da humanidade, que convém conhecer e preservar, a fim de garantir a sua qualidade, dada a contribuição decisiva que tem para a existência de todos os seres vivos e, em especial, para o homem. Por outro lado, o sistema climático e o seu clima estão a ser agredidos constantemente, pelo homem e por todos os seres vivos.

O clima tem sido e é uma constante sempre presente em toda a vida da humanidade. Modelou a história do homem desde o seu aparecimento na terra; influenciou a sua cultura; foi factor determinante para a formação das várias civilizações.

A marca do clima está patente no homem, nos seus hábitos de vida, na sua cultura e nas suas formas de pensamento. No decurso da sua existência, o homem soube adaptar-se ao clima, criando meios de defesa que lhe têm permitido sobreviver, contra as vicissitudes da variabilidade climática, e progredir, sempre, na melhoria das condições de vida.

As actividades humanas podem afectar o clima, através da alteração da composição da atmosfera, da libertação de calor para a atmosfera e da modificação do albedo, associado às condições fronteira, da interface atmosfera-continentes.

O homem está, sem dar por isso, a alterar continuamente a estrutura da atmosfera, porque introduz variações na concentração de alguns componentes já existentes, e porque lança na atmosfera outras substâncias novas que, em condições naturais, não existiriam. Basta referir a emissão de gases, de fumos e de partículas provenientes de complexos industriais, de centros urbanos, de práticas agrícolas, incluindo as queimadas, e da utilização maciça de fertilizantes, contribuindo todos para a poluição da atmosfera. Além disso, com a erosão do solo, devido à deflorestação, à sobrepastagem e às práticas agrícolas, os ventos arrancam quantidades enormes de poeiras do solo, que depois são lançadas e dispersas na atmosfera.

Enquanto que umas modificações são inadvertidas e por vezes inevitáveis, outras são deliberadas e intencionais e de possível controlo. Entre estas, salientam-se as tentativas de precipita-

ção provocada, da dissipação de nevoeiros, da supressão do grânizo, etc., para citar as de maior impacto.

Todavia, a Segunda Lei Fundamental da Termodinâmica é inexorável: obriga-nos a pagar a «factura». Se é certo que o sistema climático *in toto* tem e desenvolve mecanismos, que expurgam o excesso de entropia gerada nos processos naturais, através da emissão da radiação infravermelha terrestre, o sistema climático não pode continuar a absorver, indefinidamente, o impacto do homem. A Segunda Lei, sempre presente, dá-nos o aviso e chama-nos a atenção da possível rotura, ao mesmo tempo que nos fornece vias para a salvaguarda e a preservação do clima, dentro de limites razoáveis.

Não será fácil encontrar, no âmbito das disciplinas das ciências do ambiente, um problema de interesse actual de maior interdisciplinaridade do que a interacção entre o homem e o clima.

### 1.1 — Deterioração do ambiente

A tecnologia, com a sua força enorme e com o seu vigor sempre crescente, está a exercer uma forte tensão sobre o ambiente, quebrando alguns elos das cadeias dos processos biológicos e físicos que mantêm o sistema ecológico em que vive o homem. Durante anos, a aplicação desregrada e indiscriminada da tecnologia originou e desencadeou novos mecanismos de interacção que, por vezes, se comparam, pela sua intensidade e pelos seus efeitos, aos que correspondem aos próprios processos naturais. Esta capacidade de intervenção no ambiente permitiu aumentar a produtividade agrícola, gerar biliões de kilowatts-hora de energia eléctrica, explorar recursos naturais, e movimentar milhões e milhões de pessoas de um lado para o outro. No entanto, este assalto do homem sobre o ambiente produziu uma acumulação de «dívidas biológicas» e de «facturas climatológicas», por vezes, arriscadas.

A tecnologia, que gerou uma produtividade elevada e proporcionou um conforto notável, tem vindo, no entanto, a destruir o capital ambiental do homem: o ar, a água, o solo e outros recursos naturais componentes do ecossistema em que é forçado a viver.

Com o desenvolvimento de toda esta capacidade tecnológica, surge a necessidade de lembrar que o homem adquiriu uma nova responsabilidade: ser prudente e equilibrado no uso do meio em que vive e não-de viver aqueles que vierem depois de nós. Não se podem continuar a utilizar as armas poderosas da ciência e da tecnologia, sem estabelecer, em contrapartida, um programa científico de protecção ao ambiente.

A crise presente do ambiente foi criada pela magnitude e pela aceleração da actividade do homem e pela sua interacção com o ambiente. Quando a tecnologia é aplicada em pequenas áreas, os seus efeitos têm, em geral, carácter local ou regional, como aconteceu enquanto as actividades disruptivas do homem eram limitadas e se iam disseminando lentamente. Nestas circunstâncias, era possível manter uma relação de certo modo harmoniosa, entre as sociedades e o ambiente. E, até à década dos setenta, a análise dos problemas do ambiente era feita sem grandes preocupações de carácter científico. Agora a situação modificou-se radicalmente. Reconhece-se que é indispensável uma análise científica dos problemas a fim de proceder a uma avaliação da tecnologia nas suas consequências.

Com o emprego de novos processos tecnológicos podemos estar a forjar tensões que o ambiente nem sempre poderá comportar e riscos que a humanidade não poderá correr.

Foi o próprio progresso científico que originou parte dos actuais problemas do ambiente. Em parte, esta situação explica-se pela estrutura do desenvolvimento e do conhecimento científico. Enquanto que algumas disciplinas científicas atingiram um poder e uma profundidade que permitem fornecer uma orientação para o ataque do problema, outras há que estão ainda numa fase muito preliminar de desenvolvimento, para permitirem qualquer previsão das consequências da utilização duma tecnologia. A revolução científica dos séculos XVII e XVIII, em que assenta a civilização tecnológica moderna, concentrou-se nas ciências físicas, químicas e matemáticas donde resultou, por exemplo, uma compreensão muito mais avançada da estrutura da matéria do que dos processos que originam e mantêm a vida. Algumas das dificuldades actuais resultam, entre outras, da disparidade dos progressos entre as ciências físicas e químicas e as ciências da vida.

Dos subsistemas que constituem o sistema climático não serão a atmosfera, a água e o solo aqueles que sofrerão as maiores deteriorações. Os mais atingidos serão os oceanos. Os oceanos, que foram o meio em que se teria gerado a vida, constituem o subsistema que mais pode ser afectado e o componente mais frágil e vulnerável do ambiente. Apesar da grande massa de água dos oceanos, estes podem ter uma capacidade de absorção e de diluição limitada. As circulações nos oceanos são muito lentas e levam milhares de anos a efectuar-se nas camadas abaixo da camada superficial e das grandes termoclinas. Os poluentes, dada a fraca mobilidade dos oceanos, tendem a concentrar-se, em regiões limitadas, aumentando localmente a concentração, antes de se dispersarem. Devemos acentuar que, nos oceanos, a velocidade de dispersão é muito pequena comparada com a da atmosfera e o mesmo se passa com a mobilidade das circulações organizadas. Ora, os oceanos têm relações muito acentuadas com a ecologia dos continentes; qualquer dano provocado nos oceanos pode ter, por isso, repercussões muito amplas na vida humana.

O ecossistema global tem vindo a ser afectado por milhares de novas substâncias e por numerosas actividades disruptivas e o processo de deterioração tem-se vindo a acelerar. Um exemplo clássico da má gestão da nova tecnologia foi a realização dos ensaios nucleares na atmosfera, que originou toda a problemática inerente à precipitação radioactiva. Outro é o que surgiu com o emprego indiscriminado, em grande escala, dos pesticidas, tais como o DDT e outros insecticidas. Ainda outro exemplo clássico é o da operação das centrais térmicas, que lançam para a atmosfera, ou para as águas dos rios e dos lagos, uma quantidade indesejável de contaminantes.

Ora, os elementos radioactivos, os insecticidas e os pesticidas, todos seguem o mesmo circuito, através do sistema climático, passando da atmosfera para a água e para os solos, entrando depois na cadeia de alimentação, com todas as implicações inerentes. Os esquimós foram afectados pela queda radioactiva e pelo DDT, ainda que, em escala local, não fossem usados e serem até desconhecidos. O uso intensivo de DDT provocou uma contaminação generalizada do sistema climático, que se estendeu aos próprios oceanos. O DDT, que é muito persistente e venenoso, tem contribuído para a destruição de muitas espécies mari-

nhas, afectado as aves, etc. Os pesticidas miraculosos da década de 40 vieram, assim, a ter efeitos deletérios, nunca suspeitados.

Fundamentalmente, há dois tipos de combustíveis utilizados para a geração de energia eléctrica: os combustíveis fósseis e o urânio. Ambos constituem recursos não renováveis. As existências previstas supõe-se que serão suficientes para as necessidades durante alguns séculos no que se refere aos combustíveis fósseis, enquanto que as disponibilidades conhecidas de urânio darão até ao fim do século XXI.

Todos os combustíveis na sua utilização geram calor que, só em parte, é convertido em energia utilizável. A Segunda Lei Fundamental da Termodinâmica é inexorável. Automaticamente está a gerar-se uma poluição térmica que vai afectar a atmosfera e as águas dos rios e dos lagos. Os reactores nucleares actuais, que utilizam a água como refrigerante, lançam nas águas locais quantidades ainda maiores de calor.

As águas residuais transportam, além do calor, produtos químicos utilizados para controlar a formação e desenvolvimento de limos e lodos nas canalizações e detritos radioactivos que, em conjunto, vão contaminar as águas em que as águas residuais são lançadas.

A utilização de combustíveis fósseis nas centrais geradoras de energia produz uma forte poluição da atmosfera. Nos Estados Unidos a combustão do carvão gera por ano a emissão de 22,1 milhões de toneladas de óxidos de enxofre, de 8,1 milhões de toneladas de partículas, de 9,1 milhões de toneladas de óxidos de nitrogénio e outros, perfazendo um total de 42 milhões de toneladas. Há ainda que considerar a emissão pelas centrais nucleares de Kripton-85.

A indústria da energia constitui uma das maiores causas da poluição do ambiente e com tendência para aumentar. Admite-se que, se for debelada a poluição química, com a eliminação dos óxidos de enxofre e de nitrogénio, no ano 2000 o calor residual das centrais lançado nos cursos de água será suficiente para elevar a temperatura das águas superficiais dos continentes de 11°C. Por outro lado o Kripton-85 libertado nas centrais nucleares poderá aumentar de 1% a 2% o nível actual da radioactividade da atmosfera. Como a diluição não é uniforme, aceita-se que nos Estados Unidos o nível possa, mesmo, aumentar até 10%.

## 1.2 — Gestão do ambiente

A tecnologia moderna gerou uma crise do ambiente porque se tem ignorado que este deve ser tomado no sentido global, holístico, e não como um conjunto de subsistemas disjuntos e isolados. A partir dos fins da década de 60 reconheceu-se que era indispensável debelar a crise do ambiente e evitar que ela alastrasse, através de uma gestão adequada, quer a nível nacional, quer a nível internacional.

Quando o homem aplicava a tecnologia a problemas particulares, para fins específicos, ignorava, em geral, as implicações para o ambiente, actuando como se este fosse constituído por partes separadas e independentes. Ao usar pesticidas para controlar insectos nocivos não se consideraram os seus efeitos sobre os outros insectos e sobre outros animais, que poderiam ser afectados de forma adversa ou mesmo fatal.

Ora, como o ambiente é um sistema de subsistemas, todos ligados entre si de forma inextrincável, uma perturbação num dos subsistemas pode repercutir-se em todos os outros. E põe-se a seguinte questão: podem as consequências da tecnologia presente subverter o equilíbrio da natureza e destruir o ambiente, tal como o conhecemos? Pois bem, a não ser que alteremos o uso indiscriminado actual da tecnologia, existe essa possibilidade.

Um dos exemplos mais evidentes da disrupção do ambiente, devido à aplicação desatenta da tecnologia, foi o que se verificou na interferência do equilíbrio oxigénio-nitrogénio do lago Erie. Acumularam-se neste lago doses maciças de nitratos inorgânicos e de fosfatos, provenientes dos fertilizantes arrastados pelo ramo terrestre do ciclo hidrológico e pelos esgotos. Como estes compostos são nutrientes importantes das plantas, a sua abundância provocou uma proliferação explosiva de algas. Com o seu decaimento e deposição deu-se uma fertilização do lago com o aparecimento de quantidades enormes de material orgânico, que necessita para a sua oxidação quantidades desmedidas de oxigénio disponível do lago. Os peixes e toda a outra fauna foram privados, assim, do oxigénio que necessitavam. E aquilo que foi um lago de águas cristalinas durante milénios, deteriorou-se e transformou-se, de repente, nalgumas áreas, num completo lodaçal. Um programa extensivo de recuperação e de



tratamento tem, no entanto, vindo a procurar sanear o lago, com resultados notáveis.

Ora, há muitos rios e muitos lagos que estão a um passo do estado em que esteve o lago Erie e a eutroficação espreita-os, se se continuarem a utilizar, desregradamente, os nitratos e os fosfatos inorgânicos, quer nos fertilizantes, quer no tratamento dos resíduos líquidos dos esgotos.

Por outro lado, o uso intensivo dos fertilizantes pode levar à poluição das águas subterrâneas, que constituem o maior manancial hídrico para o consumo humano, através da percolação e da infiltração. Se é certo que, com a aplicação de fertilizantes, se aumentou, de forma espectacular, a produção agrícola, originando a célebre «revolução verde», já referida, também perturbou o equilíbrio dos solos. Ao substituir o nitrogénio orgânico pelo inorgânico, como o húmus que o utiliza não é renovável, o solo torna-se muito menos poroso. As raízes não podem obter do solo o oxigénio de que necessitam, e como as plantas não utilizam todo o fertilizante parte deste é assim lançado, por escoamento, para os rios e para os lagos.

O efeito global resultante do tratamento dos esgotos, do escoamento dos fertilizantes e dos produtos nítricos produzidos pelos automóveis, pelas centrais térmicas e pelos complexos industriais, pode resultar numa disrupção do equilíbrio nitrogénio-oxigénio da atmosfera e fomentar a degradação do ambiente. A procura em oxigénio nas águas superficiais, devido ao tratamento dos detritos dos esgotos, poderá, só por si, corresponder a um consumo de quantidades enormes de oxigénio nos rios. Assim, nos Estados Unidos essa procura seria tão elevada nos rios, durante os meses de Verão, que aqueles poderão vir a não permitir manter a vida animal, tornando-se, mesmo, a água imprópria para consumo. Poderia, assim, originar-se uma crise de água, que seria catastrófica e muito mais trágica do que qualquer das outras crises concebíveis. Como é óbvio a crise da energia seria insignificante, não se comparando em importância à crise concebível da água.

A intrusão tecnológica nos processos naturais do ambiente pode ainda conduzir a consequências de outra ordem. Entre estas avultam, pela sua actualidade e grandiosidade, aquelas que podem levar à modificação do clima de forma deliberada ou



inadvertida. É o caso do ciclo do dióxido de carbono, cuja alteração, se seguir uma lei exponencial de crescimento, pode exercer tensões consideráveis sobre todo o ecossistema. Outro tanto se passa com a formação de aerossóis pela matéria particulada lançada na atmosfera e de nuvens na alta troposfera ou mesmo na estratosfera.

Estes processos são irreversíveis e não é possível saber quando se poderá atingir o «ponto de não retorno». Esta é a razão pela qual muitos cientistas acreditam que se deverá actuar prudentemente, enquanto não houver provas irrefutáveis em contrário, de não se estar a contribuir para o colapso do ambiente.

Para vencer a actual crise do ambiente e manter a Terra como um lugar adequado para a vida humana, tem que suste-se de forma decisiva, a invasão maciça da biosfera. Para isso, tem que reconhecer-se que a poluição e outras disrupções do ambiente não são produtos marginais e incidentais da tecnologia. Todo o desenvolvimento tecnológico, desde a enxada e da cabana à escavadora e ao arranha-céus, ao reactor e ao computador, constitui, inerentemente, uma dilaceração do ambiente pela utilização dos recursos naturais e pela alteração da paisagem.

A tecnologia é, portanto, uma das causas de uma situação precária portencial em que se pode vir a encontrar o ecossistema que nos mantém e assegura a nossa existência.

Mas significa isto que para sobreviver tenhamos que desistir e abandonar os frutos da ciência e da sua aplicação? Se continuarmos a encarar a tecnologia exclusivamente em termos de uma maior produtividade e de uma maior conveniência, a utilizá-la sem olhar aos efeitos secundários que origina, então diríamos que «sim». Mas, a disrupção provocada pela actividade do homem pode reduzir-se substancialmente, se se escolher um género adequado de tecnologia, cuja aplicação gere um mínimo de tensão no ecossistema e, ao mesmo tempo, possa servir as necessidades do homem.

O automóvel constitui uma ilustração familiar da natureza dual da tecnologia e das opções difíceis, mas claras, que se nos põem. Concebido e aperfeiçoado para fornecer uma forma de transporte rápido, fácil e eficiente, o automóvel transformou-se numa das maiores fontes de poluição, gerando mais de metade de óxido de carbono e de hidrocarbonetos que são lançados na

atmosfera, e mais de um terço do total de óxidos de nitrogénio. Até agora, as tentativas para controlar estas emissões não têm tido muito êxito. O rendimento do motor de alta compressão depende de temperaturas elevadas, que, por sua vez, provocam a formação de óxidos de azoto a partir do oxigénio e do nitrogénio da atmosfera. Os óxidos de azoto, em presença da luz solar, reagem com os hidrocarbonetos de escape, para produzir ozono e nitrato peroxicetílico e um número considerável de outros poluentes secundários. Estes compostos sendo oxidantes fotoquímicos são os principais responsáveis pela formação do «smog». Durante a precipitação, muita da poluição da baixa atmosfera é arrastada e lançada no solo e, por escoamento, vai contaminar os cursos de água, os lagos, etc.

A poluição da atmosfera é apenas um dos muitos efeitos do automóvel no nosso ecossistema. Consomem recursos enormes, requerem alterações profundas no uso da utilização da terra, necessitam quantidades consideráveis de energia, e constituem ainda uma das maiores fontes de detritos sólidos. Tudo isto gera um custo económico, social e físico que o ambiente necessita absorver para garantir um nível adequado de «saúde de ecologia».

O automóvel é apenas um exemplo!

Ainda que continuemos a aplicar a tecnologia, ignorando as consequências do seu impacto sobre o ambiente, podemos, pelo menos, evitar situações perigosas, resultantes da incapacidade de controlo, concebendo e realizando «mecanismos de alarme», que detectem qualquer dos efeitos não desejáveis uma vez que eles ocorram.

Para já, impõem-se soluções a curto prazo, tais como o controlo das emissões dos complexos industriais e dos carros, até que seja possível analisar, em termos de rendimento global, a aceitação de decisões, por vezes cruciais, do ponto de vista social, económico e ecológico. Só assim será possível corresponder às exigências, não negociáveis, da Natureza e assegurar o futuro do nosso ecossistema.

## 2 — EFEITOS DAS ACTIVIDADES HUMANAS SOBRE O CLIMA

As actividades humanas podem influenciar as condições da atmosfera através de:

- 1 — Alteração da natureza da cobertura do solo;
- 2 — Adição de energia proveniente de fontes artificiais;
- 3 — Lançamento de materiais estranhos nos estados sólido, líquido e gasoso.

As modificações das características da superfície afectam a forma como a radiação solar é absorvida, devido à alteração do albedo, a radiação terrestre que é emitida, a rugosidade do terreno e a força de atrito dos ventos. O albedo é a razão entre a radiação solar reflectida e a radiação solar incidente. Um valor baixo do albedo implica uma grande absorção de energia pela superfície e um valor elevado, uma grande reflectividade. O grau de absorção da radiação determina a temperatura do solo e, portanto, o ar vizinho da camada limite da atmosfera. O albedo varia entre 7%, na água líquida, e 80%, em neves recentes e nos gelos «limpos». As nuvens têm também valores elevados do albedo, cerca de 60% a 70%. As florestas têm valores baixos, da ordem de 6% a 10% e as culturas hortícolas valores da ordem de 20% a 25%, enquanto que o solo limpo tem valores da ordem de 15% a 20%. O albedo planetário da Terra é cerca de 30%.

A modificação da superfície influencia ainda o ciclo hidrológico, através do escoamento e da infiltração das águas precipitadas; da fusão dos gelos, da evaporação e da evapotranspiração da água para a atmosfera. A substituição de florestas ou de pradarias por terras agrícolas, a seca de pauis e pântanos, a alteração dos rios para a construção de lagos artificiais, de barragens e a irrigação de terras áridas e semiáridas afectam a evaporação da água e a condução do calor e, portanto, a temperatura e a humidade do ar.

A utilização dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) leva a um aquecimento da atmosfera e vem juntar à atmosfera gases e partículas contaminantes, contribuindo para a sua poluição. O mesmo se passa com os reactores nucleares.

Mas, há ainda muitas outras actividades que contribuem para a poluição da atmosfera que incluem as práticas agrícolas, domésticas e industriais.

Nos primórdios da civilização, em que o homem subsistia através da caça e da recolha de sementes, de plantas e de frutos que se lhe deparavam, os efeitos do homem no clima e no ambiente teriam sido insignificantes, confinando-se à vizinhança das fogueiras (depois de ter descoberto e controlado o fogo) em que o homem se aquecia, ou cozinharía. Com a «descoberta» da agricultura, há cerca de 10 000-8000 anos, os efeitos do homem passaram a ser mais extensivos, quer pela substituição e renovação da cobertura vegetal natural por áreas cultivadas, quer pelo aumento rápido da população que a agricultura e a pecuária (o homem aprendeu a domesticar animais) favoreceram. Inicialmente, os efeitos da agricultura poderão ter-se feito sentir, principalmente, nas imediações dos terrenos modificados. Depois, com a deflorestação maciça de áreas consideráveis, as modificações que ocorreram com a transferência de calor e humidade e de quantidade de movimento entre o terreno e a atmosfera passaram a assumir um carácter regional ou, mesmo, geral. Estas transferências e mudanças ocorreram desde as idades pré-históricas, com a descoberta da agricultura, de que há indícios indirectos.

Com o alargamento da agricultura, da permuta de produtos e do «comércio», desenvolveram-se comunidades humanas, cada vez maiores, surgindo as cidades que, por seu turno, com um «metabolismo» característico, passaram a ter novos efeitos na atmosfera. A revolução industrial, há duzentos anos, acelerou a concentração das populações nas grandes cidades, que cresceram a ritmo vertiginoso, e a utilização maciça de combustíveis fósseis agravou ainda mais a influência das cidades no clima. Neste caso, o desenvolvimento do urbanismo e da industrialização ocorreram já na fase em que havia registos de observações meteorológicas e, por isso, é possível estudar e analisar os efeitos destas mudanças.

Logo no início do século XIX começaram a aparecer «estudos» sobre o clima das grandes cidades: Luke Howard, em 1818, escreveu um livro sobre o clima de Londres em que aponta já as diferenças entre as condições meteorológicas, na então maior ci-

dade do Mundo e nos arredores. Hoje, esses estudos são muito vastos e numerosos, dada a acção que as grandes cidades têm no clima, como havemos de mostrar.

A deterioração da qualidade do ambiente, que se iniciou, quando o homem se aglomerou em aldeamentos e começou a utilizar o fogo, tem prosseguido. Como referimos já, transformou-se num problema muito sério, devido aos impactes duma população que cresce exponencialmente e às exigências de uma sociedade industrializada. A contaminação do ar, da água, do solo e dos alimentos, transformou-se quase numa ameaça à existência de muitas espécies do nosso ecossistema e poderão, eventualmente, ameaçar a nossa própria sobrevivência.

É verdade que, no passado, os desenvolvimentos agrícola e industrial criaram com a poluição problemas ambientais na água, nos solos, na atmosfera, com os custos inerentes e que se repercutiram na qualidade de vida do homem, contribuíram para a desertificação, através da má gestão dos ecossistemas naturais, etc. Estes problemas raramente ficam localizados. Por interacção com outros factores, adquirem uma nova dimensão, transformando-se em problemas regionais ou mesmo globais.

No entanto, aceitamos que a maior parte dos problemas ambientais são causados por uma má gestão do ambiente, tomado *sensu lato*, reconhecemos que o nosso tipo de desenvolvimento tem que evitar o uso irracional e delapidador dos recursos naturais. Tem que ser um desenvolvimento sem destruição. Muitas vezes, um poluente pode constituir até um recurso secundário, se se dispuser de tecnologia adequada.

A alimentação constitui o problema número um do mundo actual. Ora, há uma relação íntima entre a quantidade de energia utilizada e a produção de alimentos. A utilização de energia através da fertilização maciça de alguns solos, ainda que tivesse gerado a «revolução verde», levou também à saturação dos solos e à sua degradação. Além disso, o excesso de fertilizantes não utilizados criou novos problemas, como a poluição de rios e de lagos. Põem-se, hoje, muitas esperanças na possibilidade de resolver o problema magno da «fixação do azoto», que grandes Centros Científicos e Academias procuram estudar e resolver. Assim se poderiam evitar muitos dos males provenientes do uso desregrado dos fertilizantes nitrogenados actuais.

Apesar do uso intenso dos pesticidas, as pragas alastram. Torna-se indispensável o uso moderado dos pesticidas químicos que, invariavelmente, entram na cadeia de alimentação, com todos os males inerentes.

As condições meteorológicas e climáticas constituíram sempre um factor decisivo para a produção agrícola. Hoje, há sinais, cada vez mais abundantes, de possíveis mudanças do clima e do comportamento dos sistemas meteorológicos. No entanto, aumentou também a capacidade da previsão do tempo a curto e a médio prazo e está em desenvolvimento a possibilidade de modificação e controlo do tempo. E, neste aspecto, podemos dizer que as modificações provocadas das condições meteorológicas e o seu controlo constituem uma influência internacional, benéfica e vantajosa do homem sobre o clima.

Vamos analisar, o nosso estudo, cada um destes possíveis modos de interferência. Dada a importância atmosférica na adulteração do ambiente, parece-nos importante que tratemos dos aspectos técnicos e científicos do problema, porque só assim poderemos compreender a sua influência.

## II — POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

## 1 — A POLUIÇÃO DO AR

### 1.1 — Introdução

O problema da poluição atmosférica só começou a ser encarado a sério a partir da década dos 60 ainda que, anteriormente, desde o séc. XVI tivesse vindo a causar preocupações. Entretanto, ultimamente, tornou-se um dos problemas mais importantes para a preservação do ambiente e passou a constituir, pode dizer-se, uma preocupação geral do grande público. Foi devido a um alerta generalizado que se tem vindo a conter a poluição atmosférica e a evitar males maiores. A introdução de instrumentação adequada, principalmente nos automóveis, tem vindo a reduzir substancialmente os níveis da poluição. Como em todo o Mundo, em Portugal tem-se vindo a tomar algumas medidas preventivas contra a poluição atmosférica e espera-se que a legislação, já há tempos preparada, possa vir a ser posta em execução e dar os seus resultados, contribuindo para remediar alguns males e para a melhoria da qualidade do ambiente.

Parece vantajoso, neste ponto, que se discutam os aspectos mais relevantes da poluição atmosférica. Por isso, torna-se indispensável recorrer à Meteorologia, à Física e à Química e, principalmente, analisar do ponto de vista meteorológico alguns dos problemas que põe a formação da poluição, no que diz respeito à distribuição da sua concentração, à sua dispersão e difusão, ao seu transporte e, finalmente (assim o esperamos), à sua remoção da atmosfera.

É possível, através das Leis da Meteorologia Dinâmica e da Meteorologia Sinóptica, inferir as condições que podem levar à acumulação da poluição e avaliar não só as concentrações a esperar, como as regiões que vão ser mais afectadas.



Além disso, é possível prever as condições meteorológicas que levam à existência de níveis elevados de poluição, permitindo, assim, tomar medidas preventivas, adequadas.

Neste estudo, os factores meteorológicos mais importantes são os ventos, o regime turbulento da camada limite e o tipo de equilíbrio da atmosfera. Este constitui um factor decisivo para a formação da poluição na atmosfera. Por isso, vamos analisá-lo em pormenor.

## 1.2 — Aspectos gerais da poluição

Os poluentes são substâncias que, quando presentes na atmosfera, em determinadas condições, se podem tornar deletérios para a vida do homem, dos animais, das plantas ou para o património, ou que interfiram com o bem-estar e a qualidade de vida do homem.

Esta concepção acentua os efeitos sobre os receptores e inclui as fontes naturais e antropogénicas.

Neste trabalho, a nossa atenção incidirá sobre os factores de ordem meteorológica, física e química, que conduzem a uma poluição, mais ou menos acentuada, num dado local, principalmente ligada às actividades do homem.

Os grandes factores que determinam a poluição são:

- i) a natureza e a intensidade das fontes poluidoras;
- ii) o estado de equilíbrio da atmosfera;
- iii) os ventos.

É evidente que são a taxa de emissão dos poluentes e a sua natureza que constituem o problema central da poluição. Sem fontes não havia emissão e sem emissão não há poluição. Mas, é também importante conhecer as características da fonte, incluindo a geometria, a altura efectiva do lançamento dos poluentes e a duração do seu funcionamento.

Depois dos poluentes terem sido lançados na atmosfera, a dispersão e o transporte são controlados por movimentos da atmosfera (turbulência, ventos) de várias escalas. A estratificação da atmosfera é também importante, porque esta condiciona a estabilidade da atmosfera. Esta, por sua vez, controla a intensidade da turbulência da atmosfera, a impulsão térmica, a con-

vecção e a espessura da camada de mistura. A acção conjunta da turbulência e da estabilidade da atmosfera permite regular a dispersão ao longo da vertical e a substituição do ar poluído por ar «puro» de níveis superiores.

Os ventos têm um papel crítico para a dispersão horizontal dos poluentes e para o seu transporte. Além disso, devido ao efeito de atrito com a superfície, geram a turbulência mecânica que contribui para a mistura e dispersão da poluição na camada limite. A direcção do vento é importante, porque comanda o movimento geral da nuvem poluidora. A velocidade do vento determina a distância «da queda» da poluição e a sua diluição, devido ao alargamento da pluma de emissão.

Os poluentes, enquanto se mantêm suspensos na atmosfera, podem ficar sujeitos a reacções químicas. Estas reacções e transformações estão dependentes das características meteorológicas das massas de ar, tais como o seu teor em vapor de água, o tipo de nuvens, a temperatura, a intensidade da radiação solar e a presença, ou ausência, de partículas estranhas. Da mesma forma, a renovação ou a «lavagem» da atmosfera é condicionada pela quantidade e pelo estado da atmosfera através da adsorção por gotículas de nuvens, impactação, etc.

É importante acentuar que, mesmo que a emissão das fontes se mantenha constantemente uniforme e em regime permanente, a qualidade do ar pode apresentar uma ampla variedade de condições. A variabilidade é, de facto, introduzida pelas flutuações das condições meteorológicas e, portanto, pela capacidade da atmosfera transportar, diluir, transformar e renovar os poluentes.

Ainda que a atmosfera tenha, em geral, uma grande capacidade de diluição, muitas vezes, há circunstâncias em que essa capacidade se reduz e, então, surgem os grandes episódios da poluição.

Notaremos que, ao contrário do que acontece com o solo e mesmo com as águas, a atmosfera é um excelente meio de diluição dos efluentes. Uma vez dispersos os materiais é muito difícil recapturá-los e, por isso, o controlo da poluição deve ter uma índole profilática, preventiva, porque não se divisam terapêuticas curativas fáceis.

### 1.3 — Estabilidade da atmosfera

O equilíbrio hidrostático da atmosfera pode ser estável, instável e indiferente, ou neutro. As trovoadas e a poluição, por exemplo, ocorrem em condições diametralmente opostas do equilíbrio. As trovoadas observam-se quando a atmosfera é estaticamente instável. Numa atmosfera instável, qualquer pequena perturbação tende a crescer rapidamente e é suficiente para revolver por completo o ar de uma camada da atmosfera. As trovoadas formam-se no ar ascendente, enquanto que o céu se apresenta limpo nas regiões em que o ar, por compensação, desce (subsidência).

Por outro lado, a poluição atmosférica ocorre sempre que a camada de ar junto ao solo é estável. Nestas condições, o ar da camada não se mistura e qualquer perturbação, que se forme na atmosfera, tende imediatamente a ser neutralizada. Logo, nestas condições, a poluição que é lançada na atmosfera não se pode dispersar e, por isso, tende a acumular-se na camada de ar junto ao solo.

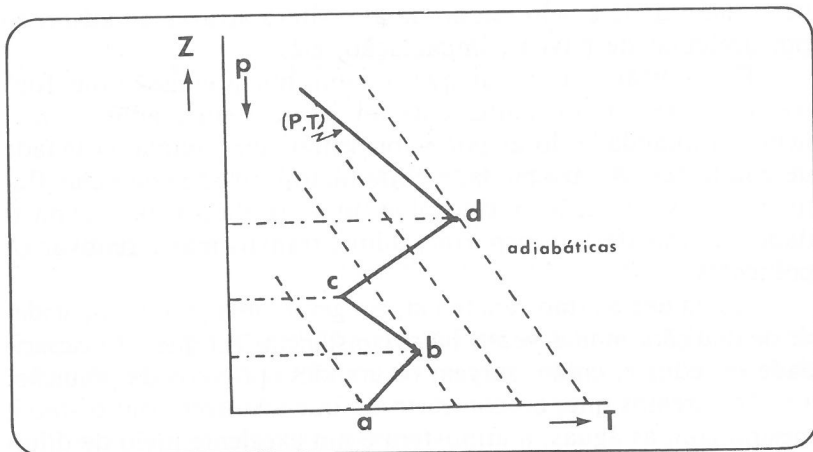


Fig. 1 — Os diagramas aerológicos servem para representar o estado da atmosfera em altitude ao longo da vertical. Na figura está representada a cheio a curva de estado ambiente que dá a variação da temperatura com a altitude. A tracejado estão representadas as variações da temperatura duma partícula se subisse ou descesse na atmosfera adiabaticamente (sem transferência de calor). Em geral a temperatura decresce com a altitude, mas há excepções como nas inversões de temperatura (camadas ab e cd).

Mas como é que se verifica se o equilíbrio da atmosfera é estável, neutro, ou instável? Pois bem, consideremos uma partícula conceptual (ideal) de ar e desloquemo-la verticalmente da sua posição inicial para uma nova posição. Se a partícula na nova posição estiver mais quente do que a sua nova vizinhança, continuará a subir, porque é mais leve do que o ar vizinho (é o caso do balão de S. João). E o equilíbrio da atmosfera diz-se, então, *instável*. Se pelo contrário, a partícula depois do deslocamento vertical estiver mais fria do que o ar vizinho, tende a regressar à posição inicial, porque agora é mais densa do que o ar ambiente. A atmosfera diz-se então *estável*. A terceira hipótese será a que corresponde à igualdade de temperaturas depois da ascensão da partícula com o ar vizinho. O equilíbrio diz-se, então, *neutro* ou *indiferente*. A partícula continua a «flutuar» na nova posição.

Ora, como sabemos que a temperatura decresce com a altitude e que, quando o ar sobe, a sua temperatura diminui. Em geral, o processo de ascensão da partícula é muito rápido e, como o ar é um bom isolante, admite-se que não há trocas de calor entre a partícula e o ar ambiente, durante a sua ascensão. Diz-se, neste caso, que o processo é *adiabático* (do grego «não troca calor»). Por isso, é muito frequente falar em arrefecimento adiabático do ar com a ascensão (o ar expande-se) e em aquecimento adiabático do ar com a subsidência (compressão).

A taxa de variação da temperatura com a altitude  $Z$ ,  $\Delta T/\Delta Z$  chama-se gradiente vertical de temperatura. Se o gradiente vertical se refere à taxa de variação da temperatura duma partícula individual no seu movimento vertical, em que não troca calor com o meio ambiente, chama-se *gradiente adiabático*  $\Gamma$  e é, aproximadamente, dado por:

$$\Gamma = \frac{(\Delta T)_{\text{part.}}}{\Delta Z} = \frac{10^{\circ}\text{C}}{1 \text{ km}} = 1,0^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$$

Pelo contrário, se o gradiente vertical de temperatura se refere ao ar ambiente (estático, sem movimento) diz-se, então, que se trata do gradiente de temperatura ambiente,  $\gamma$ . Enquanto que  $\Gamma$  tem o valor bem determinado,  $\gamma$  é muito variável de local para local e de dia para dia. Em geral, a temperatura ambiente de-

crece com a altitude e o gradiente vertical tem valor da ordem de

$$\gamma = \frac{\Delta T_{amb}}{\Delta Z} = \frac{6^{\circ}\text{C}}{1 \text{ km}} = 0,6^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$$

Portanto, no caso geral,  $\gamma < \Gamma$ .

Mas, pode acontecer que, nalgumas circunstâncias, a temperatura em vez de diminuir com a altitude aumente, isto é, que seja:  $\gamma < 0$ . Diz-se, neste caso, que há uma inversão de temperatura. Por exemplo, esta situação verifica-se muitas vezes durante a noite e a madrugada na camada da atmosfera junto ao solo e em noites de Inverno e de céu limpo («lunar de Janeiro é traiçoeiro»). Devido ao forte arrefecimento nocturno do solo, a camada de ar vizinho arrefece também. Em resultado deste arrefecimento fica a temperatura muito mais baixa do que o ar a umas centenas de metros de altitude.

Outra situação em que se observa uma inversão de temperatura é a que ocorre nos centros de altas pressões (anticiclones), mas esta é de origem diferente da anterior. Na região central de um anticiclone verifica-se uma forte subsidência do ar, devido

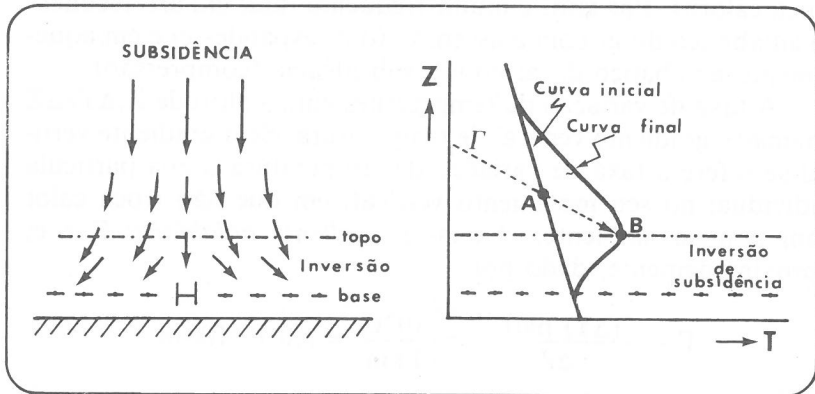


Fig. 2 — Inversão da temperatura devido ao aquecimento adiabático provocado pela compressão associada à subsidência muito comum nos anticiclones. A figura da direita dá a representação termodinâmica do diagrama altura-temperatura.

aos valores elevados da pressão. Esta subsidência, com a compressão adiabática do ar, leva a um forte aquecimento adiabático das camadas da baixa atmosfera, originando assim uma inversão de temperatura muito persistente.

Retomemos o estudo do equilíbrio da atmosfera. É fácil ver que este pode ser determinado a partir do conceito de *estabilidade estática*  $s$ , definida pela diferença entre o gradiente de temperatura  $\Gamma$  do ar ascendente e o gradiente de temperatura  $\gamma$  do ar ambiente:

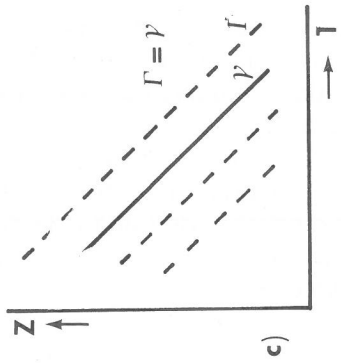
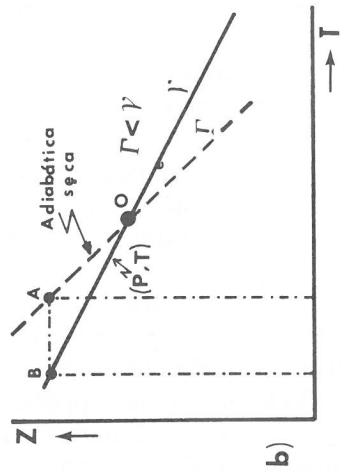
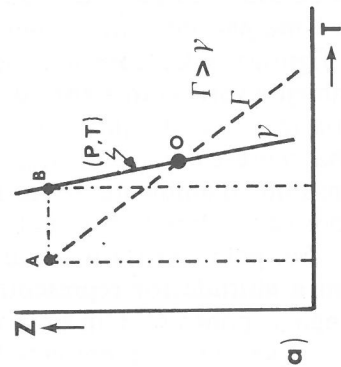
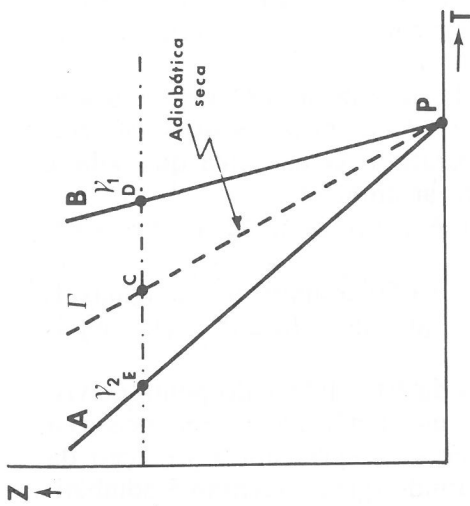
$$s = \eta(\Gamma - \gamma)$$

- a)  $s$  é positivo, o equilíbrio é estável ( $\Gamma > \gamma$ ), porque a temperatura do ar que sobe é sempre inferior à do ar ambiente.
- b)  $s$  é negativo, o equilíbrio é instável ( $\Gamma < \gamma$ ), e o gradiente de temperatura do ambiente  $\gamma$  diz-se superadiabático, e a temperatura da partícula que sobe é sempre superior à do ar ambiente;
- c)  $s$  é nulo, o equilíbrio é neutro ou indiferente ( $\gamma = \Gamma$ ).

A temperatura da partícula e a do ar ambiente são iguais. É evidente que, com uma inversão de temperatura ( $\Gamma \gg \gamma$ ), o equilíbrio é fortemente estável.

Vejam agora o problema da estabilidade do ponto de vista gráfico. Em ordenadas marcamos a altitude  $z$  e em abscissas a temperatura  $T$ . A linha a tracejado representa a variação da temperatura da partícula, admitindo que a ascensão é adiabática. Uma partícula, inicialmente em P, arrefece até atingir o ponto figurativo C, com a temperatura  $T_c$ . Se a temperatura do ambiente varia com a altitude segundo a linha PA, a partícula ficaria mais fria do que o ar vizinho e a diferença de temperatura seria representada pelo segmento CD; a partícula, sendo mais densa que o ambiente, se for levada ao nível C, tende a regressar à posição anterior. E o equilíbrio é estável.

Se, pelo contrário, a variação da temperatura do ambiente com a altitude for representada pela linha PB, a partícula, ao atingir o ponto C, tem uma temperatura superior e a diferença de temperaturas é representada pelo segmento EC. A partícula é



Figs. 3, 3a, 3b, 3c) — Processo para determinar a estabilidade da atmosfera a partir do declive da curva de estado. a) Se a curva de estado está mais inclinada para a direita do que a adiabática, o equilíbrio é estável; b) Se a curva de estado fica inclinada para a esquerda em relação à adiabática o equilíbrio é instável; c) Se as curvas de estado e a adiabática coincidirem

mais leve do que o ar ambiente e, por isso, tende a continuar a subir. Neste caso o equilíbrio é instável. O gradiente da temperatura ambiente,  $\gamma$ , é superadiabático ( $\gamma > \Gamma$ ).

Se a temperatura em P for  $T_o$ , a partícula atinge o nível C com a temperatura  $T_c$ , tal que:

$$T_c = T_o - \Gamma z$$

A temperatura  $T$  do ar ambiente ao mesmo nível é dada por

$$T = T_o - \gamma z$$

e o excesso da temperatura da parcela em relação à temperatura ambiente é expressa pela diferença:

$$T_c - T = -(\Gamma - \gamma)z$$

- i) Se  $T_c - T < 0$  a atmosfera é estável e  $\gamma < \Gamma$  (o gradiente de temperatura do ambiente,  $\gamma$ , é subadiabático);
- ii) Se  $T_c - T > 0$  a atmosfera é instável e  $\gamma > \Gamma$  (o gradiente  $\gamma$  é superadiabático);
- iii) Claro que, se  $T_c = T$ , os gradientes  $\gamma$  e  $\Gamma$  coincidem,  $\gamma = \Gamma$ , e o equilíbrio é neutro.

Podemos, portanto, concluir que, numa atmosfera seca, o equilíbrio é estável, quando a curva de estado do ambiente está à direita da linha adiabática e é instável, quando a curva de estado está à esquerda da adiabática.

Recorrendo à figura 1 que representa uma sondagem da temperatura ambiente em altitude, verificamos que, na camada (ab) há uma inversão de temperatura e outra na camada (cd). Nestas camadas os gradientes de temperatura são fortemente negativos e o equilíbrio é muito estável.

A inversão de temperatura (ab) pode ser devida ao arrefecimento nocturno e a inversão (cd) à subsidência ou a uma superfície frontal.



## 2 — FACTORES METEOROLÓGICOS DA POLUIÇÃO

### 2.1 — Efeito da estabilidade da atmosfera

Os factores meteorológicos que afectam a concentração da poluição são a direcção e a velocidade do vento, o tipo de equilíbrio hidrostático da atmosfera, determinado pelo gradiente vertical da temperatura, e a temperatura do ar. Estes factores determinam a velocidade com que se diluem os contaminantes por dispersão no ar, depois de deixarem a fonte. A velocidade do vento determina o volume inicial de ar «limpo», em que se vão diluir os poluentes, e as flutuações na direcção e na velocidade (v. g. rajadas) vão determinar a taxa de dispersão horizontal, à medida que são transportadas pelos ventos.

A estabilidade hidrostática controla a taxa de diluição dos poluentes com o ar limpo acima e abaixo do nível de transporte, visto que aquela condiciona os movimentos verticais. De facto, se o gradiente vertical de temperatura for superadiabático o equilíbrio é instável e a mistura ocorre imediatamente e a diluição é rápida. Notemos que, neste caso, a temperatura das partículas que sobem, ficando sujeitas a um gradiente adiabático de temperatura, ficam, em qualquer nível, com temperaturas superiores às do ambiente (com gradiente superadiabático). Logo, as partículas ficariam mais leves do que o ar ambiente e, tal como um balão de S. João, tendem a subir ainda mais. Se o gradiente vertical da temperatura ambiente é adiabático, as partículas que sobem têm também um gradiente adiabático; ficam sempre à mesma temperatura do ar vizinho. O equilíbrio é, neste caso, neutro ou indiferente.

Se há uma inversão de temperatura o equilíbrio é muito estável e não se dá a mistura vertical. A diluição no ar só ocorre ao longo e sobre a superfície da base da inversão. Notaremos que o equilíbrio é estável, porque a temperatura de qualquer partícula que suba segue um gradiente adiabático, e, portanto, ficaria mais fria que o ar ambiente (com um gradiente vertical de temperatura positivo:  $\Gamma - \gamma > 0$ ). O ar que subiria era mais denso do que o ar ambiente e, portanto, tende a cair e a voltar à posição inicial.

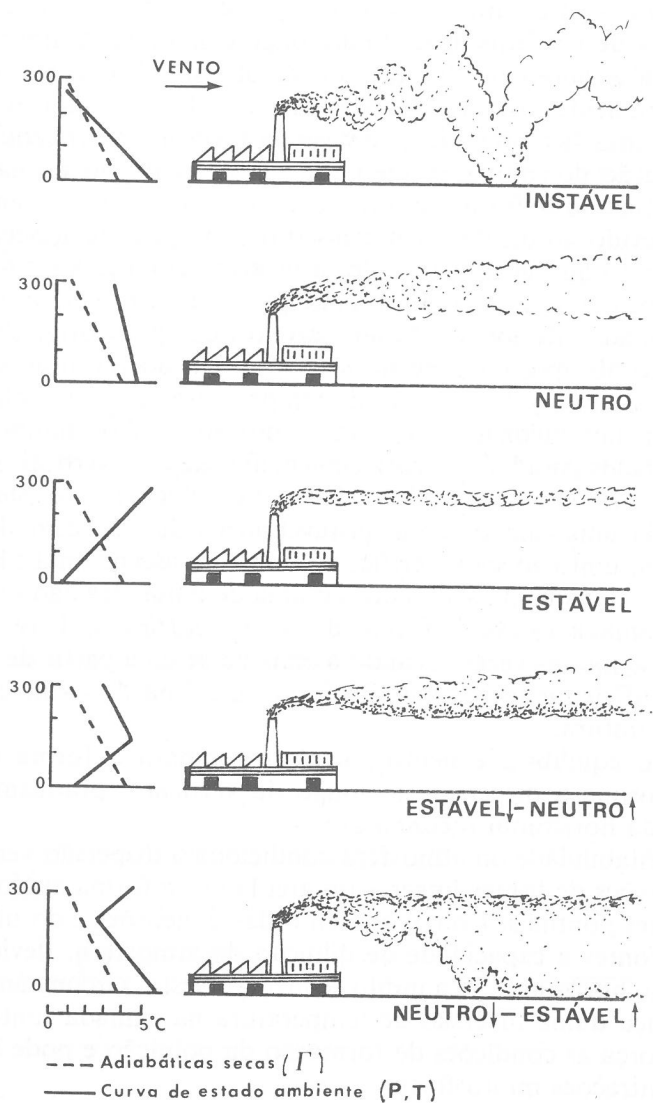


Fig. 4 — Configurações características das plumas para os vários tipos de distribuição da temperatura da atmosfera com a altitude (curva a cheio). A curva a tracejado representa a variação da temperatura das partículas em transformações adiabáticas.

A estabilidade impede, portanto, a difusão ao longo da vertical (para cima e para baixo) e a dispersão é, portanto, lateral em forma de um leque («fan») ao longo e sobre uma superfície horizontal («fanning»). Se, na camada abaixo da inversão, o ar for ligeiramente instável, ou neutro, pode dar-se a diluição na camada, mas fica limitada pela base da inversão, verificando-se a fumigação do solo. É o que pode acontecer depois do nascer do Sol, quando se forma uma inversão de temperatura durante a noite, devido ao arrefecimento nocturno. Depois do nascer do Sol, com o aquecimento do solo, a inversão começa a ser «destruída» pela base e o equilíbrio pode passar a ser mesmo instável nesta camada inferior. A «fumigação do solo» pode originar um acréscimo abrupto da concentração da poluição junto ao solo, até aí incólume, pela inversão de temperatura junto ao solo.

Com instabilidade na camada junto ao solo os fumos são transportados para baixo e para cima com meandros verticais rápidos, conduzindo a uma diluição rápida dos poluentes («looping»). Se houver uma camada de ar instável acima de uma camada de ar estável, junto ao solo, verifica-se a mistura ascensional e horizontal na camada instável, mas a pluma de poluentes não «invade» a camada estável, vizinha do solo («lofting»). Este caso verifica-se muitas vezes, quando a emissão se dá a partir de chaminés, suficientemente altas, no topo ou acima duma inversão de temperatura.

Se o equilíbrio é neutro, a pluma tomará a forma dum cone, porque a dispersão ao longo da vertical é praticamente igual à da horizontal («conning»).

A estabilidade da atmosfera condiciona a dispersão vertical das emissões de fontes lineares ou areolares de forma análoga à das fontes pontuais. Com o aumento das dimensões e do número das fontes a capacidade de diluição da atmosfera, devido à dispersão horizontal, fica muito reduzida. Nestas circunstâncias, a presença duma inversão de temperatura na camada junto ao solo reforça as condições de formação da poluição e pode levar a concentrações muito fortes.

## 2.2 — Efeito dos ventos e da turbulência

O movimento do ar é, praticamente, sempre turbulento, no sentido de que a velocidade e a direcção estão constantemente a variar de forma irregular e aleatória. Estas variações são devidas à sucessão de pequenos turbilhões que se formam e se movem, quase ao acaso, e depois se misturam com o ar vizinho, e são absorvidos, enquanto que outros novos turbilhões se vão formando. O movimento destes turbilhões é muito importante para a distribuição de calor e de humidade nas camadas inferiores da atmosfera, onde a turbulência é mais frequente.

A turbulência pode ser de origem mecânica, devido ao atri-

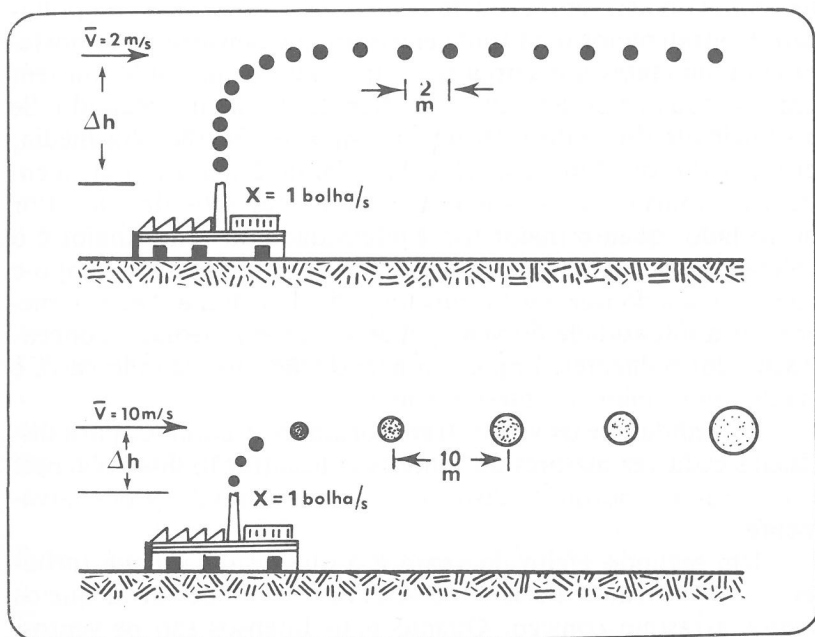


Fig. 5 — Efeito da velocidade do vento na concentração dos poluentes. As dimensões das «bolhas» pretendem indicar o volume de ar limpo em que se misturam os poluentes. Quanto mais intensos forem os ventos menores são as concentrações, porque as bolhas estão mais distanciadas e têm um volume maior. No primeiro caso, com ventos mais fracos, a «altura efectiva» da chaminé também é menor do que no segundo.

to na interface atmosfera-superfície do globo, ou de origem térmica devido ao desigual aquecimento da superfície. A turbulência é muito mais acentuada quando a atmosfera é instável e os ventos são fortes e com rajadas. Com ventos calmos, a turbulência é praticamente inexistente. A turbulência constitui um mecanismo muito eficiente de mistura na atmosfera, causando uma agitação uniforme, que leva à dispersão e à diluição dos poluentes na atmosfera.

Acima da camada limite da atmosfera, os ventos são regulares e são determinados pela força do gradiente da pressão e pela força deflectora da Terra, associada ao seu movimento de rotação. Em geral, a intensidade dos ventos aumenta com a altitude e a sua direcção varia também. Vejamos, então, a influência que os ventos podem ter na distribuição e na concentração da poluição. Consideremos uma fonte emissora que lançasse na atmosfera contaminantes por impulsos. Suponhamos que cada um tem uma unidade de massa e que são intervalados de um segundo. Se a velocidade do vento é 10 m/s os impulsos ficarão, em média, distanciados de 10 m; se a velocidade for de 2 m/s a distância entre os impulsos consecutivos dos poluentes será de 2 m. Por outro lado, quanto maior for a intensidade do vento maior é o volume de ar que passa pela fonte em cada unidade de tempo e menor será a concentração, por unidade de volume. Quanto menor for a intensidade do vento, maior será em média, a concentração dos poluentes. Logo, a concentração, no segundo caso, é cinco vezes maior do que no primeiro.

À medida que os ventos transportam o ar poluído, para distâncias cada vez maiores da fonte, a concentração dos poluentes vai baixando, porque a dispersão vai aumentando progressivamente.

Um segundo efeito do vento é o que resulta da sua turbulência que se traduz pelas dimensões dos turbilhões de ar que os ventos arrastam consigo. Quanto mais intensos são os ventos, maior é a turbulência, de tal forma que o ar poluído se mistura mais rapidamente com o ar vizinho e, portanto, fica mais diluído. Se os ventos são fracos a turbulência também é fraca e a concentração mantém-se elevada.

A turbulência manifesta-se através das flutuações da velocidade e da duração das rajadas dos ventos. As flutuações na

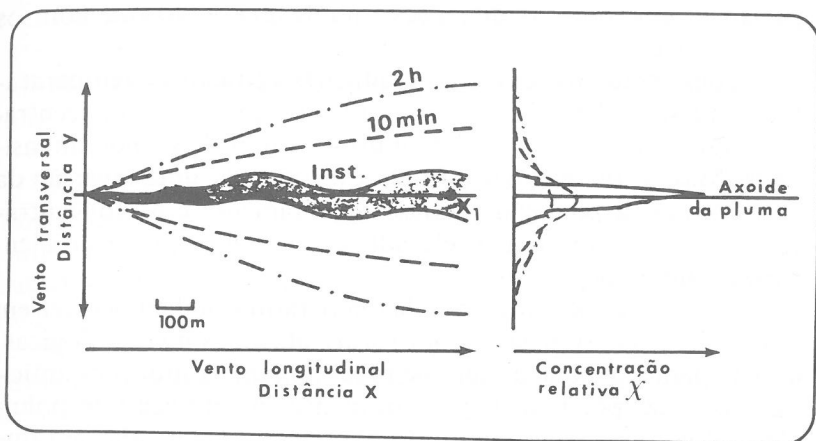


Fig. 6 — Configuração em plano da pluma instantânea observada e das posições médias para períodos de 10 minutos e de 2 horas. À direita apresenta-se a distribuição da concentração média dos poluentes observada no ponto.

velocidade provocam uma mistura ao longo da direcção dos ventos. As flutuações na velocidade provocam uma mistura ao longo dos ventos médios dominantes, enquanto que as flutuações na direcção produzem uma mistura lateral, em torno do vento médio. De facto, a turbulência atmosférica resulta da existência de pequenos turbilhões em torno de eixos verticais, horizontais e outros, que provocam a mistura do ar com o ar vizinho circundante. Por isso, a turbulência diminui a concentração local dos contaminantes e, quanto mais intensa for, maior será a dispersão do poluente.

Os dois mecanismos que originam a formação dos turbilhões são o aquecimento desigual do ar junto à superfície e a existência na atmosfera de gradientes transversais da velocidade. Os primeiros caracterizam a turbulência térmica que, quando é organizada, gera a convecção. Os segundos provocam efeitos de corte com atrito interno e geram a turbulência mecânica. Como vimos, a mistura vertical é em larga medida controlada pela estabilidade hidrostática da atmosfera. Mas, para a mesma estabilidade, a mistura vertical varia com a turbulência, isto é, com o regime da velocidade do vento. Logo, com ventos fracos, a dis-

persão é, em todas as direcções, muito menor do que com os ventos fortes.

Com ventos fortes e com gradientes verticais de temperatura grandes, a dispersão dos poluentes é rápida e as concentrações significativas só ocorrem junto às fontes de grande intensidade. Mas, se os ventos são fracos e se verificar uma inversão da temperatura, a poluição difunde-se lentamente e as concentrações podem ser muito mais elevadas, se as fontes forem suficientemente intensas.

Ventos fracos e inversões de temperatura podem ocorrer em diferentes circunstâncias e com várias situações meteorológicas, designadamente aquelas em que predominam as situações anticiclónicas. Há, por isso, regiões propensas à formação de poluição, tal como a região oeste do continente Americano em que predomina a circulação do anticiclone do Pacífico Norte. Com este tipo de circulação, os ventos são fracos e variáveis e forma-se uma forte inversão de temperatura devida à subsidência (compressão adiabática) da atmosfera. Com a topografia característica da região circundante reúnem-se as condições para que a concentração seja máxima.

A concentração dos poluentes é ainda afectada pelas reacções químicas que alteram a sua composição. Podemos mencionar o *smog* fotoquímico de Los Angeles e o *smog* químico de Londres. A concentração pode ainda ser afectada pelos processos dinâmicos e termodinâmicos que levam à remoção ou à estagnação dos poluentes. Temos, neste caso, de considerar dois tipos de processos: a remoção por *via húmida* em que as partículas são agregadas e se dissolvem nas gotículas das nuvens e da precipitação, e a remoção por *via seca* em que os poluentes sólidos e líquidos caem por gravidade. Os poluentes gasosos, depois de serem absorvidos ou adsorvidos por outros poluentes, caem também por acção da gravidade. Como as partículas poluentes, são muito pequenas, a acção da turbulência contraria o processo de remoção e a remoção por via seca é, por isso, muito lenta. Já a remoção por via húmida pode ser mais eficiente, como veremos ao tratar da precipitação ácida.

### 3 — OS PRINCIPAIS POLUENTES DA ATMOSFERA

Os principais tipos de poluentes e as suas fontes são os seguintes:

a) Partículas emitidas por fontes naturais (vulcões, meteoritos, fogos de florestas, rebentamento das ondas, etc.) e por fontes antropogénicas (combustão, processos industriais, construção, etc.). A matéria particulada inclui partículas sólidas e líquidas;

b) Compostos de enxofre. Estes entram na atmosfera sob a forma de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), ácido sulfídrico ( $SH_2$ ), ácido sulfuroso ( $H_2SO_3$ ), ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), e de sulfatos. Cerca de 60% dos poluentes com compostos de enxofre provêm de fontes naturais. Entre estes destaca-se o  $SH_2$ , proveniente da acção de bactérias existentes em águas pantanosas. Por outro lado, o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) é, de longe, o poluente antropogénico mais importante;

c) Óxidos de carbono ( $CO_x$ ). Começamos pelo monóxido de carbono. Este forma-se em todos os processos de combustão incompleta de matéria orgânica. As fontes naturais são relativamente pouco importantes, e as fontes antropogénicas (de origem humana), mais salientes, são os motores de combustão interna. Como se sabe, valores muito elevados das concentrações de  $CO$  são potencialmente letais, porque a sua absorção pela hemoglobina reduz a capacidade de fixação do oxigénio pelo sangue. O dióxido de carbono, ( $CO_2$ ), por ser um componente tão essencial em todos os processos da vida (fotossíntese) não se considera como um poluente;

d) Hidrocarbonetos { $CH$ }. São originados, em geral, pela decomposição da vegetação e pela combustão de combustíveis fósseis;

e) Óxidos de nitrogénio ( $NO_x$ ).

Na *Tábua I* dá-se uma estimativa das emissões de poluentes pelas principais fontes antropogénicas nos Estados Unidos da América, segundo elementos publicados pela EPA (Environmental Protection Agency) em 1977.



Tábua I

Estimativa das quantidades de poluentes emitidos por várias fontes, nos Estados Unidos, em milhões de toneladas (USA-EPA 1977)

Tipos de fontes	Partículas	Óxidos de enxofre	Óxidos de nitrogénio	Compostos voláteis orgânicos	Monóxido de carbono
Transportes .....	1,1	0,8	9,2	11,5	85,7
Combustão (domésticas; comerciais e institucionais) .....	4,8	22,4	13,0	1,5	1,2
Processos industriais (petroquímica, fundição, etc.) .....	5,4	4,2	0,7	10,1	8,3
Detritos sólidos .....	0,4	0,1	0,1	0,7	2,6
Vários (fogos, queimadas, práticas agrícolas) .....	0,7	0,0	0,1	4,5	4,9
Total .....	12,4	27,4	23,1	28,3	102,7

Os tipos de poluição do ar, mais comuns, são a poluição sulfurosa e a poluição fotoquímica. A poluição sulfurosa é, principalmente, devida à queima do carvão e à fundição de vários minérios. O carvão, além do carbono, contém, por vezes, impurezas em que os componentes de enxofre são predominantes. Quando se queima o carvão, lançam-se na atmosfera quantidades enormes de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), quantidades consideráveis de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), e, ainda, quantidades avultadíssimas de partículas e fumos betuminosos.

Muitos dos minérios são constituídos por sulfuretos (pirites, blenda, etc.). A fundição destes minérios leva à separação dos vários metais do enxofre que, por sua vez, é oxidado pelo oxigénio da atmosfera, libertando  $SO_2$ . Este, se não houver dispositivos de redução da poluição, pode ser lançado na atmosfera, aumentando a poluição de modo considerável.

Uma vez na atmosfera, pode actuar como núcleo de condensação e facilitar a condensação do vapor de água, que na presença daquele pode ocorrer para valores da humidade relativa

da ordem de 70%. Claro que, em presença do oxigénio o dióxido transforma-se facilmente em trióxido de enxofre, originando gotículas de ácido sulfúrico diluído. É, por isso, que a vegetação na vizinhança das fundições sofre tantos estragos e, como veremos, mais tarde, pode mesmo levar à formação de precipitação ácida, que pode cair longe da região em que a nucleação teve lugar.

Outro tipo de poluição é o «smog fotoquímico» que é muito diferente do «smog sulfuroso». O smog fotoquímico resulta da existência de óxidos de nitrogénio, de hidrocarbonetos, de algum ozono e de vestígios de chumbo. Forma-se quando se queima gasolina e gasóleo nos motores de combustão interna (automóveis) e é muito frequente em Los Angeles. Não é mortífero como o smog sulfuroso, mas nem por isso deixa de ser desagradável. A característica deste smog é que reduz a visibilidade e dá um tom acastanhado à atmosfera, devido à presença dos óxidos de nitrogénio. Tem um odor que com o hábito desaparece e provoca irritação nos olhos.

Além dos óxidos de nitrogénio, que se formam com altas temperaturas dos motores de combustão, por acção do oxigénio sobre o azoto do ar, formam-se também muitos hidrocarbonetos. Estes, actuando em conjunto, com a acção catalítica da luz, vão dar origem a um grande número de compostos e a ozono.

Esta poluição é prejudicial à agricultura e ao homem. Os dispositivos de controlo da poluição dos automóveis têm provado serem eficientes. A reciclagem dos produtos de exaustão leva à destruição de alguns dos produtos que doutra forma seriam expelidos, designadamente, vários hidrocarbonetos.

#### 4 — O CICLO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Todos nós, principalmente nas grandes cidades, temos enfrentado dias em que o ar se apresenta tão poluído, tão «espesso», com uma visibilidade tão reduzida, ou com uma bruma acastanhada tão intensa, por vezes tão «pesado», que mais parece estarmos numa atmosfera de uma garagem subterrânea, sem ventilação. Depois, de repente, com a passagem duma superfície

frontal, o ar torna-se transparente, o céu mais azul, a atmosfera mais «leve» e, como que por encanto, a poluição desaparece.

É quase para admirar que ainda haja tanto ar limpo na atmosfera. Por outro lado, não se conhece nenhuma estação natural de purificação ou de filtragem do ar, nem nenhum reservatório em que se acumule ar puro para depois ser distribuído!

Felizmente, a poluição, que é lançada na atmosfera, depois de se dispersar, de se misturar e de se difundir, é, finalmente, removida por processos naturais, mais ou menos rápidos, conforme os mecanismos responsáveis pela remoção. Tudo se passa como se os poluentes ficassem sujeitos a um ciclo de transformações que os lançasse, os transportasse e depois os removesse da atmosfera. Por isso, podemos falar de um ciclo de poluição. Só que este ciclo pode ser relativamente rápido, ou extremamente lento, o que faz variar, de forma considerável, a concentração da poluição atmosférica numa dada região, no decurso do tempo.

A primeira fase do ciclo é a que corresponde ao lançamento dos poluentes na atmosfera, a partir das várias fontes de poluição. A segunda fase corresponde à difusão, à dispersão e ao transporte de poluentes na atmosfera. A terceira fase corresponde à remoção dos poluentes da atmosfera e ao seu regresso à superfície do globo.

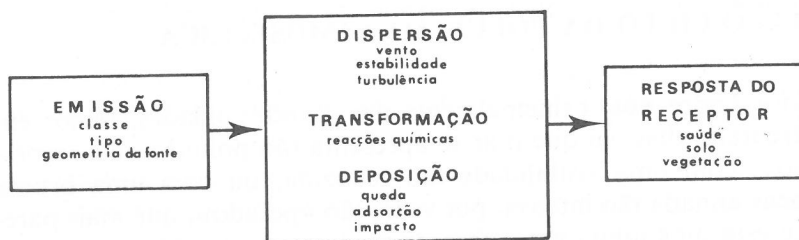


Fig. 7 — Fases do ciclo da poluição atmosférica.

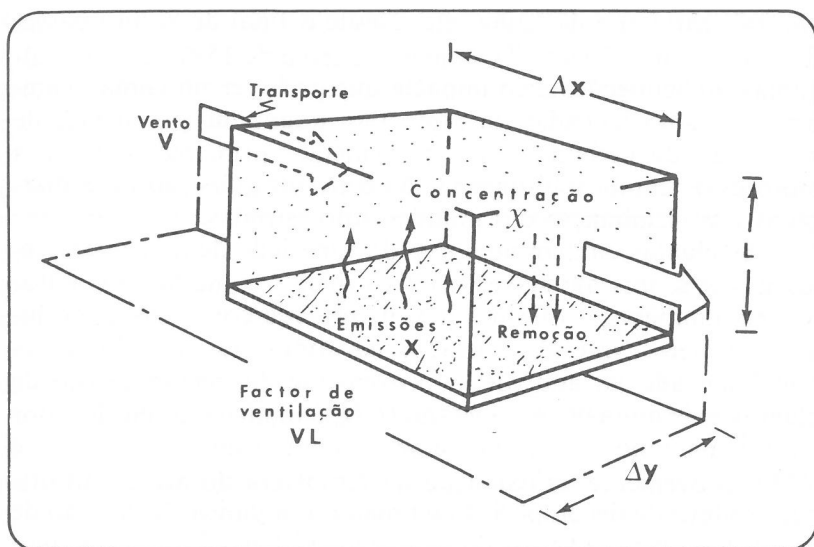


Fig. 8 — Um modelo simples de «caixa preta» de entrada-saída da poluição na camada limite da atmosfera.

a) *A primeira fase do ciclo: produção e lançamento da poluição na atmosfera*

A grande maioria das fontes poluidoras encontra-se junto à superfície do globo e, por isso, em geral, a concentração da poluição é maior nas camadas inferiores da atmosfera, e menos densa, em altitude.

Um facto que parece um pouco estranho é que as fontes naturais excedem, de longe, as fontes artificiais, criadas pela actividade do homem. Ainda que as fontes naturais tendam a concentrar-se localmente, existem por todo o globo e dominam as concentrações dos gases poluentes e das partículas sólidas ou líquidas, que formam o aerosol.

O poluente mais abundante é o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), que é lançado na atmosfera, principalmente através da respiração das plantas e dos animais, quer dos continentes, quer dos oceanos. No último século tem vindo a verificar-se um aumento de  $CO_2$  devido à utilização de combustíveis fósseis (petróleo, gás

natural, carvão) e da lenha, etc. Desde o final do século passado, a concentração de  $CO_2$  aumentou cerca de 15 %, gerando algumas preocupações pelo impacto que pode ter no clima. Também têm sido lançadas na atmosfera quantidades enormes de monóxido de carbono ( $CO$ ) proveniente, principalmente, dos motores de combustão interna. As concentrações são mais marcadas nas vizinhanças das grandes auto-estradas.

As plantas emitem uma grande variedade de hidrocarbonetos gasosos, uns agradáveis, outros menos cómodos. Os automóveis também produzem uma quantidade considerável de hidrocarbonetos, que são lançados na atmosfera. Um dos gases que é lançado na atmosfera, proveniente da decomposição de plantas e de animais, é o metano ( $CH_4$ ), também conhecido por gás dos pântanos. O mesmo se passa com o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), proveniente da oxidação na atmosfera do ácido sulfídrico, produto da decomposição da matéria orgânica. O dióxido de enxofre também se forma directamente e é lançado na atmosfera com a queima dos combustíveis fósseis, principalmente com as impurezas do carvão.

No que se refere às partículas sólidas, distribuídas na atmosfera e que constituem o aerosol, temos que considerar uma grande variedade de fontes. As partículas têm dimensões muito variáveis, indo de 0,001 a 0,2 micrómetros ( $\mu m$ ) de diâmetro. São designadas por núcleos de Aikten e resultam, em grande parte, da queima de materiais. Outras fontes naturais são os vulcões e os grandes fogos das florestas.

Os núcleos de Aikten produzem, por vezes, fenómenos ópticos estranhos e são os responsáveis pelos matizes dos crepúsculos e das alvoradas. Outras vezes produzem o raio verde (sol), o luar azulado e os «dias escuros». As partículas de maiores dimensões, núcleos gigantes, são muitas vezes provenientes das tempestades de areia nos grandes desertos, ou arrancadas pelos ventos dos solos não protegidos. Alguns destes núcleos são de argila e podem constituir núcleos de condensação. Outra fonte natural, importante, de aerossóis é o «loess» varrido pelos ventos, no deserto de Gobi, em direcção à China, principalmente durante o Inverno, quando os ventos são mais persistentes.

O rebentamento das bolhas de espuma das ondas dos mares constitui uma fonte importante de aerossóis para a atmosfera.

Sempre que se dá o rebentamento das vagas formam-se gotículas que são lançadas da atmosfera formando verdadeiros jactos. Estas, ao evaporarem-se deixam na atmosfera resíduos de sais, formando partículas de cloreto de sódio com diâmetros da ordem de  $2\mu\text{m}$  ou mais. Este processo de rebentamento e de evaporação é muito importante, porque estas partículas de cloreto de sódio, e de outros sais, formam os núcleos de condensação em torno dos quais se vão formar as gotas das nuvens, que depois vão originar a precipitação. Por outro lado, constituem uma fonte de cargas eléctricas para a atmosfera e, portanto, podem, em última análise, contribuir para as descargas eléctricas, que se verificam na atmosfera.

A distribuição das dimensões das partículas e as suas concentrações são muito variáveis. Mas, em geral, é nas áreas urbanas que as concentrações são mais elevadas, predominando, no entanto, as de pequenas dimensões (até  $0,4\mu\text{m}$ ) e as concentrações são, em regra, maiores nas massas de ar continental, do que nas massas de ar marítimo.

#### *b) A segunda fase do ciclo de poluição: dispersão e transporte*

A segunda fase do ciclo de poluição é constituída, como dissemos, pela dispersão e pelo transporte dos poluentes na atmosfera.

Esta fase apresenta problemas científicos extremamente difíceis de tratar. Por isso, é costume abordar, em primeiro lugar, o estudo da poluição provocada por fontes pontuais e, só depois, passar para fontes lineares (estradas) ou areolares (florestas, cidades, etc.).

Quando os poluentes são emitidos duma chaminé, em geral são mais quentes que o meio ambiente e por isso sofrem uma impulsão que os leva até níveis ligeiramente mais elevados, onde atingem o equilíbrio térmico com o ambiente. Por isso, a altura efectiva da chaminé é superior à sua altura geométrica. O ar poluído, emitido pela fonte, é depois transportado pelos ventos dominantes, formando como que uma pluma que se vai sucessivamente, alargando. Nas proximidades da fonte, a pluma é muito estreita e a concentração dos poluentes é muito elevada. À medi-

da que se avança a pluma alarga-se e os poluentes difundem-se e dispersam-se. A partir de certa altura a pluma torna-se invisível.

A estabilidade da atmosfera tem uma grande influência na estrutura e na forma da pluma. Numa atmosfera muito estável, as partículas da pluma não podem subir ou baixar livremente, e a pluma assume uma forma espalmada e é quase horizontal. Se a atmosfera for instável, as partículas da pluma podem subir ou descer livremente e esta toma uma forma ondulada, com meandros.

Nos dias de grande poluição, a atmosfera na camada inferior da atmosfera tem que ser extremamente estável. Por vezes, existe uma inversão de temperatura a algumas centenas de metros de altitude, que actua como se fosse uma tampa, mantendo os poluentes confinados a uma estreita camada de ar junto à superfície. É o que se passa frequentemente em Los Angeles.

A dispersão dos poluentes é feita através de um processo muito complexo de difusão turbulenta em que os movimentos

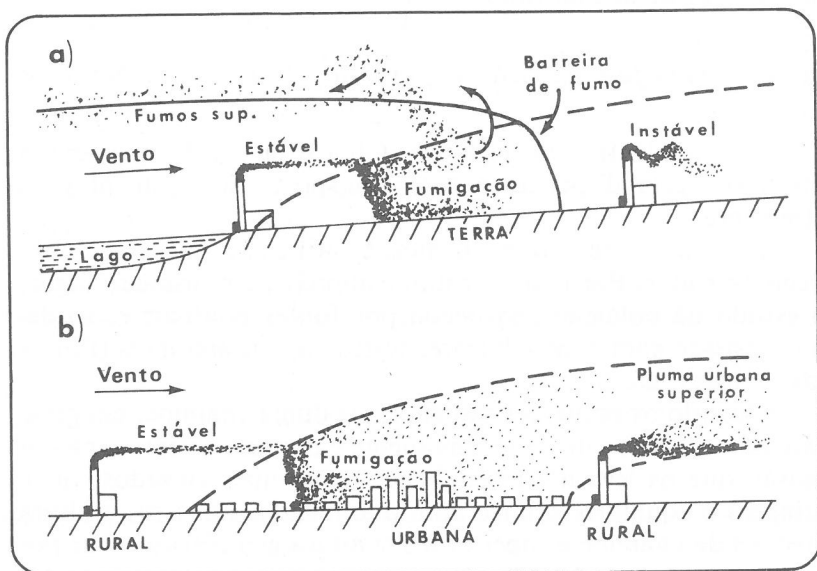


Fig. 9 — Comportamento da pluma (a) nas vizinhanças da linha de costa devido ao efeito da brisa marítima; b) na vizinhança da ilha urbana em noites claras e com ventos fracos.

turbilhonários do ar são altamente erráticos e imprevisíveis. Com a difusão simples os poluentes espalhavam-se de uma maneira mais lenta e mais uniforme nas regiões de maior concentração para as de menor concentração. Com a difusão turbulenta, lufadas de ar poluído alternam com lufadas de ar limpo e a pluma dispersa-se e propaga-se duma maneira irregular e imprevisível.

Ainda que seja quase impossível prever a forma exacta da pluma num dado instante, pode prever-se a configuração média da pluma e a concentração média dos poluentes, resultantes das configurações instantâneas.

De facto, a «pluma média» espalha-se em forma cónica com vértice na fonte poluente, até atingir o solo, ou uma inversão de temperatura. Por outro lado, a concentração é máxima ao longo do axóide da pluma e decresce rapidamente em direcção à periferia do «cone» limitante. Em terceiro lugar, a abertura angular do cone é maior, quando os ventos são mais fracos, ou a atmosfera é mais instável. E, por fim, quanto mais fracos são os ventos, maior é a concentração dos poluentes.

Logo que a pluma atinge o solo, ou uma inversão de temperatura, os poluentes não se podem dispersar livremente e acumulam-se. Se se juntarem os efeitos de várias plumas numa dada região a atmosfera fica, em geral, fortemente poluída.

Porque é que convém que as chaminés sejam o mais alto possível? Em primeiro lugar, quando a pluma atinge o solo já se observou alguma difusão e dispersão e os níveis de concentração dos poluentes à superfície são mais baixos do que seriam se a chaminé fosse mais baixa, ou se não existisse. Depois, se se formar uma inversão de temperatura numa camada da atmosfera abaixo da altura efectiva da chaminé, a emissão verifica-se no ar instável, dispersando-se acima da camada de inversão da temperatura e a pluma não atinge o solo.

Há algumas fontes (cimenteiras, por exemplo) que emitem partículas suficientemente grandes (alguns micrómetros de diâmetro) que caem, pura e simplesmente, por acção da gravidade, como se fossem pequenos projecteis. Neste caso, não se forma nada que se pareça com uma pluma cónica.

Somos, agora, levados à terceira e última fase do ciclo da poluição, isto é, à fase em que os poluentes abandonam a atmosfera.



### c) A terceira fase do ciclo: deposição

Quais são as situações meteorológicas em que se produzem os níveis mais elevados de poluição? São, como sabemos, aquelas em que os ventos são fracos, ou calmos, e em que a atmosfera seja estável. Estas condições são exactamente as que se verificam nos grandes anticiclones, que permanecem estagnantes durante alguns dias, principalmente nos fins do Outono, começos do Inverno em que o sol está baixo. Os dias são pequenos e o solo pode arrefecer muito durante a noite. Nestas condições formam-se inversões de temperatura de radiação na camada junto ao solo, que, por sua vez, são reforçadas pela subsidência do ar no anticiclone. A combinação de ventos fracos com a inversão de temperatura não promove a diluição dos poluentes, porque não há turbulência e os movimentos verticais são contrariados. Nestas circunstâncias, com o ar estagnante, vai verificar-se uma forte acumulação de poluentes.

Os maiores episódios da poluição ocorrem entre Outubro e Janeiro (Londres, 1952; N. York, «Thanksgiving» *smog*, 1966) e observam-se com centros de anticiclones quase estacionários, com fortes inversões de temperatura, de subsidência (ar mais frio junto ao solo com ar mais quente acima da camada de inversão).

Note-se que as massas de ar polar marítimo e de ar ártico são as massas de ar mais «limpo».

Mas voltemos à terceira fase. Como é que se limpa o ar? Os mecanismos mais eficazes são o da formação das nuvens e o da precipitação. Com a nucleação heterogénea faz-se uma «limpeza» da atmosfera que depois é completada pela precipitação de chuva ou de neve. Por sua vez, estas, no seu caminho, continuam a arrastar, a adsorver e a incorporar muitos poluentes, que assim varrem a atmosfera e atingem o solo. No entanto, os poluentes de menores dimensões voam em torno das gotas de água, escapam-se e não são capturados, porque as correntes aerodinâmicas criadas nas vizinhanças das gotas, ou dos cristais de gelo, em movimento, afastam as partículas.

Já viu o que sucede quando quer apanhar uma mosca que passeia sobre uma mesa com um jornal dobrado, ou com uma régua? As correntes aerodinâmicas que se formam entre a régua

e a mesa ajudam a mosca a «escapular-se». Mas se o «apanha moscas» tiver uns furos, já não há mosca que escape!

Como sabemos, a pressão de um gás resulta da variação da quantidade de movimento das moléculas individuais. Nós temos dimensões muito grandes para sentir os impactes individuais das moléculas do ar. Mas, já não se passa o mesmo com as partículas dos aerossóis, que podem ser arrastados de um lado para o outro pelos choques individuais das moléculas. As observações das partículas dos aerossóis com diâmetros inferiores a  $0,1\ \mu\text{m}$ , ao microscópio, revelam que estas estão animadas, constantemente, de movimentos em zig-zag, de pequeníssimo percurso médio. É este movimento incessante, dum lado para o outro, que caracteriza o movimento browniano. Este é devido à colisão de cada partícula com as moléculas individuais de ar vizinho. Como se sabe, o movimento browniano tem constituído um dos grandes argumentos em favor da teoria cinética dos gases. A teoria do movimento browniano foi exposta, pela primeira vez, por Einstein.

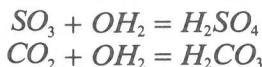
Mas como é que o movimento browniano pode contribuir para «limpar» o ar? Ora, a explicação é simples. Como as moléculas de ar podem «empurrar» as partículas, acontece que muitas destas vão colidir com as gotículas, ou com os cristalículos de gelo das nuvens e outros com gotas de precipitação, ou com cristais de neve, apesar da tendência de escape devido a correntes aerodinâmicas geradas. Além disso, o movimento browniano pode levar à colisão de várias partículas que se juntam ou coalescem, como acontece quando as partículas têm dimensões muito pequenas ( $0,02\ \mu\text{m}$ ).

Vejamos, agora, a fase final do processo de remoção dos poluentes da atmosfera. Pode dizer-se que mais de 80% são removidos pela precipitação. A fracção restante tende a cair lentamente, devido à resistência do ar que, como se sabe, é proporcional ao diâmetro das partículas e depende da viscosidade do ar (Lei de Stokes) A deposição é mais fácil, se o ar se mantiver calmo, durante longos períodos. As partículas mais pequenas penetram na estratosfera onde se podem manter durante anos, se, entretanto, não se der a sua coagulação.

Vemos, agora, porque é que as massas de ar ártico e polar são tão transparentes e tão «puras». Além do mecanismo natural de limpeza, que é a precipitação, o ar fica estagnado durante

vários dias e o contacto com superfícies frias (neves, gelos, etc.) leva ao arrefecimento e à queda de uma parte dos poluentes. Quanto mais tempo permanecem em contacto com a superfície arrefecida, mais fria se torna a massa de ar e mais limpa fica.

Se a remoção da matéria particulada já está explicada, que dizer, agora, da remoção dos poluentes gasosos (dióxido de enxofre, dióxido e monóxido de carbono, etc.)? Ora, a remoção dos poluentes gasosos só se faz, quando estes aderem a partículas sólidas ou líquidas. Um gás, que seja solúvel na água, é removido imediatamente pela precipitação. O trióxido de enxofre ( $SO_3$ ) e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ambos se dissolvem e combinam com a água, para dar ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e ácido carbónico ( $H_2CO_3$ )



Em consequência deste tipo de poluição, a precipitação, que se forma em regiões industriais, pode ser fortemente ácida. Esta é prejudicial, não só por atacar a vegetação e os animais, como, ainda, por atacar as construções (principalmente pelo  $SO_4H_2$ , se os materiais forem calcário). Por outro lado, esta precipitação dissolve o alumínio dos caulinos e doutras rochas que, por fim, são transportadas para os rios, para os lagos e para os oceanos. O resultado final é dizimar a fauna piscícola.

O dióxido de carbono é removido da atmosfera por vários processos. Um deles é a fotossíntese, através da qual as plantas consomem dióxido de carbono e libertam oxigénio ( $O_2$ ). O dióxido de carbono também se dissolve nos oceanos, onde é utilizado para formar o carbonato de cálcio das conchas da fauna marinha.

O monóxido de carbono ( $CO$ ) também é altamente solúvel na água e, por isso, facilmente removível da atmosfera. Infelizmente, para nós, o monóxido de carbono também é absorvido pelo sangue, combinando-se com a hemoglobina e impedindo assim a oxigenação indispensável pela circulação sanguínea.

## 5 — PREVISÃO METEOROLÓGICA LOCAL DA POLUIÇÃO

Os ventos fracos, persistentes, e as inversões de temperatura ocorrem simultaneamente, quando um anticiclone fica estagnante, ou quando se move muito lentamente sobre uma dada região. Os ventos são fracos na zona central e a divergência horizontal do centro de altas pressões produz a subsidência, isto é, o afundamento vertical do ar e, portanto, uma compressão adiabática, com um aquecimento em altitude. À superfície, a temperatura mantém-se constante, ou arrefece devido à forte radiação nocturna, principalmente em noites de céu limpo. Este arrefecimento na camada inferior da atmosfera, associado ao forte aquecimento em altitude, origina uma inversão de temperatura, característica dos anticiclones. A subsidência é mais importante nos bordos leste dos grandes anticiclones semipermanentes, o que torna essas regiões predispostas e propícias para a manutenção de elevados valores da concentração da poluição. É por isso que as zonas com maior potencialidade para a poluição são as grandes cidades em que predomina este tipo de circulação, como Los Angeles, Casa Branca, cidade do Cabo, S. Tiago do Chile, entre outras.

A potencialidade de poluição numa cidade pode avaliar-se em função da sua área, da velocidade do vento e da espessura da camada em que os poluentes se misturam de forma completa. Para grandes cidades (Tóquio, Nova Iorque, etc.), a espessura da camada de mistura é da ordem de 300 m, enquanto que para uma cidade de menor população (à volta de 100 000 habitantes) é da ordem de 100 m. Na camada de mistura origina-se um tipo de microclima urbano que, como se sabe, é designado pelo efeito de «ilha quente urbana».

A concentração na camada de mistura é tanto maior quanto maior for a intensidade,  $Q$ , e a extensão das fontes poluentes supostas uniformes, menor for a velocidade do vento,  $V$ , e menor a espessura da camada de mistura,  $H$ . A uma distância,  $L$ , a concentração é, em primeira aproximação, dada por:

$$C = QL/VH$$

em que  $Q$  designa a taxa de emissão por unidade de área.

A fórmula, ainda que muito simplificada, põe a tónica nos factores essenciais para o cálculo da concentração da poluição, nomeadamente, as propriedades da fonte poluidora  $Q$  e  $L$  e os factores meteorológicos  $V$  e  $H$ .

Notaremos que  $H$  é determinado pela espessura da camada inferior da atmosfera em que devido à radiação solar se estabelece um gradiente adiabático de temperatura. Com noites claras, pode mesmo anular-se com a formação da inversão de radiação nocturna da temperatura. A espessura da camada varia, portanto, com a situação sinóptica e com o tipo de massa de ar que banha a região.

Os ventos nas cidades sofrem também uma variação diurna: são mais fracos, durante a noite e a manhã, e aumentam de intensidade para a tarde.

A equação que dá a concentração dum poluente mostra que esta é inversamente proporcional à velocidade do vento e à espessura da camada de mistura, cujo produto,  $VH$ , é o factor de ventilação.

Então, é possível prever as condições favoráveis à formação local de poluição, através da estimativa deste factor. É o que começaram a fazer alguns Serviços Meteorológicos em que o factor de ventilação passou a ser calculado em todas as estações aerológicas. Se o factor de ventilação se mantiver baixo, para períodos da ordem de vinte e quatro horas, há uma forte probabilidade de se estabelecerem condições que levam à formação de poluição.

As condições mais críticas para o desenvolvimento de poluição, em grandes regiões e para períodos de tempo suficientemente longos, estão associadas à existência de grandes anticiclones quase-estacionários. Nestas condições, os ventos são fracos (ou mesmo calmos) e forma-se uma forte inversão de temperatura, devida à subsidência, na camada inferior da atmosfera, que pode originar uma camada de mistura de ar estagnante, apenas com algumas centenas de metros.

A inversão de temperatura limita a difusão vertical dos poluentes. Se, além disso, se juntarem condições adequadas da topografia, a concentração dos poluentes vai aumentando, atingindo valores que excedem o limiar de segurança. Foi o que se

passou em 1940, no vale da cidade industrial de Donora, Pensilvânia, em que a mortalidade aumentou consideravelmente.

A formação do «smog» de Los Angeles, além de aspectos de fotoquímica, é devida não só à configuração particular da topografia circundante da cidade, que a envolve como se formasse uma grande muralha natural, como à existência e persistência do grande anticiclone permanente do Pacífico Norte, que influencia as condições meteorológicas nos meses de Verão.

Até agora, não nos referimos à influência da direcção do vento na poluição. Aquela só é importante quando a poluição é causada por fontes isoladas. A direcção do vento tem efeitos diferentes nos mesmos locais, dependendo da situação das fontes poluentes emissoras.

A previsão local das condições, que levam à possibilidade de formação de poluição, requer, portanto, o conhecimento completo da fisiografia do local, da distribuição e características das fontes poluentes fixas e da densidade das fontes móveis tais como veículos, etc.

## **6. O CARÁCTER GLOBAL DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA. A POLUIÇÃO TRANSFRONTEIRA.**

A maior actividade científica no domínio da meteorologia da poluição tem sido orientada no sentido de obter uma compreensão mais profunda dos mecanismos que conduzem à diluição e ao transporte dos contaminantes na atmosfera, em escalas espaço-temporais relativamente reduzidas. Esta actividade assentava na premência que, por vezes, assumem o problema da poluição com carácter local. Foi destes aspectos que tratámos anteriormente. Praticamente, a poluição é introduzida na atmosfera através da camada limite sendo, na fase inicial, dispersa e distribuída por turbulência e por convecção. Depois espalha-se por toda a atmosfera penetrando até aos níveis da estratosfera e passa a ser transportada pela circulação geral da atmosfera. A poluição assume, de facto, um carácter global, planetário, e não se confina às escalas local e regional. As camadas superiores da atmosfera não são indiferentes à poluição: de facto, a estratosfera é, provavelmente, mais sensível à poluição do

que a troposfera, por causa das trocas radiativas e dos processos fotoquímicos que predominam na primeira. A poluição da atmosfera tem que ser, portanto, encarada como um fenómeno global. Estudos recentes demonstram a existência de tempos de residência bastante longos, para certos gases e partículas, na troposfera e na estratosfera. Estes estudos levaram, naturalmente, a considerar os efeitos que a distribuição e a acumulação desses contaminantes podem ter nos campos da temperatura e da precipitação em escala planetária.

Na estratosfera, em que os tempos de residência são muito maiores, mantém-se um balanço crítico, extremamente delicado, entre os vários processos do balanço radiativo, que determinam e regulam as variações do campo da temperatura. Os resultados obtidos a partir do estudo da influência das partículas de natureza vulcânica injectadas na estratosfera mostram que a introdução de grandes quantidades de substâncias contaminantes (gases e partículas) pode ter consequências importantes para a estrutura do campo da temperatura, podendo mesmo alterar o estado de equilíbrio químico que mantém as concentrações do ozono e do vapor de água na estratosfera.

Está provado que se verifica um transporte de poluentes, em larga escala na atmosfera, de região para região e de continente para continente, o que confirma, assim, a necessidade de encarar o carácter global da poluição. Levantou-se o problema da poluição transfronteira, com todas as implicações internacionais que arrasta. Se notarmos que, nalgumas partes do mundo, a revolução industrial ainda mal se iniciou, a falta de medidas e de disposições efectivas, em escala mundial, poderá conduzir, num futuro mais ou menos remoto, a um estado de quase saturação da atmosfera pela poluição. Torna-se, portanto, essencial, que se conheçam os mecanismos que conduzem os poluentes mais importantes até aos níveis elevados, que se analise o seu transporte associado à circulação geral planetária e que se estudem os efeitos que a existência de poluentes tem na própria constituição e estrutura da atmosfera. Estes podem originar alterações na atmosfera que podem provocar modificações dos climas de forma inadvertida. Torna-se indispensável, para fazer o estudo da distribuição e do transporte dos poluentes em escala global, o recurso à meteorologia sinóptica e à meteorologia glo-



bal das circulações planetárias da atmosfera. Só o conhecimento de uma situação sinóptica e da sua inserção na macroescala da circulação planetária é que tornam possível prever a sua evolução e avaliar os campos de distribuição e de transporte da poluição na atmosfera.

No domínio da macroescala, uma cidade ou uma região industrializada podem ser consideradas, como indicámos anteriormente, fontes de poluição pontuais. É o que a observação de satélites artificiais veio confirmar. Os satélites têm permitido seguir o movimento da nuvem de poluentes gerada nas regiões industrializadas dos Estados Unidos, principalmente quando as condições sinóptico-meteorológicas são favoráveis, como acontece quando a região leste e o Atlântico Norte estão sob a influência de um anticiclone quente e persistente.

O recurso a indicadores (ou traçadores) como um dos processos de estudar a circulação geral da atmosfera tem sido utilizado em vários estudos. O transporte de materiais de origem vulcânica, depois de explosões activas, tem sido objecto de investigações notáveis, designadamente no desenvolvimento de técnicas para a reconstituição de trajectórias. O problema de inferir, a partir das concentrações observadas e das características da circulação geral, a localização das fontes através da reconstituição das trajectórias, assume uma enorme importância na repartição de responsabilidades à escala global, que só agora começa a ser explorada. Assim, sabe-se hoje que o aumento da concentração em partículas sulfurosas originadas em Inglaterra e na região do Rur tem afectado as florestas da Suécia. A concentração anómala de óxido de carbono sobre a Gronelândia só se pode explicar devido ao transporte do poluente pelas circulações da circulação geral da atmosfera. A concentração relativamente elevada em elementos pesados (chumbo, mercúrio, etc.) no mar do Norte é devida, essencialmente, ao transporte desses elementos sob a forma de carbonetos, pelas circulações atmosféricas das regiões altamente industrializadas da Europa e não, como se supunha, ao escoamento hidrológico dos rios que ali desaguam.

As substâncias poluentes movem-se na atmosfera, em torno do globo, com o sistema de ventos da circulação geral ajustando-se ao movimento das grandes perturbações e dos



grandes centros de acção da circulação geral (depressões, anticlones, etc.).

O vento médio transporta as substâncias rapidamente em torno do globo; um vento médio zonal de 30 m/s. dá, para tempo de trânsito ao longo de um paralelo de 30°, cerca de 15 dias. Por vezes, nuvens de material radioactivo, ou de materiais originários de erupções vulcânicas, podem identificar-se durante vários circuitos em torno do globo.

Verifica-se assim, através destes exemplos, que o transporte de poluição na escala sinóptica é controlado pelos campos tridimensionais dos ventos na escala da circulação geral da atmosfera. Por isso, todo o progresso real no domínio da análise e previsão dos fenómenos de poluição está inevitavelmente associado à dinâmica da atmosfera, nomeadamente à sua circulação geral planetária e aos mecanismos que envolvem o ciclo de que ressaltam as fases: geração, transporte, transformação e precipitação.

As circulações meridionais celulares originam um transporte vertical (directo) que pode levar à penetração de massas de ar na estratosfera e à ruptura da tropopausa, principalmente quando ocorrem fenómenos de convecção penetrativa intensa. O transporte em sentido contrário, da estratosfera para a troposfera, verifica-se principalmente junto das regiões de ruptura da tropopausa, nas vizinhanças das correntes de jacto.

A existência de nuvens, de precipitação e de trovoadas mostram que na troposfera os movimentos verticais, ainda que muito inferiores aos movimentos horizontais, têm consequências decisivas no estado do tempo e na climatologia. Em geral, são da ordem de  $10^{-1}$  cm/s. na troposfera, podendo atingir em situações de trovoadas e no interior de nuvens cumuliformes valores da ordem de 10 m/s. a 20 m/s. Pelo contrário, na estratosfera os movimentos verticais são muito menos intensos do que na troposfera e, em geral, valores inferiores a  $10^{-1}$  cm/s. Por isso, a dispersão vertical duma substância poluente na estratosfera é muito lenta. Um poluente que entra na estratosfera pode manter-se ali durante vários anos. Já na troposfera a situação é diferente. Em geral, na troposfera as partículas têm um tempo de residência de duas a quatro semanas, antes de serem arrastadas pela precipitação; os gases têm tempos de residência muito variáveis, dependendo dos mecanismos que os removem da at-

atmosfera, tais como a incorporação em gotículas das nuvens, reacções com outros gases, asorção por partículas sólidas, etc. Os tempos de residência dos gases são, mesmo assim, de dois a quatro meses.

Havemos de ver, em capítulos ulteriores, a importância que tem para a precipitação ácida, por exemplo, a análise da problemática da poluição em escala global.

## 7 — A POLUIÇÃO E O CLIMA

Supomos que é importante que se vejam algumas implicações da poluição para as variações do clima. Recorremos para isso a um texto que apresentámos em 1974 e que quase se transcreve na íntegra:

«A Terra constitui um sistema físico fechado, formado por dois subsistemas disjuntos, abertos através da interface comum, que são o globo e a atmosfera. Não é um sistema isolado, porque recebe e fornece energia através da superfície limite da atmosfera. A energia que recebe é principalmente a radiação solar (radiação de pequeno comprimento de onda e de baixa entropia), e a que emite é a radiação terrestre na banda do infravermelho de entropia mais elevada.

Nesta concepção, a Terra é, de facto, um «navio do espaço», com recursos limitados, uns renováveis, outros não, e cuja gestão se faz por processos naturais ou por acção do homem. Surge assim, através do impacte que as actividades humanas têm sobre o ambiente global, a inevitabilidade da interferência do homem na atmosfera, onde pode provocar alterações na sua composição e estrutura e na dinâmica das suas circulações. Estas alterações, que podem ser deliberadas ou inadvertidas, são, no entanto, muito pequenas, comparadas com as que são provocadas pelos processos naturais. Tem-se especulado muito sobre os efeitos globais da poluição, designadamente no que se refere ao aumento da concentração de anidrido carbónico, devido à combustão de combustíveis fósseis. Poderia originar-se o aquecimento da atmosfera e causar degelo parcial das calotas polares e dos glaciares, com o aumento do nível dos oceanos e a submersão das regiões costeiras.

Com a nova distribuição da temperatura, iam alterar-se as condições actuais, que determinariam outro regime da circulação geral da atmosfera, podendo portanto intervir na dinâmica dos fluidos planetários. Além disso, a activação da circulação geral associada ao aumento de temperatura podia, por outro lado, acelerar o ciclo hidrológico e alterar profundamente o regime da distribuição da precipitação e da aridez. Do mesmo modo, tem-se levantado a questão da possibilidade dos aerossóis lançados na atmosfera, devido aos processos industriais, de energia e dos transportes, impedirem parte da radiação solar de atingir a superfície do globo, originando um abaixamento global da temperatura. Este podia levar a outra era de glaciação, com efeitos opostos aos anteriores, no que se refere à circulação geral e ao ciclo hidrológico.

Em síntese, estamos em face da possibilidade de alterar as condições meteorológicas médias que definem o clima.

Sabemos que o clima tem sofrido flutuações, com períodos que vão de algumas décadas até milénios. Durante o século passado e até 1940, verificou-se um ligeiro aquecimento da ordem de  $0,4^{\circ}\text{C}$ , para agora apresentar uma recessão de alguns décimos (Starr e Oort, 1973).

A atmosfera constitui um sistema termodinâmico relativamente estável. De facto, a radiação solar, que é absorvida pelo globo e que vai aquecer a atmosfera, é praticamente igual à radiação infravermelha que é emitida por esta e que provoca um arrefecimento. Na atmosfera existe um estado de equilíbrio, de estabilidade quase crítica, que resulta de mecanismos muito complexos de realimentação e de interacção entre os oceanos e a atmosfera, a evaporação e a precipitação, a absorção e a reflexão provocada pelas nuvens, etc. E assim se explica que as flutuações da temperatura sejam relativamente pouco acentuadas; uma redução da energia disponível da ordem de 2% podia, em teoria, produzir um abaixamento global da temperatura de dois graus, com flutuações da ordem de grandeza muito mais elevada.

A natureza crítica do equilíbrio radiativo da atmosfera e as consequências que resultam de o alterar levam-nos a reflectir sobre a possibilidade real do impacte que o homem pode ter sobre o estado da atmosfera e, portanto, sobre a dinâmica do clima.

Em face dos valores enormes da energia e da quantidade de massa postos em jogo nos processos atmosféricos naturais, a interferência do homem só se pode fazer por via indirecta. E esta, faz-se através da acção sobre mecanismos específicos que comandam e regulam os processos meteorológicos e que, simultaneamente, desencadeiam a ruptura do equilíbrio radiativo crítico.

No estado actual, parece que os mecanismos mais acessíveis se resumem, fundamentalmente, aos que actuam sobre o controlo do balanço da radiação da atmosfera e que poderão provocar, devido à actividade do homem, pelas suas consequências, alterações no clima em escala local, regional ou global. E podemos destacar, entre outros, o aumento do dióxido de carbono ( $CO_2$ ) devido à utilização dos combustíveis; o aumento de núcleos de condensação do vapor de água na atmosfera, alterando o regime de precipitação; a introdução de poeiras e de outras partículas, sólidas ou líquidas, que alteram a absorção e a dispersão da radiação solar; a inseminação da alta atmosfera por aerossóis de substâncias químicas estranhas lançadas por aviões de jacto, foguetes, etc.

O balanço energético da atmosfera pode ainda ser alterado pelas modificações da morfologia e da fisiografia da superfície do globo e pelas práticas agrícolas, principalmente através da deflorestação. Todas conduzem a alterações profundas no valor do albedo da superfície do globo e no poder evaporante do solo, interferindo no ciclo hidrológico. A introdução directa de calor na atmosfera, pelas actividades industriais e outras, pode modificar o balanço energético em escala local ou regional, originando, através do «efeito de ilha», verdadeiros microclimas urbanos.

A ideia de que o principal factor nas flutuações do clima é a variação da radiação solar incidente foi lançada por Milankovich ao procurar explicar as glaciações do Pleistoceno. As flutuações da energia externa à Terra provenientes do Sol (radiação solar) são influenciadas não só pela geometria do sistema Terra-Sol, mas também pelas variações da própria energia emitida pelo Sol.

Ora, a radiação solar apresenta flutuações no que se refere à sua composição espectral, mas não há razões para admitir que a sua intensidade total varie, pelo menos tomando em linha de

conta as medições efectuadas no espaço exterior, fora da atmosfera da Terra. Neste contexto, também não se toma em consideração a influência que têm no clima alguns factores terrestres intrínsecos associados à orogenia, à deriva dos continentes e à migração dos pólos.

No entanto, outras influências terrestres, menos poderosas, parecem ter sido decisivas na alteração do clima. Estas incluem as erupções vulcânicas, que lançam na atmosfera quantidades enormes de partículas, de anidrido carbónico e de anidrido sulfuroso.

O homem interfere inexoravelmente no estado termodinâmico da atmosfera. As alterações do clima provocadas pela sua interferência podem ser ou não previstas, deliberadas ou inadvertidas, transientes ou permanentes, e de dimensões que vão desde a microescala (microclima de uma planta) até à macroescala da circulação planetária. No entanto, temos de admitir que a capacidade de produzir deliberadamente alterações comandadas e controladas é ainda limitada e mesmo duvidosa. Mas, as modificações feitas inadvertidamente prosseguem de forma contínua e permanente, ainda que pouco se saiba sobre as suas consequências.

Estas incertezas manter-se-ão enquanto não for possível distinguir entre modificações naturais e modificações provocadas na atmosfera. O facto de, até agora, não ter sido mesmo possível esclarecer a relação causa-efeito das variações do clima, devido a factores naturais, tem dificultado a análise das possíveis modificações do clima provocadas pela actividade humana. Parece que se pode aceitar que as modificações inadvertidas provocadas pelo homem representam variações comparáveis ao nível de ruído da variabilidade natural da atmosfera e que, por enquanto, estão dentro dos limites da incerteza inerentes à avaliação quantitativa das flutuações naturais.»

É de alguns destes aspectos que vamos tratar nos capítulos seguintes.

**III — MODIFICAÇÕES  
DELIBERADAS  
DO AMBIENTE E DO CLIMA.  
O PROBLEMA DA PRECIPITAÇÃO  
PROVOCADA**

## 1 — AS MODIFICAÇÕES INTENCIONAIS DO CLIMA E DO AMBIENTE: ASPECTOS GERAIS

Desde os tempos mais remotos que a modificação intencional do estado do tempo e das condições do ambiente tem vindo a atrair o interesse do homem. No entanto, só muito recentemente, é que a modificação deliberada do clima e do ambiente tem sido proposta e tentada com bases científicas.

As modificações das condições meteorológicas e do clima e com elas as do ambiente têm sido propostas em todas as escalas desde a alteração da circulação geral da atmosfera, passando pelo controlo das nuvens, até à estabilização da temperatura em explorações agrícolas. Tem havido numerosas propostas para provocar grandes alterações do clima, tomadas em macroescalas grandiosas. E, assim, surgiram projectos para a alteração das circulações gerais da atmosfera e dos oceanos. Todavia, as tentativas mais significativas têm-se confinado, quase só, aos fenómenos de pequena escala.

As propostas para a modificação geral da atmosfera assentam na modificação do balanço energético da Terra, através da introdução de nuvens de fumos e de cristais de gelo na atmosfera, em certas latitudes e altitudes, ou, ainda, cobrindo os grandes campos de gelos e de neves com pó de carvão e de outros materiais escuros absorventes, a fim de reduzir o albedo; ou, ainda, pela eliminação dos gelos do oceano Ártico. Há duas concepções, aceitando ambas que, uma vez dissipados os gelos, o Ártico permanecia definitivamente livre de gelos. Um esquema recorreria à diminuição do albedo pela cobertura dos gelos por materiais escuros absorventes, como indicámos, e deixando ao Sol a tarefa de realizar o degelo. O outro esquema assentaria na construção de um grande dique ao longo do estreito de Behring e bombeando, depois, a água mais quente do Atlântico.

Com a fusão dos gelos do Ártico, o gradiente meridional de temperatura, entre o equador e o pólo, seria muito veloz e causaria o deslocamento do anticiclone subtropical, afectando o clima em várias regiões, visto que se alteraria a distribuição da temperatura e da precipitação em várias regiões do globo.

Outros grandes esquemas de «cirurgia plástica» do globo encarariam a criação de um lago artificial, na depressão de Katarra, na África do Norte, dum mar central na região do Congo, aproveitando as águas do Zaire, etc.

Em face da incerteza e das consequências da realização destes projectos e dos gigantescos empreendimentos em energia, materiais e capital, os programas de larga escala têm-se mantido ao nível da especulação. O fenómeno meteorológico de maiores dimensões, que se tem tentado modificar, é o ciclone tropical. No outro extremo da escala, devemos referir as tentativas de controlo do microclima das plantas, prática, há muito, utilizada na agricultura. Nas regiões ventosas as culturas, principalmente as hortícolas e as árvores de fruto, são protegidas da acção mecânica desfavorável dos ventos e da excessiva evapotranspiração usando sebes de abrigo e de protecção. A extensão da profundidade protegida é proporcional à altura da sebe e à velocidade do vento.

A sensibilidade das plantas à geada depende da espécie e da variedade. As geadas constituem um dos maiores riscos da agricultura, principalmente as que ocorrem no meio da Primavera e no início do Outono. Ocorrem, em geral, durante a noite, com céu limpo e ventos fracos. Devido à forte radiação nocturna, emitida pela superfície, geram-se inversões de temperatura na baixa atmosfera. Estas são muito pronunciadas, devido ao forte arrefecimento do solo e da camada de ar vizinha do solo. Como o ar é muito estável, o arrefecimento acentua-se cada vez mais. A drenagem de ar frio de encostas vizinhas pode, ainda, reforçar o arrefecimento e provocar o aparecimento de grandes «lagos» de ar frígido nos vales limítrofes. Basta que a temperatura desça 1°C a 2°C, abaixo de 0°C, para se fazerem sentir os seus efeitos nas vinhas e nos pomares.

Há vários meios de defesa contra o efeito das geadas, que visam, essencialmente, evitar que a temperatura desça abaixo do nível de resistência das culturas. Os métodos de combate à geada



podem ser activos e passivos. Os primeiros têm em vista modificar as condições meteorológicas locais, com o fim de aumentar a temperatura do ar e de alterar a estabilidade da atmosfera, junto ao solo. Para isso usa-se a ventilação forçada, o aquecimento por meio de fogueiras ou de emissão de radiação infravermelha; ou, ainda, a rega por aspersão, que tira partido da libertação de calor latente de congelação ao depositar-se sobre os frutos ou sobre as folhas das plantas. O calor libertado aquece a região de contacto do gelo com a planta, onde fica ainda armazenado, porque o gelo é um bom isolador!

Os métodos passivos de combate à geada são muito menos dispendiosos e mais comuns entre nós. Consistem em modificar, de qualquer maneira, os microclimas da região a fim de diminuir o arrefecimento, evitando a formação de uma camada de ar frio e estável, ou desviando a corrente de escoamento do ar frio. Esses processos consistem em suprimir, na medida do possível, as coberturas do solo, mortas ou vivas, e em manter a conductibilidade do solo o mais elevada possível. Outros consistem, ainda, na protecção das plantas de pequeno porte, com materiais que intersectam a radiação terrestre e dominam localmente a radiação efectiva (cobertura com plástico, palha, folhas de plantas, etc.).

A «experiência é a madre de todas as cousas» dizia Duarte Pacheco Pereira, ao tratar da arte de navegar dos Portugueses no século XVI. E o mesmo poderemos nós constatar nas práticas ancestrais da nossa agricultura, tão abandonada, mas tão resistente e tão sábia!

Os nossos agricultores, com a experiência acumulada, «sabem» modificar o clima na camada junto ao solo, para melhorar as suas culturas e salvar as suas colheitas. Assim, os laranjais podem ser «salvos» de geadas ocasionais, utilizando ventoinhas para agitar o ar em noites «calmas e estreladas», porque aumentam a turbulência e desfazem a inversão da temperatura de radiação, junto ao solo. As roseiras podem ser «poupadas» no Inverno, na Beira Alta, mediante a construção de um tejadilho de «qualquer coisa», porque assim se limita e se circunscreve o arrefecimento, devido à emissão da radiação terrestre nocturna. Para se evitar que os feijoeiros, no Outono, se «queimem» durante a madrugada regam-se à noite «antes de deitar», porque as gotas

de água e a terra regada «atrasam» a geada! É o calor latente da transição de fase que está em jogo. Não vale a pena «ir sulfatar, ou enxofrar amanhã», se a Lua «está a chorar» à noite. A coroa lunar que, por vezes, se forma é devida à difracção da luz pelas gotículas das nuvens do tipo fractoestratos e estratocúmulos, que tendam a engrossar.

«Ano de nevão, ano de pão». O centeio e o trigo «enraízam» melhor e os fertilizantes (poluentes) capturados e arrastados da atmosfera pelo nevão depositam-se no solo e ajudam. «Os salgueiros chupam os pauis», é, apenas, uma maneira de dizer que há um grande consumo de água no solo por causa da evapotranspiração intensa que aquelas plantas provocam.

O que fazem as estufas, senão proteger as culturas das vicissitudes do clima? Ou, melhor ainda, senão criar o clima óptimo adequado às várias culturas?

## 2 — CONTROLO DAS NUVENS E MICROFÍSICA DAS NUVENS

O controlo das nuvens e da precipitação tem sido o domínio em que se tem desenvolvido mais esforços para a modificação do tempo. Se fosse possível provocar o aumento da precipitação por meios artificiais, a sua importância para várias regiões do globo, designadamente para as regiões áridas e semiáridas, seria extraordinária.

O controlo das nuvens e da precipitação recebeu uma grande atenção depois da descoberta por Vicente Shaefer, em 1946, de que a inseminação de uma nuvem por neve carbónica podia iniciar o processo da precipitação com a formação das três fases Teoria de Bergeron (1932). Mais tarde, Bernard Vonnegut descobriu que o iodeto de prata constituía, também, um agente de nucleação poderoso para aglutinar as gotículas duma nuvem e formar a precipitação. Parece-nos que é vantajoso que apresentemos alguns aspectos da física das nuvens e da precipitação para se compreender melhor o fundamento científico e técnico de algumas das acções intencionais tomadas para a modificação do tempo e do clima.

Desde as descobertas de Schaefer e de Vonnegut tem-se rea-

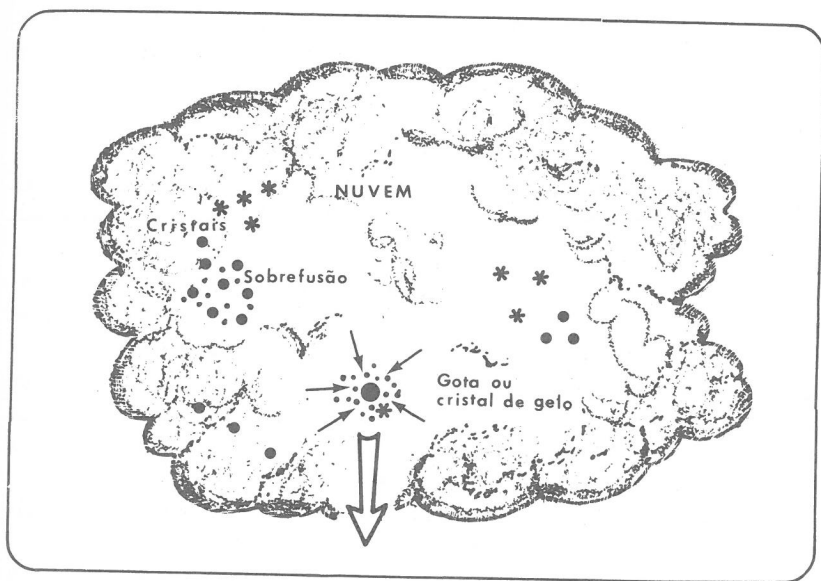


Fig. 10 — Numa nuvem, além do vapor de água, coexistem gotículas de água e cristais de gelo. O mecanismo do cristal de gelo é o mais comum na formação da precipitação. O mecanismo de coalescência é mais vulgar nas nuvens de convecção, em que a densidade das gotas é maior e as velocidades verticais mais intensas, o que faz aumentar a probabilidade de choque.

lizado numerosos ensaios de inseminação para dissipar nevoeiros, aumentar e redistribuir a precipitação, suprimir o granizo, reduzir as descargas eléctricas e as trovoadas, que causam tantos fogos, e diminuir a intensidade dos ventos que acompanham as borrascas e os ciclones. Além da utilização de núcleos gelados, para a iniciação do processo das três fases, em nuvens sobrefundidas, tem havido ensaios para tentar iniciar a precipitação em nuvens quentes (temperaturas superiores a  $0^{\circ}\text{C}$ ), utilizando partículas de cloreto de sódio, ou recorrendo à aspersão de água.

Pode influenciar-se a formação, a estrutura das nuvens, a sua ocorrência, a forma e a quantidade por duas vias:

1) — Alterando os processos sinópticos e dinâmicos que conduzem à formação das nuvens;

2) — Interferindo nos mecanismos microfísicos da formação e do crescimento das gotículas das nuvens que podem levar à precipitação.

Para alterar a dinâmica dos factores da atmosfera, que favorecem a formação das nuvens, são necessárias quantidades enormes de energia. Todavia, a modificação dos processos da microfísica das nuvens pode induzir alterações da dinâmica. Por seu turno, estas alterações conduzem a modificações dos processos internos que ocorrem na nuvem, acelerando os mecanismos que levam à precipitação. É uma reacção em cadeia, que se inicia com a inseminação. Esta é feita com aviões e com foguetões e através de grandes fogareiros, ou incineradores, que lançam na atmosfera fumos que transportam iodeto de prata, ou partículas de sal, e que vão penetrar nas nuvens existentes.

A física das nuvens estuda os processos e os mecanismos físicos que levam à formação das nuvens na atmosfera e ao desenvolvimento da precipitação. Devemos distinguir os aspectos da microfísica das nuvens que conduzem à formação das gotículas e dos cristais de gelo, que se relacionam com a sua estrutura e os que são devidos à situação sinóptica e à circulação geral. As condições necessárias à formação das nuvens são a disponibilidade em quantidade suficiente de vapor de água e a existência de movimento vertical adequado. Com o movimento ascensional, dá-se a expansão adiabática, que leva ao arrefecimento do ar e, portanto, à condensação do vapor de água e, finalmente, à formação de gotículas.

Há dois aspectos fundamentais da microfísica das nuvens que convém acentuar, desde já. O primeiro está relacionado com as transições de fase da substância água, tal como ocorrem na natureza e que levam à formação das nuvens. O segundo está relacionado com os mecanismos que conduzem à precipitação.

Como dissemos, a água ocorre na natureza nas fases sólida, líquida e gasosa. Uma nuvem é constituída por gotículas de água no estado líquido, ou por minúsculos cristais de gelo, suspensos em ar húmido saturado. Estas partículas nos estados líquido ou sólido mantêm-se em suspensão na atmosfera devido, em primeiro lugar, à resistência oferecida pelo ar na queda das partículas. Em segundo lugar, aos movimentos ascensionais da atmos-

fera. As transições de fase vapor-líquido, ou vapor-sólido, são particularmente importantes, ainda que se devam considerar também as transições em sentido oposto.

Em geral, na atmosfera, as transições de fase não se dão nas condições de equilíbrio termodinâmico convencional dos laboratórios. Ocorrem na presença e sob a influência de núcleos de condensação. Estes são constituídos por partículas estranhas sólidas, ou, por vezes, líquidas em suspensão na atmosfera, como partículas de cloreto de sódio, de feldspatos e por poeiras. As moléculas do vapor de água vizinhas do núcleo de condensação são aglutinadas pela superfície dos núcleos de condensação, constituindo sucessivas camadas envolventes sobrepostas, até atingirem as dimensões das gotículas ou dos cristais de gelo. Estes mecanismos de formação da fase condensada em volta de um núcleo estranho chama-se nucleação. A nucleação homogênea, que se observa sem a presença de núcleos estranhos, é muito mais difícil de ocorrer na atmosfera.

Os fenómenos a estudar na física das nuvens vão desde a nucleação das fases condensadas da substância água, ao crescimento das gotículas por difusão do vapor de água, até à dinâmica dos processos atmosféricos, que favorecem a formação de nuvens e levam ao desencadeamento da precipitação.

Uma nuvem é um sistema com duas ou três fases: vapor, líquida ou sólida. É um sistema binário, isto é, constituído por dois componentes, que são a água e o ar. Uma nuvem pode considerar-se como um sistema coloidal em que a fase dispersante é o ar húmido (mistura de ar seco e de vapor de água) e a fase dispersa é constituída pelas gotículas de água, ou por cristais de gelo. Da fase dispersa fazem ainda parte corpos estranhos, como poeiras e várias partículas, que estão sempre presentes na atmosfera. As gotículas e os cristais de gelo têm dimensões de algumas dezenas de micrómetros e estão animadas de movimentos incessantes, podendo, eventualmente colidir umas com as outras. Como a fase dispersante é constituída por ar húmido, uma nuvem constitui, de facto, um *aeridrosol* em estado de instabilidade dinâmica, mas, quase sempre, estável do ponto de vista químico.

A fase dispersa tem uma concentração baixa, com um número muito pequeno de gotículas, ou de cristais de gelo, por centímetro cúbico. Em geral, a distância média entre duas goti-

culas é muito grande comparada com as suas próprias dimensões. Os elementos da fase dispersa («micelas») estão animados de movimentos incessantes, do tipo browniano. A fase dispersa está sujeita à acção da gravidade e entre os seus elementos exercem-se forças de atracção e de repulsão.

O desaparecimento de uma nuvem corresponde, dentro desta concepção, à floculação ou à gelificação do colóide, constituído pelo aeridrosol.

### 3 — CONTROLO DA PRECIPITAÇÃO: A PRECIPITAÇÃO PROVOCADA

#### 3.1 — Mecanismos da precipitação

O processo da condensação, que leva à formação de gotículas em torno dos núcleos de condensação, conduz a concentrações da ordem de 100 a 500 gotículas por  $\text{cm}^3$ . A subdivisão da água disponível leva à formação de gotículas muito pequenas.

É, portanto, impossível que as gotas de precipitação se formem por este processo apenas. Se admitirmos que uma gotícula de uma nuvem tem um diâmetro da ordem de 20 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) e que uma gota de precipitação tem um diâmetro de 1 mm ( $10^3 \mu\text{m}$ ), então, seriam necessárias  $(1000/20)^3 = 125\ 000$  gotículas para formarem uma gota de precipitação. É evidente que não há nenhum mecanismo que possa explicar, de forma adequada, o encontro e a junção simultânea, devido ao acaso, dum número tão elevado de gotículas. Mas, mesmo que se juntassem, não seria fácil a sua coalescência numa gota só, devido a fenómenos de tensão superficial. Os mecanismos, que levam ao crescimento das gotas, têm que ser diferentes e não podem resultar da colisão mecânica das gotículas dispersas nas nuvens.

Aceita-se que há dois mecanismos básicos que podem levar à formação de precipitação. O primeiro destes é um processo puramente termodinâmico. É o mecanismo do cristal de gelo, muitas vezes designado por mecanismo das três fases de Bergeron-Findeisen. A precipitação dar-se-ia quando existirem

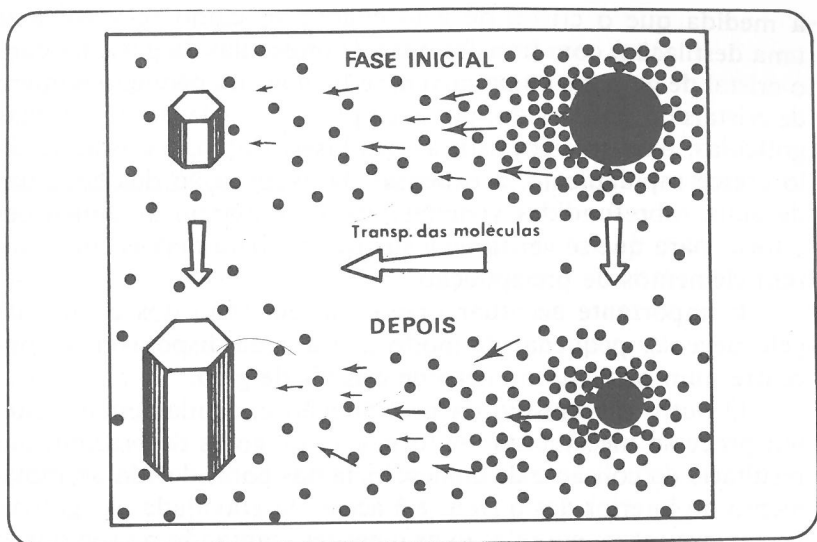


Fig. 11 — Mecanismo do cristal de gelo.

Os cristais de gelo crescem a expensas de gotas de água. A tensão de saturação nas vizinhanças dos cristais é inferior à tensão de saturação em relação às gotículas. Por isso, as moléculas acorrem para o cristal de gelo que cresce, enquanto a gotícula diminui, porque as moléculas se vão evaporando à medida que as outras se deslocam.

na nuvem as três fases simultaneamente. Nestas condições a tensão do vapor no estado de equilíbrio, em presença de água líquida sobrefundida (abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ ), é superior à tensão do vapor que se observa em presença do gelo, para a mesma temperatura. Logo, nas vizinhanças de um cristal de gelo e de uma gotícula de água, o ar se estiver saturado em relação à fase líquida, fica sobressaturado em relação à fase sólida. Logo, passa a haver para o cristal um número de moléculas superior ao máximo que é consentido pela tensão de saturação do vapor, e parte delas são capturadas pelo cristal de gelo que, assim, passa a aumentar de dimensões. Pelo contrário, a gotícula líquida passa a diminuir, devido à captura, porque o ar vizinho fica subsaturado a essa temperatura e passa a haver a possibilidade de moléculas de vapor de água se lhe escaparem por evaporação até se atingir novamente a saturação. Como resultado final, a gotícula definha-se,

à medida que o cristal de gelo engorgita, como se verificasse uma destilação, com transferência de moléculas da gotícula para o cristal de gelo. Se numa nuvem se formar um pequeno número de cristais de gelo devido, por exemplo, à congelação de algumas gotículas, passam a coexistir as três fases. Então, o cristal de gelo cresce rapidamente, a expensas da evaporação das gotículas de água sobrefundidas vizinhas, até se atingirem as dimensões críticas para que se verifique a sua queda, para depois constituírem elementos de precipitação.

É importante acentuar que a concentração dos cristais de gelo deve ser pequena, de modo que a água disponível se concentre num pequeno número de cristais de gelo.

O outro mecanismo da precipitação é, fundamentalmente, um processo mecanicista. A formação de gotas de precipitação resultaria da colisão e da coalescência das gotas devido ao movimento no interior das nuvens e à acção da gravidade. As gotículas maiores caem em relação às menores, captando na sua queda as que vão encontrando no seu caminho, colidindo com elas.

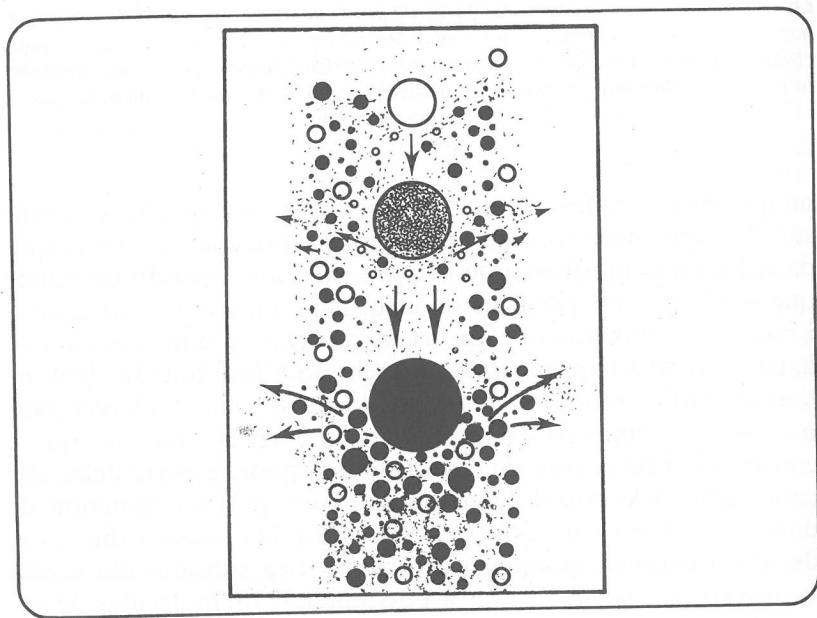


Fig. 12 — *Mecanismo de acareação.*  
*Crescimento das gotas de precipitação, por choque e coalescência.*



Com a coalescência as dimensões das gotas aumentam, assim como a sua área de ataque e a sua velocidade de queda. É um mecanismo do tipo avalanche, que se designa por processo de acareação.

O processo do cristal de gelo só se pode verificar numa nuvem sobrefundida, quando o número de cristais de gelo não for excessivamente elevado. Pelo contrário, o processo de acareação pode desenrolar-se com qualquer temperatura. No entanto, a eficiência deste mecanismo depende muito da presença de algumas gotículas, relativamente grandes, da espessura da nuvem, da elevada concentração de gotículas de água e de outros factores dinâmicos, que aceleram as colisões.

Hoje, aceita-se que na atmosfera actuam ambos os processos. É claro que a precipitação de nuvens, cuja temperatura é superior a  $0^{\circ}\text{C}$ , só pode resultar do processo de acareação. Observações feitas de avião mostram que a maior parte da precipitação é originada pelo mecanismo do cristal de gelo, sendo este, quase exclusivamente, o processo responsável pela precipitação nas regiões extratropicais.

Deve notar-se que o crescimento da gota pelo mecanismo do cristal de gelo é mais rápido na fase inicial, para depois diminuir, enquanto que o crescimento por acareação, característico da precipitação quente, começa de forma lenta, para depois se acelerar, dada a natureza de avalanche destes mecanismos.

A dimensão final atingida por um elemento de precipitação, depende das condições no interior da nuvem e da sua extensão. A velocidade vertical do ar aumenta o tempo durante o qual ocorre o crescimento.

Por isso, a condição mais favorável para o crescimento por acareação é a existência de um elemento com dimensões grandes na base da nuvem, onde, em geral, se observam maiores velocidades verticais. Ainda que as gotas maiores devessem cair, por acção da gravidade, podem ser arrastadas para cima pelas correntes verticais no interior da nuvem. Só caem, quando a velocidade de queda exceder o valor crítico determinado pela resistência do ar e pela velocidade vertical. A gota, à medida que cai, vai captando outras gotinhas, que encontra no seu trajecto no interior da nuvem, até emergir da base desta, sob a forma de precipitação e atingir, eventualmente, a superfície. Por acarea-

ção, só podem formar-se gotas grandes no interior de nuvens cumuliformes.

Na ausência de movimento vertical, não é muito provável que as partículas possam atingir as dimensões críticas de precipitação, quer por acareação, quer pelo mecanismo do cristal de gelo, se actuarem isoladamente. Os cristais de gelo típicos têm massas equivalentes às gotas de dimensões da ordem de alguns décimos de milímetro. Parece que, em tais casos, se produzirão elementos de precipitação maiores pela actuação simultânea de ambos os processos para formar aglomerações de cristais de neve sob a forma dendrítica, ou mesmo flocos. Estes, por vezes, têm massas que correspondem a gotas de água de 1 mm a 2 mm de diâmetro e são constituídos por vários cristais entrelaçados.

### 3.2 — Os processos naturais de precipitação

As nuvens convectivas são particularmente favoráveis ao mecanismo da acareação, porque têm uma extensão vertical grande, têm altas concentrações de gotas líquidas e as correntes verticais no seu interior são muito intensas. Sabe-se que em nuvens cumuliformes, com temperaturas superiores a 0°C, se pode verificar precipitação forte e, por vezes, muito intensa, principalmente nas regiões tropicais. E esta precipitação só pode ser devida à acareação. Observações de radar mostram que, em nuvens cumuliformes, muitas vezes a precipitação tem início em regiões abaixo do nível da isotérmica zero e a precipitação forma-se, inicialmente, por acareação.

A precipitação dos sistemas nebulosos de depressões frontais tem características completamente diferentes. Em geral, um sistema nebuloso tem uma estrutura em camadas, com nuvens baixas, médias e altas, ainda que algumas camadas apresentem descontinuidades (abertas). As nuvens altas (cirros, cirro-estratos, etc.) são formadas, quase exclusivamente, por cristais de gelo, enquanto que as nuvens médias (alto-estratos e alto-cúmulos) são constituídas por gotas de água sobrefundida e por cristais de gelo e, finalmente, as nuvens baixas são constituídas por gotas de água sobrefundidas ou não.

As velocidades verticais no sistema nebuloso frontal são da

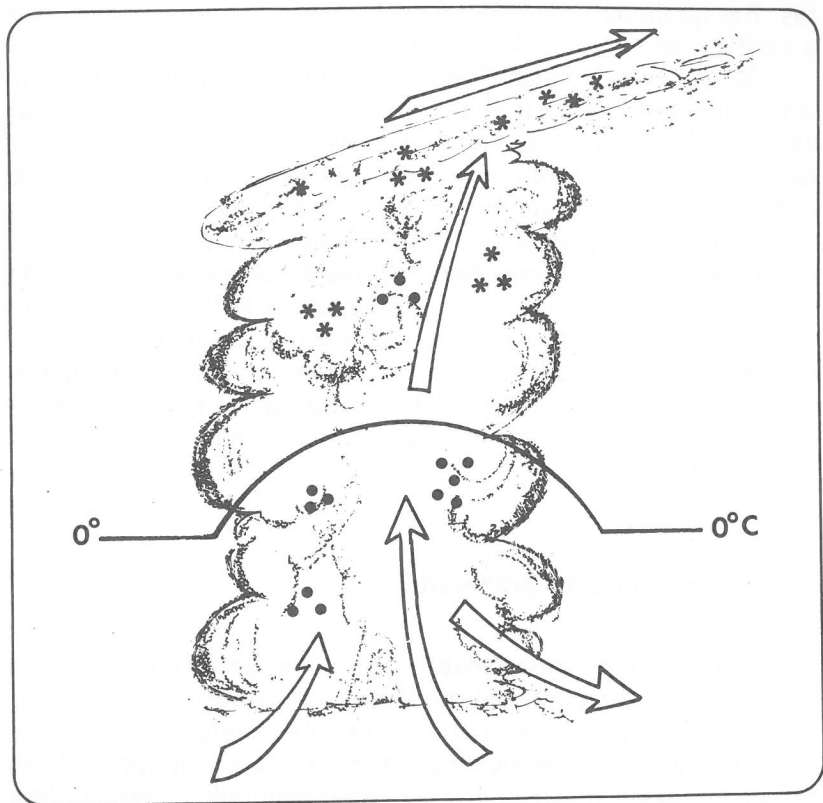


Fig. 13 — Condições meteorológicas que produzem com os cúmulo-nimbos granizo. Se o granizo tiver tempo para derreter, observam-se aguaceiros de chuva.

ordem de 0,5 cm/s. a 20 cm/s., enquanto que nos cúmulo-nimbos podem ser da ordem de 5 cm/s. a 20m/s. A observação mostra que no sistema nebuloso das latitudes médias e elevadas a precipitação é sempre iniciada pelo mecanismo do cristal de gelo. Nalguns casos os cristais de gelo caem das nuvens das camadas superiores e, ao encontrarem as nuvens das camadas inferiores, com gotas de água sobrefundida, crescem por sublimação, destilação e acreação. Noutros casos, os cristais de gelo podem formar-se, nas nuvens médias, pela congelação de algumas go-

tas. Em qualquer dos casos, o crescimento das gotas continuará a verificar-se em camadas inferiores das nuvens, se as houver.

Se as nuvens baixas forem constituídas por gotas de água sobrefundidas, pode dar-se o crescimento das gotas por sublimação e acareação. Se não forem sobrefundidas a neve que cai de camadas superiores funde-se constituindo gotas de água, que continuam a aumentar por destilação e acareação.

Os cristais de gelo crescem, ou dissipam-se por evaporação, conforme o valor da humidade relativa do ambiente, em relação à fase sólida. No entanto, a precipitação nas latitudes médias será, essencialmente, proveniente de neve que cai de camadas superiores e que, se poderá derreter ou não, conforme a temperatura do ar, e o percurso a percorrer até atingir o solo. Por exemplo, a neve que cai nas montanhas não teve «tempo nem oportunidade» de derreter.

### 3.3 — A precipitação provocada

Como já referimos, Shaefer, em 1946, abriu uma nova era no domínio da precipitação, ao demonstrar que era possível formar cristais de gelo, numa atmosfera sobrearrefecida, pela inseminação de neve carbónica e provocar a sua precipitação. Mais tarde, Vonnegut mostrou que o mesmo resultado se podia obter com uma inseminação da nuvem por cristais de iodeto de prata.

Como já referimos, a teoria da precipitação, que assenta no mecanismo do cristal de gelo, requer a presença de um número adequado de cristais de gelo numa nuvem sobrefundida. Nalguns casos, os cristais de gelo caem de nuvens de camadas mais elevadas. Noutros, resultam da congelação de gotas sobrefundidas, de acordo com as suas dimensões e da natureza dos núcleos de congelação, que contêm. A temperatura para a qual este processo de congelação é mais eficiente é da ordem de  $-15^{\circ}\text{C}$ . Sabe-se que, muitas vezes, os cristais de gelo não se formam em nuvens sobrefundidas, ou porque a temperatura não atinge os  $-15^{\circ}\text{C}$ , ou porque não há núcleos de congelação disponíveis para actuar a temperaturas mesmo ainda mais baixas. Ora, estes factos sugerem, imediatamente, o uso da neve carbónica ou de

iodeto de prata para formar cristais de gelo e dar, como se esperava, origem à precipitação.

A neve carbónica (dióxido de carbono sólido) origina a formação de cristais de gelo, primeiro, por condensação, e, depois, por congelação. A temperatura da neve carbónica é suficientemente baixa ( $-80^{\circ}\text{C}$ ), para causar a condensação e a congelação das gotas. O iodeto de prata actua de forma diferente. Actua como núcleo de congelação, e não se sabe muito bem se a água condensa primeiro em torno dos cristais de iodeto de prata, ou se estes penetram nas gotas, já existentes. Enquanto que a neve carbónica pode produzir cristais de gelo a qualquer temperatura abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , o iodeto de prata só é activo, quando a temperatura do ar for inferior a  $-5^{\circ}\text{C}$ .

A neve carbónica é inseminada na nuvem a partir de aviões, que voam acima, ou no interior da nuvem, sob a forma de pequenas plaquetas com 1 cm de diâmetro.

Estas, ao cáirem, deixam atrás de si um número enorme de cristais de gelo, que se difundem lateralmente no interior da nuvem. O iodeto de prata é lançado por evaporação de uma solução de iodeto de prata, e depois condensa na atmosfera em forma de cristais submicroscópicos. Outras vezes, o iodeto de prata é lançado na atmosfera a partir de incineradores colocados em locais escolhidos para que as correntes de convecção e turbulentas possam levar o «fumo com o iodeto de prata», até às nuvens sobrefundidas.

Vários ensaios têm mostrado que, nalgumas nuvens sobrefundidas, se formava precipitação artificial, quando aquelas eram inseminadas pela neve carbónica. Os ensaios com iodeto de prata não têm sido concludentes, mas sabe-se que provocam a formação de cristais de gelo e, por isso, é provável que, eventualmente, provoquem a formação de precipitação.

Na maioria dos casos as nuvens inseminadas dissipam-se, depois de se ter formado a precipitação, como mostram as observações de radar feitas em nuvens cumuliformes. Os resultados são muito mais difíceis de avaliar, quando se faz a inseminação dos grandes sistemas nebulosos com incineradores de iodeto de prata, colocados no solo. Não é possível, em geral, averiguar qual o destino do iodeto de prata e saber, mesmo, se atinge as nuvens.

Muitas vezes, recorre-se à avaliação indirecta dos efeitos da inseminação, através da medida da precipitação caída nas regiões inseminadas. Faz-se a análise estatística dos resultados, comparando-os com os de regiões de controlo, não inseminadas. Tomando como base as relações estabelecidas entre as quantidades de precipitação das duas regiões antes de se ter procedido à inseminação numa delas. No entanto, os ensaios estatísticos conhecidos não são suficientemente apropriados para aplicarem este tipo de análise. Não se pode, por isso, inferir se os resultados com a inseminação têm significância. No estado actual os ensaios estatísticos não têm sensibilidade para detectar aumentos na precipitação inferiores a 30%. Em muitos casos, não há evidência que permita concluir que haja mesmo qualquer aumento de precipitação. Deve acentuar-se que mesmo um aumento de precipitação de 5% a 10% assumiria um interesse económico considerável.

Tem-se posto um grande esforço para desenvolver ou descobrir novos ensaios estatísticos que permitam aceitar, ou rejeitar, em definitivo, a hipótese dos efeitos da inseminação.

Mesmo que toda a água contida numa nuvem precipitasse, a quantidade de água recolhida seria insignificante. Consideremos, por exemplo, uma nuvem de 2km de espessura e com um conteúdo de água líquida, já muitíssimo elevado, de um grama por metro cúbico. Um simples cálculo mostra que, se toda a água fosse precipitada, a precipitação produzida seria, quando muito, da ordem de 2mm. Este simples exemplo mostra, de maneira clara, que uma precipitação substancial só pode ser o resultado de um processo contínuo em que as gotículas das nuvens são reconstituídas a partir do vapor de água, à medida que se dá a precipitação. A matéria-prima da precipitação tem que ser, portanto, a água na fase vapor. As nuvens actuam como fábricas onde, com os seus dispositivos dinâmicos, se processa o vapor de água sob a forma de gotículas, ou de cristais de gelo que, assim, se estão, constantemente, a regenerar.

Note-se, portanto, que a inseminação das nuvens só pode ser efectiva, quando a situação sinóptica é favorável à reconstituição activa das nuvens, necessitando de um fornecimento adequado de vapor de água e a existência de movimento vertical conveniente. Estas condições são, essencialmente, as mesmas

que se devem observar nas condições naturais de precipitação. A inseminação é, portanto, apenas capaz de iniciar o mecanismo do cristal de gelo a temperaturas mais elevadas do que aquelas em que o processo natural teria lugar; o resto é com a natureza... Vê-se, por consequência, como é difícil avaliar os efeitos da inseminação, visto que na maioria dos casos, mesmo que se aceite que a desencadeia mais cedo, choveria na mesma!

Há situações nas quais o número de cristais de gelo naturais numa nuvem não é o que convém, quer devido à falta de núcleos de congelação, quer devido às temperaturas elevadas observadas nas nuvens. Ora, estas são as condições em que a inseminação artificial seria recomendável, mas nem sempre são fáceis de identificar. Noutras situações, em que há uma existência abundante de cristais de gelo, a inseminação não é recomendável. Nestes casos a precipitação pode mesmo reduzir-se, porque aumenta desmesuradamente o número dos cristais de gelo, ou porque dá início ao mecanismo da precipitação na parte inferior da nuvem, onde os cristais têm menos probabilidade de crescer, antes de atingirem o nível de congelação (isotérmica 0°C).

Se se proceder a inseminações indiscriminadamente, compreendendo muitas situações sinópticas seria provável que fossem incluídas ambas as situações favoráveis. Quando se calcula a precipitação média mensal ou sazonal, o aumento de precipitação, em situações favoráveis, vem tão diluído pelos casos não favoráveis, que esse aumento continua a ser praticamente indetectável. Tem que se encontrar meios de selecção das situações apropriadas para a inseminação, o que exige uma informação mais completa do que aquela de que agora se dispõe e um conhecimento mais profundo dos processos e mecanismos da precipitação.

### 3.4 — Análise dos resultados da precipitação provocada

Não é de admirar que tenha havido numerosos projectos de «precipitação artificial» em variadíssimas partes do mundo. Inicialmente, na época de euforia, os resultados obtidos foram tomados com grande optimismo, chegando a atribuir-se aumentos de precipitação da ordem dos 100%, principalmente por firmas



comerciais. À medida que o tempo foi passando, os resultados apregoados foram baixando e, hoje, pode dizer-se que os arautos da precipitação artificial clamam que os aumentos são da ordem de 10% a 20%.

A razão desta incerteza sobre o aumento da precipitação, por inseminação das nuvens, resulta, fundamentalmente, de não se saber a quantidade de precipitação que poderia ter caído, se não tivesse havido inseminação. Por isso, tem-se feito ensaios de controlo, comparando as quantidades de precipitação de duas áreas, que em condições normais têm regimes de precipitação análogos, quando uma delas se insemina e a outra não. Em face de algumas críticas severas, este método de comparação foi abandonado. Em vez de duas áreas, passaram a considerar-se dois grupos de áreas seleccionados, ao acaso. Um dos grupos era inseminado e o outro não. A diferença de precipitação num grupo e noutro era atribuída à inseminação, porque se admitia que todos os outros factores se compensariam devido à escolha, à sorte inicial das áreas, que se supunham em condições idênticas de tipo de nuvens, de nebulosidade e de susceptibilidade de precipitação. Os ensaios eram realizados de preferência, quando as nuvens eram cumuliformes e a atmosfera era instável, utilizando aviões para injectar iodeto de prata.

Os vários ensaios realizados com este método, não se pode dizer que sejam concludentes. Nuns casos há diferenças para mais e noutros não há, chegando, mesmo, as áreas inseminadas a terem precipitações inferiores.

Ora estes resultados, só à primeira vista, são surpreendentes. Nos casos em que a precipitação foi inferior, gerou-se uma superabundância de núcleos de condensação. Se, no estado inicial, o número fosse próximo do óptimo adequado, o excesso de núcleos resultante da inseminação conduziria à existência de uma superabundância de número de cristais de gelo mais pequenos e, portanto, menos eficientes. A sobreinseminação tem sido, até, preconizada para evitar a precipitação excessiva, que possa conduzir à formação de cheias.

Uma situação favorável à utilização da inseminação seria a de a iniciar a partir da base das nuvens cumuliformes, antes dos topos terem atingido a altitude máxima. Pode, assim, desencadear-se a precipitação de nuvens menos espessas do que



teria acontecido naturalmente, sem a inseminação. Este efeito é ainda mais relevante, quando a convecção está limitada por uma camada estável associada a uma inversão de temperatura. Nestas condições a libertação do calor latente, com a formação dos cristais de gelo, quando a nuvem é inseminada, pode ser o suficiente para reforçar a impulsão e permitir que a nuvem penetre na camada da inversão da temperatura. Quando tal acontece, o crescimento da nuvem é explosivo e sem a inseminação não poderia ter caído precipitação.

Somos, pois, levados a concluir que há certas condições meteorológicas em que a inseminação pode levar a um aumento da precipitação e outras em que se verifica uma diminuição. Muita da investigação actual está a ser conduzida no sentido de identificar estas situações de forma segura e bem definida.

A grande maioria dos ensaios tem assentado no mecanismo da coexistência das três fases, usando o iodeto de prata como agente artificial de condensação. Tem havido, no entanto, outros ensaios com nuvens quentes cumuliformes (v. g. na Austrália, nas Caraíbas), bombardeando-as de aviões com jactos de água líquida. Os resultados não são muito concludentes. Parece que a utilização de núcleos higroscópicos gigantes apresenta maiores potencialidades, como parece concluir-se de ensaios feitos no Paquistão e na Índia.

No caso específico das chamadas «nuvens quentes» (temperatura com topo superior a 0°C), de grande interesse nas regiões tropicais, tem-se utilizado a seguinte técnica. A inseminação consiste simplesmente na introdução de grandes gotas nas nuvens para iniciarem o mecanismo de avalanche com a colisão e coalescência das gotículas das nuvens. Outras vezes, tem-se utilizado partículas de sal, soluções salinas, etc. Este processo só terá alguma viabilidade se a nuvem não tiver ainda gotas grandes. Assim, se uma nuvem estiver já na fase de precipitação, os processos de colisão e de coalescência estão já em operação e a inseminação será inútil. Por outro lado, a iniciação do processo de coalescência não acrescenta energia à nuvem, pelo que é difícil de aceitar que a inseminação possa aumentar o conteúdo em água da nuvem. Além disso, a provocação prematura da precipitação pode originar correntes verticais, de compensação de cima para baixo, capazes de dissiparem posteriormente a nuvem, que

em circunstâncias naturais poderia ter originado uma maior quantidade de precipitação. Parece que na melhor das hipóteses, a inseminação de uma nuvem quente só pode provocar a precipitação da água existente na nuvem. (Como já se referiu anteriormente, uma nuvem com um grama de água por metro cúbico e com dois quilómetros de espessura só pode dar origem a 2mm de precipitação).

A avaliação dos resultados da inseminação de nuvens quentes é difícil, porque é impossível saber-se se a nuvem precipitaria naturalmente. Por outro lado, é difícil medir-se a precipitação de uma nuvem de convecção. A avaliação dos resultados é feita por métodos estatísticos, e são necessários muitos anos de ensaios antes que se possa tirar uma conclusão válida.

Em resumo, se as condições meteorológicas forem favoráveis, o desenvolvimento das nuvens quentes de convecção provocará precipitação natural. Se as condições atmosféricas não permitirem que as nuvens de convecção se desenvolvam naturalmente, o processo de coalescência pode ser provocado artificialmente. Todavia, como o mecanismo de coalescência não liberta energia para ajudar o desenvolvimento da nuvem, a precipitação eventualmente resultante será insignificante, evaporando-se, frequentemente, antes de atingir o solo. Em alguns casos, a inseminação pode provocar uma diminuição da precipitação por a nuvem se dissipar prematuramente.

A avaliação dos efeitos da inseminação nos outros casos também é difícil, porque não se sabe o que sucederia no caso de se não ter realizado a inseminação. Os resultados variados e contraditórios obtidos até agora, com a inseminação de nuvens, são devidos à complexidade dos processos dinâmicos, termodinâmicos e microfísicos da precipitação. A recente utilização de modelos numéricos, utilizando computadores, poderá permitir uma melhor compreensão dos referidos processos, permitindo esperar que se possa determinar as condições óptimas em que se deve fazer a inseminação.

A avaliação dos resultados da inseminação tem-se feito até agora por métodos estatísticos. No entanto, como a precipitação é muito variável no espaço e no tempo, qualquer programa de estudos dos efeitos da inseminação que seja bem planeado deve durar 5 a 10 anos, ou mesmo mais, para que se possa tirar qual-

quer conclusão válida. Mesmo assim, parece que os métodos estatísticos são, por enquanto, ainda cientificamente inadequados e não se vê substituto para um mais completo conhecimento dos mecanismos físicos da formação das nuvens e do desencadeamento da precipitação.

#### 4 — DISSIPACÃO DO NEVOEIRO

A escolha da técnica para a eliminação de nevoeiros, ou para a diminuição da sua densidade, depende do tipo de nevoeiro. Se for sobrefundido, em que as temperaturas das gotas estão abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , convém utilizar, para a sua dissipação, neve carbónica, ou iodeto de prata. No caso de se tratar de nevoeiro quente (temperatura das gotículas superior a  $0^{\circ}\text{C}$ ), há que reduzir a humidade relativa. O processo mais eficiente é o de usar substâncias higroscópicas na inseminação de misturar ar quente, ou aumentar as correntes junto ao solo, alterando a calma e aumentando a turbulência o que conduz à diluição. Muitas vezes, utilizam-se helicópteros que voando no topo dos nevoeiros provocam correntes de mistura turbulenta com ar superior, em geral mais quente do que o ar junto ao solo; a formação do nevoeiro requer a existência de ventos fracos ou calmos e ar estável com uma inversão de temperatura.

Os resultados mais espectaculares obtidos na dissipação dos nevoeiros são os que se conseguiram com os nevoeiros sobrefundidos. Nalguns aeroportos utilizam-se jactos de propano líquido. A expansão adiabática do propano, à medida que é libertado, produz um arrefecimento que conduz à formação de cristais de gelo. Para a dissipação de nevoeiros quentes ficou célebre a operação FIDO (Fog Investigation and Dispersion Operation), tão usada durante a 2.<sup>a</sup> Grande Guerra para dissipar os nevoeiros em Inglaterra. Consistia em colocar duas filas de fogareiros gigantes, uma de cada lado da pista, que com a libertação de calor provocavam a dissipação de nevoeiros. Hoje ainda se usa o mesmo princípio em muitos aeroportos (v. g. Paris) onde se utilizam motores a jacto, que projectam jactos de calor ao longo das pistas cobertas de nevoeiro.

## 5 — A SUPRESSÃO DO GRANIZO E DE TROVOADAS

A supressão do granizo para a protecção da agricultura tem recebido, ultimamente, uma grande atenção. Alguns processos para a supressão do granizo consistem em bombardear a nuvem, potencialmente geradora de granizo, com iodeto de prata, ou com neve carbónica, empregando foguetões, ou aviões, ou mesmo baterias de artilharia, comandadas por radar. Com estes processos pretende-se antecipar a formação do granizo, ou pulverizar o que já existia. Os resultados obtidos são, de certo modo, de encorajar.

As faíscas são uma das principais causas dos fogos em muitas regiões do globo. Também, neste caso, se tem procurado, através da inseminação dos cúmulo-nimbos com iodeto de prata e com neve carbónica reduzir o número de descargas eléctricas. Como se sabe, com a formação de cristais de gelo e a sua queda, como gotas de precipitação, neve ou granizo, podem diminuir a diferença de potencial eléctrico, que se estabelece entre a nuvem e a superfície do globo.

## 6 — ALGUNS COMENTÁRIOS FINAIS

As experiências realizadas para a modificação dos ciclones tropicais têm sido conduzidas no sentido de reduzir a intensidade dos ventos no núcleo central. A convergência nos ciclones é mais intensa no núcleo central (olho do ciclone) onde se formam, com as correntes ascensionais associadas, bandas espiraladas, que bordejam o núcleo central e onde a precipitação é mais intensa. Os ventos mais fortes ocorrem numa região de pequena largura, limitada interiormente pela parede do olho do ciclone. Como era de esperar devido aos fortes movimentos verticais e o consequente arrefecimento devido à ascensão adiabática, a condensação e a formação de nuvens são extremamente rápidas. A ideia base consiste em conseguir que a zona de condensação, onde os ventos associados são mais intensos aumente artificialmente, por inseminação. Com a libertação de calor latente a densidade do ar diminui, assim com a pressão, donde resulta um decréscimo do gradiente da pressão atmosférica e, portanto, a diminuição da intensidade dos ventos.

Ao passar em revista as várias tentativas para a modificação do estado do tempo, parece que se estão a fazer progressos, ainda que seja preciso continuar e aprofundar muito mais o conhecimento dos mecanismos da dinâmica dos ciclones. A investigação requer meios logísticos poderosíssimos, que vão dos satélites artificiais, aos aviões, até aos sistemas especiais de radar e a computadores de grande capacidade. Mas, a tecnologia, só, não chega. Se não se aumentarem também os esforços no sentido de se desenvolver a compreensão mais profunda dos processos, que ocorrem na atmosfera e no sistema climático, pouco se conseguirá. Estes esforços compreendem não só um melhor conhecimento da microfísica das nuvens e da sua dinâmica, como também da dinâmica da camada limite planetária e da sua interacção com a circulação geral, a que se junta, ainda, a necessidade de prever os fenómenos de mesoescala, com muito mais precisão.

**IV — INFLUÊNCIA DO HOMEM  
NO CLIMA, EM ESCALA  
GLOBAL**

## 1 — INTRODUÇÃO

Além da influência de carácter local e regional nos locais em que as actividades humanas e a poluição associada se encontram mais concentradas, devemos considerar também a influência dos efeitos inadvertidos de carácter global sobre o clima e, portanto, sobre o ambiente. Esta influência resulta de vários efeitos resultantes da acção do homem. Estes incluem, como já dissemos, a adição de novas substâncias à atmosfera, provocando a alteração da sua composição. Compreendem o aquecimento directo da atmosfera pela queima de combustíveis fósseis e pela conversão de energia nuclear. Incluem também as mudanças de temperatura provocadas pelo aumento da concentração do dióxido de carbono e doutros gases; o efeito no balanço energético da atmosfera e do globo devido ao aumento da concentração da matéria particulada. A precipitação ácida é também o resultado da poluição química, como veremos.

## 2 — ADIÇÃO DE GASES À ATMOSFERA: INFLUÊNCIA DA POLUIÇÃO DA ATMOSFERA

Os gases e as partículas lançadas na atmosfera podem afectar o clima porque:

- a) Alteram o balanço da radiação da atmosfera; do globo, modificando a estrutura térmica e dinâmica da atmosfera;
- b) Interferem no equilíbrio fotoquímico da estratosfera e, em especial, no balanço do ozono;
- c) Activam a nucleação e a formação de nuvens, de nevoeiros e da precipitação que, por vezes, pode ser ácida.

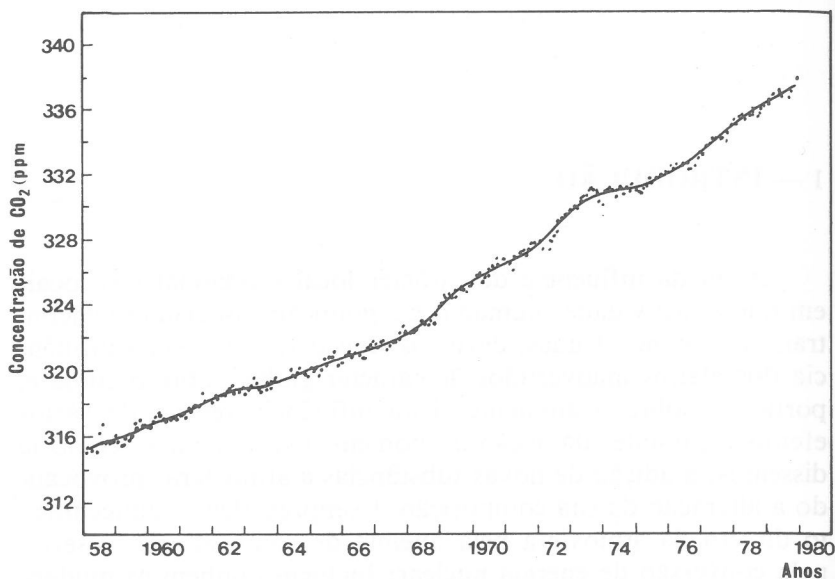


Fig. 14 — Distribuição dos valores médios mensais das concentrações do dióxido de carbono em Mauna Loa (ilhas Hawaí), depois de removido o efeito sazonal.

Entre os gases lançados na atmosfera pelas actividades humanas, destaca-se, pela sua importância, o dióxido de carbono, que pode originar, ou reforçar, o efeito de estufa da atmosfera.

O dióxido de carbono lançado para a atmosfera, devido à utilização de combustíveis fósseis, constitui, por certo, a influência potencial mais significativa para a modificação do equilíbrio climático. Aceita-se que o conteúdo actual de dióxido de carbono, cerca de 330 ppmv poderá vir a atingir valores de 400 ppmv no início do próximo século, podendo mesmo duplicar em meados do século XXI. Todas estas estimativas tentam tomar em consideração a fracção de dióxido de carbono que é absorvido pelos oceanos e consumido pela biosfera.

À escala de séculos, o aumento de dióxido de carbono é irreversível, porque sendo os oceanos o principal sumidouro, estes requerem 1000 a 1500 anos para atingirem de novo um estado de equilíbrio mútuo com a atmosfera. Mais de metade do dióxido



de carbono libertado pelo homem, durante o último século, está ainda na atmosfera e lá se manterá durante um largo tempo, enquanto as águas da superfície dos oceanos não se deslocarem para maiores profundidades (processo muito lento).

Embora o dióxido de carbono seja o gás que tem, provavelmente, a influência dominante no clima, em escala global, há outros gases absorventes da radiação infravermelha lançados na atmosfera em quantidades consideráveis, suficientemente estáveis para se acumularem na atmosfera e, depois, influenciarem o efeito de estufa. Entre estes, os mais importantes, pelas suas possíveis consequências, são os óxidos de azoto e o metano.

Devemos ainda referir, pela sua importância actual, os clorofluorcarbonos («freons») que, ao serem lançados na atmosfera, atingem a estratosfera praticamente sem se terem alterado. Mas uma vez na estratosfera, os clorofluorcarbonos reagem com o ozono existente, provocando uma diminuição da sua concentração. Daqui resultaria um aumento da radiação ultravioleta, que poderia atingir toda a superfície do globo, com todas as suas consequências nefastas para a qualidade de vida e para a saúde.

Os «freons» são largamente utilizados nos sistemas de arrefecimento dos frigoríficos domésticos e como suportes «inertes» de várias substâncias pulverizadas sob a forma de «sprays». O emprego destes está, em muitos países, a ser agora posto em causa, e a evitar-se, ao máximo, o seu uso.

A concentração dos clorofluormetanos é, por enquanto, muito baixa (0,2 partes por bilião em volume, ppbv) mas, a manter-se o actual ritmo de produção, pode aumentar consideravelmente, e atingir valores da ordem de 2,7 ppbv em meados do próximo século.

A avaliação da concentração da matéria particulada na atmosfera é, por enquanto, bastante incerta. O mesmo se pode afirmar sobre a distribuição das suas dimensões. Ainda que os efeitos ópticos deste *aerosol* sobre a radiação solar (reflexão, difusão, absorção) sejam mal conhecidos, pode aceitar-se que provocam uma redução da radiação solar, o que pode conduzir a um arrefecimento que ultrapasse o seu efeito de estufa. Por isso, se aceita que um aumento da concentração da matéria particulada na atmosfera, poderá conduzir a um abaixamento da temperatura à superfície.

Algumas das partículas podem servir de núcleos de condensação, como acontece com as partículas de trióxido de enxofre ( $SO_3$ ), que levam à formação do *smog* químico (tipo Londres) e à formação de precipitação ácida. As partículas de óxido de azoto libertadas, principalmente pelos veículos motorizados, podem levar, por acção catalítica da luz à formação de *smog* fotoquímico (tipo Los Angeles).

Com estas condições externas, com ar calmo e uma grande estabilidade, o aumento da poluição pode ser tão grande que sejam de aconselhar a difusão de avisos convenientes.

Os efeitos da poluição do ar no balanço da radiação e na distribuição de nevoeiros, de núvens e da precipitação, ainda que visíveis, (*smog*, ilha térmica, etc.), não se podem quantificar por enquanto e, portanto, deduzir as suas implicações para o clima.

A circulação da atmosfera pode transportar os materiais poluentes, até grandes distâncias. Quando os poluentes se depositam na superfície do globo através da precipitação, ou doutros mecanismos, podem alterar as condições fisiográficas, designadamente acidificar os solos e as águas dos lagos (caso da Suécia e da Finlândia com a poluição da Europa do Norte), destruir as florestas, ou alterar a cor das neves e dos gelos. Estes podem ficar cobertos por uma camada de poeiras acinzentadas, ou mais escuras, o que altera profundamente o valor do albedo da neve, pura e branca. A maior absorção da radiação solar provoca o degelo e altera a temperatura do ar vizinho. Desta forma, a poluição do ar pode ter efeitos regionais sobre o clima.

### 3 — AQUECIMENTO DA ATMOSFERA: POLUIÇÃO TÉRMICA

Vejamus a libertação de calor para a atmosfera. Quando se calcula o valor médio da quantidade de energia libertada para a atmosfera devido às actividades humanas (da ordem de  $0,054 \text{ wm}^{-2}$ ), verifica-se que é uma fracção pequeníssima da energia solar que atinge a superfície do globo, que, em média, é da ordem de  $150 \text{ wm}^{-2}$ . Nos Estados Unidos, por exemplo, e noutros países de grande desenvolvimento industrial, em escala

regional o fluxo de energia é muito mais elevado, podendo atingir  $10 \text{ wm}^{-2}$  a  $100 \text{ wm}^{-2}$  em Invernos frios. Mas, comparada com outras fontes de energia, a sua contribuição para o balanço global é desprezável. No entanto, há razões para admitir que a libertação de calor poderá ser importante em escala local, antes dos seus efeitos serem perceptíveis em escala global. De facto, a temperatura do ar nas grandes cidades é superior à temperatura das regiões vizinhas e o aquecimento do ar sobre as grandes cidades, juntamente com o aumento que ali se observa da matéria particulada, faz aumentar a precipitação convectiva a jusante dessas cidades. É o conhecido «efeito de ilha». Sobre as cidades, esta *poluição térmica* pode originar «ilhas de calor» com a forma de cúpulas (cúpula urbana) e de grandes *plumas urbanas*. Esta cúpula urbana pode manter-se durante vários dias, principalmente quando o vento é fraco e a estabilidade estática é grande. Por vezes, a temperatura nas cidades pode ser superior à dos arredores e as diferenças podem atingir  $1^\circ\text{C}$ .

Esta poluição térmica pode ter efeitos locais. Admite-se que é por causa deste aquecimento que a frequência dos nevoeiros em Londres diminuiu a partir do último século e que a precipitação aumentou devido à intensificação da convecção.

#### 4 — MODIFICAÇÃO DO ALBEDO. IMPLICAÇÕES DO AQUECIMENTO DA TERRA

O albedo dos materiais que constituem os continentes, assim como o da sua cobertura vegetal, têm uma influência profunda no balanço da energia do sistema climático, em escala local, regional ou planetária. A modificação do albedo da superfície do globo para a radiação solar introduz, por isso, variações do clima. Entre as actividades humanas, que podem alterar o albedo, devemos citar as práticas agrícolas, em que a sobrepastagem e a deflorestação o reduzem substancialmente. O mesmo se passa com a urbanização progressiva e a adição de aerossóis na baixa atmosfera. Ultimamente, têm-se tentado algumas práticas para reduzir a extensão das regiões geladas, através do polvilhamento por materiais escurecidos. As tentativas de evitar a evapo-

ração da água de lagos e de albufeiras não tem sido, por enquanto, muito bem sucedida.

Vejamos, agora, algumas implicações de um possível aquecimento global.

Como se sabe, na agricultura interessa conhecer a data da última geada na Primavera e a primeira no Outono, porque determinam a estação de crescimento e de desenvolvimento das plantas. Em geral, nas latitudes médias, um aumento de 1°C na temperatura média aumenta a estação de crescimento de 10 dias. Sendo assim, poderia verificar-se um aumento substancial na estação de crescimento das plantas.

Como se espera que a temperatura das regiões polares aumente mais do que a das latitudes intertropicais, o gradiente meridional da temperatura, que mantém a «máquina atmosférica» em movimento, diminuiria. A circulação geral seria menos vigorosa e a configuração possivelmente diferente. Como as circulações transportam vapor de água de umas regiões para outras, a intensidade do ciclo hidrológico global será profundamente alterada. A um aquecimento corresponde uma maior actuação do ciclo hidrológico: a evaporação aumenta, a quantidade de vapor de água na atmosfera aumenta também, donde uma maior precipitação e, possivelmente, uma redistribuição média espacial, diferente da actual, à semelhança do que se passou durante o «período óptimo», cerca de 8000 a 5000 anos a.C.

Nestas condições, o que sucederá às camadas geladas do Antártico, da Gronelândia e do Ártico? Em resultado do aquecimento, a extensão dos gelos do Ártico poderia diminuir consideravelmente. Se, porventura, se desse a sua fusão completa, poderia dar-se uma transformação irreversível e nunca mais se regenerariam os gelos e dar-se-ia uma modificação profunda do clima da região do Ártico. No entanto, observações paleoclimatológicas mostram que tal situação nunca se teria observado em épocas geológicas passadas, o que leva a admitir que as camadas de gelo apresentam uma certa estabilidade nos períodos interglaciários passados.

As mudanças mais significativas do clima nos últimos milénios foram as que se verificaram nos desertos subtropicais do hemisfério Norte, designadamente no Sara, no deserto da Arábia, na região de Rajasthan e no vale de Indus, onde o clima teria si-

do mais húmido. No Sara, deveria ter havido um clima de savana, como indicam as pinturas rupestres ali encontradas, com cenas esplêndidas de caça, com espécies hoje inexistentes. A civilização do vale do Indus, que floresceu durante o período húmido, desapareceu completamente com a desertificação. Nos últimos 4000 anos o processo de desertificação tem-se vindo a intensificar, principalmente na cintura subtropical.

Não se conhecem, exactamente, os mecanismos que levam às mudanças de clima que originam a desertificação. No entanto, temos que aceitar que se verificaram alterações profundas no regime da circulação geral, que tende a aumentar as secas, ainda que a actividade humana não deixe de ter influência no alastramento da desertificação.

## **5 — O PROBLEMA DO DIÓXIDO DE CARBONO E O CLIMA**

### **5.1 — Os combustíveis fósseis e o aumento da concentração em dióxido de carbono na atmosfera**

Como já referimos, o dióxido de carbono é um componente minoritário da atmosfera, mas desempenha um papel essencial na energética da Terra. Nos últimos tempo tem-se verificado que a concentração do dióxido de carbono tem vindo a aumentar de uma forma regular, acompanhando o aumento do consumo de combustíveis fósseis. A combustão do petróleo, do gás natural e do carvão, liberta dióxido de carbono para a atmosfera, onde aproximadamente metade fica retida. A deflorestação, o decaimento do húmus dos solos, as transformações que ocorrem nos lagos e nos pântanos, com a decomposição de matéria orgânica, podem contribuir também para o aumento do dióxido de carbono na atmosfera.

O dióxido de carbono, como explicámos, gera um efeito de estufa na atmosfera. À medida que a concentração do  $CO_2$  aumenta, mais calor fica retido na atmosfera, por absorção da energia radiante infravermelha emitida pela superfície do globo,

conduzindo, portanto, a um aumento de temperatura. Notaremos, entretanto, que o «efeito de estufa» da atmosfera é diferente do «efeito de estufa» real. Com uma estufa, além de se reter a energia solar que atravessa as paredes, reduzem-se as perdas de calor por convecção, o que não acontece com a atmosfera.

Vamos, nesta secção, analisar o papel dos combustíveis fósseis no aumento do dióxido de carbono e as possíveis consequências para o clima. Destacaremos os efeitos potenciais de um aumento da concentração de  $CO_2$  na distribuição e no aumento da temperatura do ar, e na intensidade da precipitação, no nível médio das águas dos mares e na fotossíntese. Referimos, ainda, os impactes socioeconómicos que, potencialmente, resultam dum aumento da concentração do  $CO_2$  na atmosfera.

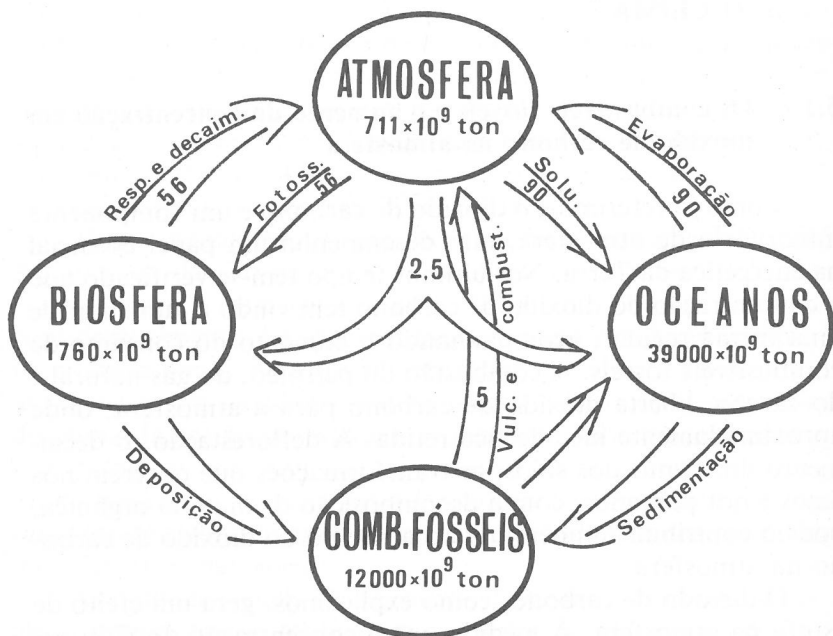


Fig. 15 — Ciclo do carbono no sistema climático. Estão indicados os fluxos e as quantidades de carbono em cada um dos quatro grandes reservatórios.

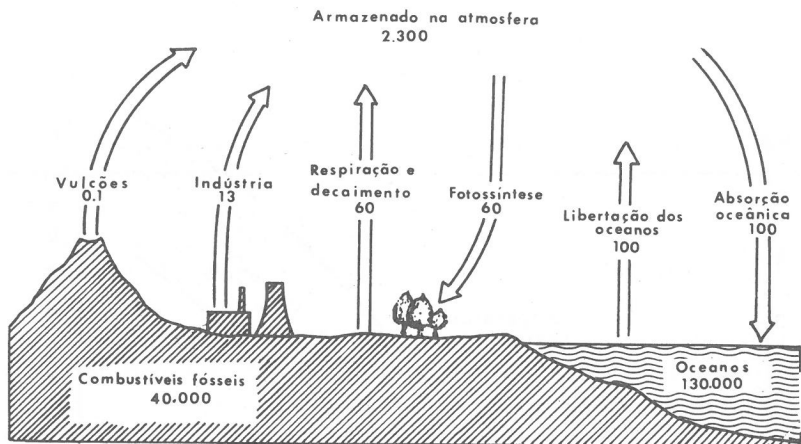


Fig. 16 — Ciclo do dióxido de carbono. As emissões e as absorções são expressas em  $10^9$  toneladas por ano.

O carbono no sistema climático distribui-se por vários reservatórios, que são os oceanos, a atmosfera, a biosfera e os combustíveis fósseis. As permutas de carbono entre subsistemas são complexas, e não são ainda perfeitamente conhecidas. Na figura junta, dá-se um esquema de carbono no sistema climático. Os conteúdos em carbono dos vários reservatórios vêm expressos em gigatoneladas ( $10^9$  t). Os mecanismos de transparência estão indicados na figura e os fluxos vêm expressos em  $10^9$  t/ano, de carbono. Para obter fluxos equivalentes, em termos de dióxido de carbono, basta multiplicar os números correspondentes por 11/3.

Aceitando que a concentração de  $CO_2$  na atmosfera é 335 ppm, a atmosfera contém cerca de 711 Gt (1 gigatonelada =  $10^9$  ton) de carbono. Este valor é muito inferior ao da biosfera (1760 Gt) e, claro, ao dos oceanos  $39\ 000 \times 10^9$  t). Podemos determinar a ordem de grandeza do tempo de residência do dióxido de carbono na atmosfera, dividindo a quantidade total do dióxido de carbono pelas taxas de dissolução nos oceanos e de consumo pela fotossíntese. Obtemos um valor da ordem de cinco anos. Este seria o tempo que levava a consumir todo o anidrido carbónico da atmosfera, se parasse a sua produção. Re-

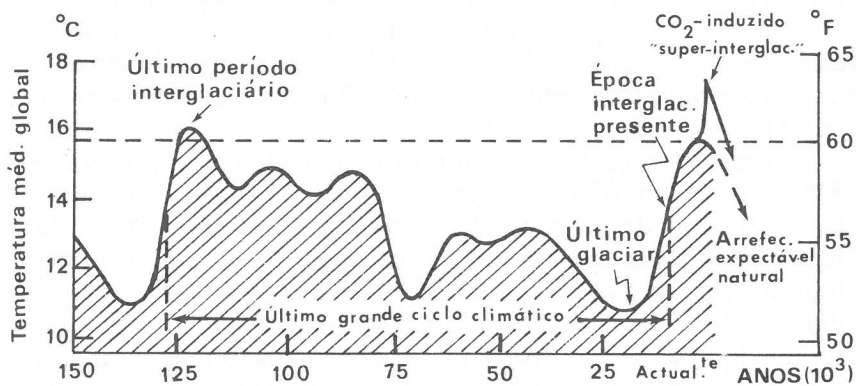
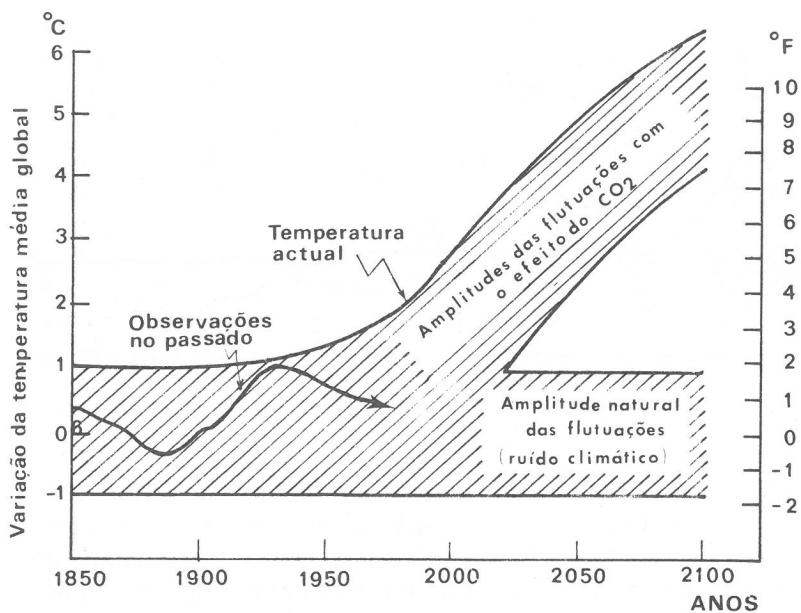


Fig. 17 — Amplitude da temperatura média à escala global, com e sem o efeito do dióxido de carbono.



presenta, em média, o tempo que uma molécula de anidrido carbónico permanece na atmosfera.

O tempo de residência, relativamente curto, mostra bem como a atmosfera é importante em todo o ciclo do dióxido de carbono no sistema climático.

O aumento do dióxido de carbono na atmosfera tem vindo a ser confirmado pelas observações que, há mais de vinte anos, depois do Ano Geofísico Internacional, se têm vindo a realizar. O aumento, tal como mostram as medições, corresponde a uma retenção pela atmosfera de cerca de metade do dióxido de carbono que se produziu com o consumo dos combustíveis fósseis. A deflorestação generalizada, que se verificou nalgumas regiões, pode também ter contribuído para um aumento significativo do dióxido de carbono para a atmosfera. A queima e a deterioração da vegetação lançam também quantidades consideráveis de dióxido de carbono na atmosfera. No entanto, os constituintes da biomassa não constituem fontes ou sumidouros decisivos do dióxido de carbono para a atmosfera. O aumento provém essencialmente da utilização dos combustíveis fósseis. Logo, o problema do dióxido de carbono deve ser tomado em consideração no planeamento de qualquer política de energia, e deixou de constituir um mero exercício de investigação científica.

Aceitando, portanto, que a combustão de carburantes fósseis continuará a ser a fonte dominante do anidrido carbónico para a atmosfera e que esta tem a capacidade de reter apenas metade deste, podemos inferir para vários cenários os níveis de dióxido de carbono, a partir dos consumos futuros de combustíveis fósseis. Por exemplo, se se mantiver a taxa actual de consumo, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera atingiria o dobro do volume pré-industrial pelo ano de 2180. Mas, se a taxa de consumo aumentar cerca de 2% ao ano, o dobro da concentração do dióxido de carbono poderá ser atingido por volta do ano 2028. Se a taxa de crescimento for 4%, o dobro pode vir a observar-se no ano 2020.

Podemos, portanto, numa estimativa equilibrada, admitir que a continuar a taxa normal de crescimento de consumo de energia, (2,5% e por ano), se deve atingir, por meados do próximo século, o nível duplo do valor pré-industrial da concentração do dióxido de carbono.

Podemos, talvez, esperar um aumento de 1°C na temperatura, pelo ano 2000, ou mesmo de 2°C a 3°C no ano 2050, admitindo que a concentração do dióxido de carbono duplica em relação ao valor pré-industrial. Mas os aumentos em escala zonal podem ser superiores e a norte de 44° de latitude a temperatura poderia atingir valores muito elevados.

Como já referimos em pormenor, estas estimativas estão afectadas dum dada incerteza, em parte por não se tomarem em conta todas as interacções no sistema climático, especialmente o efeito das nuvens no balanço radiativo e, em parte, pela dificuldade em prever a taxa de utilização dos combustíveis e a consequente produção de dióxido de carbono. Além disso, a capacidade de absorção de dióxido de carbono pelos oceanos e pelas florestas é, ainda, matéria de controvérsia.

## 5.2 — Efeito na temperatura do ar: um aquecimento global

O efeito do aumento de dióxido de carbono da atmosfera na temperatura salda-se por um aquecimento global. O aumento da concentração do dióxido de carbono que se espera, devido ao consumo de energia, não tem precedentes na história do clima da Terra. Por isso, não se dispõe de elementos empíricos que permitam avaliar as consequências de um aumento de concentração de dióxido de carbono na atmosfera. A resposta só se pode obter através de modelos teóricos de simulação do clima.

Numa apreciação global dos resultados obtidos com vários modelos, a Academia Nacional das Ciências dos Estados Unidos concluiu que «se o dióxido de carbono na atmosfera continuar a aumentar não há razão para duvidar de que resultarão alterações para o clima». Não se vê razão para não aceitar que essas modificações sejam significativas. O efeito imediato do aumento do dióxido de carbono é o aumento da temperatura do ar da baixa troposfera devido a um efeito mal classificado como «efeito de estufa». De facto, numa estufa o aquecimento é em grande parte devido à redução da convecção, enquanto na atmosfera, com o aumento de dióxido de carbono, o aquecimento resulta da diminuição das perdas da radiação infravermelha.

Apesar das discrepâncias dos resultados obtidos com vários

tipos de modelos, todos indicam que, em média, a uma duplicação do nível médio de dióxido de carbono na atmosfera corresponderá um aumento da temperatura da ordem de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  a  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Ora, com um aumento global da temperatura de  $3^{\circ}\text{C}$ , o clima poderia ultrapassar os limites que se têm vindo a observar nos últimos milhões de anos. Além disso, o aumento de temperatura não seria uniforme na superfície do globo, apresentando variações regionais apreciáveis, e poderia variar entre  $1,5^{\circ}\text{C}$  e  $4,5^{\circ}\text{C}$ . Nas regiões equatoriais, as variações da temperatura do ar seriam relativamente pequenas, enquanto que nas regiões das latitudes elevadas e polares, o aquecimento seria maior e, ainda, reforçado por efeito do mecanismo de auto-realimentação: temperatura-gelos-albedo-temperatura. Os efeitos nas regiões polares do hemisfério Sul são menos pronunciados.

Se as diferenças de temperatura entre o equador e os pólos se reduzirem, como prevêem os vários modelos, a circulação geral da atmosfera sofreria modificações profundas. Os ventos dominantes diminuiriam de intensidade, o que viria a afectar as circulações dos oceanos e, portanto, modificar a temperatura média da superfície dos oceanos e das regiões costeiras.

Devido à elevada capacidade calorífica dos oceanos e à sua acção moderadora sobre o clima, os efeitos do aumento de dióxido de carbono na atmosfera não serão rápidos e só se fariam sentir uma ou duas décadas depois.

### **5.3 — Efeitos potenciais na precipitação, na agricultura, no nível médio dos mares e nos ecossistemas**

Podemos dizer que a actual civilização se tem vindo a desenvolver num clima relativamente estabilizado, variando entre limites pouco afastados. Entretanto, temos agora que encarar a possibilidade de uma alteração apreciável do clima devido ao aumento do dióxido de carbono na atmosfera, provocado pelas actividades humanas.

Entre essas alterações, destacaremos as modificações potenciais na distribuição da precipitação e da evaporação e, portanto, nas áreas agrícolas; a subida do nível médio dos mares, as modificações das zonas pesqueiras, etc.

Como o aumento do dióxido de carbono, os modelos indicam uma activação do ciclo hidrológico com a intensificação da evaporação e da precipitação. Este resultado é confirmado pela comparação das distribuições de precipitação obtidas em anos quentes, com as correspondentes de anos mais frios. Os modelos

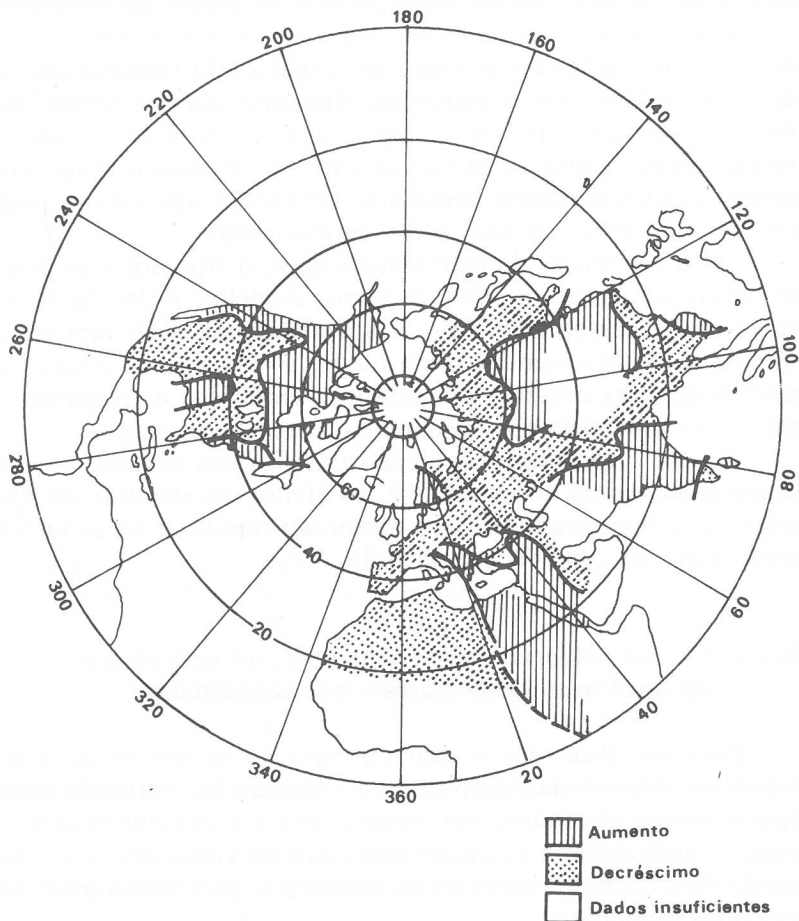


Fig. 18 — *Varição da precipitação média anual entre anos frios e anos quentes. Mesmo variações pequenas da temperatura, da ordem de 0,6°C, têm provocado variações geográficas na precipitação, como diminuições sobre grandes partes dos Estados Unidos, Europa, Rússia e Japão e aumentos na Índia e no Médio Oriente.*

mostram que haveria modificações na distribuição geográfica com uma diminuição nos Estados Unidos, no Norte da Europa, na Rússia e no Japão e um aumento na região do Mediterrâneo, no Médio Oriente e nalgumas regiões desérticas actuais. Por exemplo, o Sara poderia voltar a ter um clima mais húmido, como teve durante o período de clima óptimo, há cerca de 4000-8000 anos.

A produção agrícola depende de forma crítica dos factores regionais do clima, como a temperatura, a precipitação, a nebulosidade, a radiação solar e, claro, da fertilidade do solo. As variações da precipitação podem afectar mais a produção de alimentos do que as variações de temperatura. Como as modificações na distribuição das chuvas não são uniformes, as potencialidades agrícolas podem aumentar numas regiões e diminuir noutras. Assim, serão de esperar estações de crescimento mais longas nas latitudes elevadas até onde se poderão alargar as zonas agrícolas. Todavia, um aumento substancial da temperatura poderia prejudicar as culturas nas latitudes médias. Este resultado é confirmado por estudos realizados nos Estados Unidos, que mostram que em anos mais quentes a produção do milho é menor. A produção de outros cereais, como o trigo, poderia ser substancialmente afectada por condições climáticas mais secas e mais quentes. Já a produção do arroz poderia beneficiar, se as chuvas das monções não sofrerem, como parece, modificações.

Algumas experiências, conduzidas em ambientes controlados, parecem indicar que a produção de muitas culturas aumentaria com o aumento do dióxido de carbono, desde que não exceda uma concentração de 1000 ppm a 1500 ppm, mantendo constante os outros factores climáticos.

Outra consequência possível do aumento do dióxido de carbono seria a intensificação das pragas de insectos, com todas as consequências inerentes para a agricultura e para a saúde pública.

O aumento do dióxido de carbono pode conduzir a uma subida do nível médio dos mares resultante da desintegração da camada de gelo na Antárctica ocidental. As temperaturas médias no Verão são da ordem de  $-4^{\circ}\text{C}$ , mas um aumento da temperatura, mesmo pequeno, conduziria à fusão de parte da Antárctica, porque está assente abaixo do nível médio do mar. A fusão

dos gelos poderia levar a uma subida de 5 m a 8 m do nível das águas dos oceanos.

A duplicação da concentração em dióxido de carbono poderia ter implicações profundas no clima do hemisfério Norte, porque a extensão do Ártico diminuiria consideravelmente, podendo mesmo admitir-se que os gelos poderiam desaparecer com a fusão completa. Ora este desaparecimento poderia ser mesmo irreversível e nunca mais se regenerar a calota gelada. Por outro lado, as condições da Gronelândia poderiam ser, totalmente diferentes, pondo a descoberto terras que agora se encontram completamente submersas pelos gelos. Enquanto que a primeira situação parece que nunca se teria verificado, como se depreende da paleoclimatologia, o aumento da área utilizável na Gronelândia é um facto histórico, como referimos em trabalho anterior (Peixoto, 1984).

Muitas das neves e do gelo permanentes nas latitudes elevadas desapareceriam e os solos gelados poderiam fundir, o que levaria a mudanças profundas do habitat e da ecologia daquelas latitudes.

Estas perturbações do clima interfeririam profundamente nos balanços dos ecossistemas actuais, como as estepes, as tundras, as florestas e os desertos, com a diversidade de espécies animais e de plantas, que as caracterizam. A posição geográfica e a composição dos ecossistemas poderia alterar-se profundamente.

Um aquecimento eventual dos oceanos, depois do aquecimento da atmosfera, poderia alterar a produção das espécies marinhas, por alterar as regiões de «upwelling» de nutrientes. Um aumento significativo da temperatura da atmosfera poderia, por isso, ter efeitos substanciais na extensão e na localização dos bancos de pesca.

Mas, o aumento do teor em dióxido de carbono na atmosfera poderia ter ainda implicações socioeconómicas, dado o risco de se verificar uma ruptura rápida da produção agrícola, a formação de inundações ou a desertificação.

Um aumento do nível médio dos mares de 5 m a 8 m, como referimos, poderia inundar várias cidades do litoral, onde hoje vivem alguns milhões de habitantes. E as implicações poderiam ser ainda mais catastróficas se a subida se desse de uma forma rápida.

## 6 — PRECIPITAÇÃO ÁCIDA

### 6.1 — Formação da precipitação ácida

A precipitação ácida pode considerar-se como uma consequência da interferência do homem no clima. Constitui um tema de grande actualidade pelas suas consequências ambientais e ecológicas como se conclui na Conferência de Estocolmo sobre a Precipitação Ácida reunida em Junho de 1982.

Aceita-se hoje que a precipitação é responsável por efeitos tão diversos como a erosão dos materiais do Pártenon em Atenas e da Catedral de Colónia, a diminuição da população piscícola nos lagos da Suécia e nos lagos dos montes Adirondack nos Estados Unidos e a contaminação das florestas da Escandinávia. No Canadá chegou-se mesmo a considerá-la como um holocausto ecológico.

Estes efeitos parecem estar associados aos valores relativamente baixo do pH<sup>(\*)</sup> da precipitação caída nalgumas regiões. As gotículas das nuvens formam-se em torno de partículas sólidas ou líquidas que existem na atmosfera e constituem os núcleos de condensação da água. Neste caso, os núcleos de condensação das gotículas da água seriam constituídos por substâncias químicas que, em solução aquosa, apresentam uma forte acidez (pH  $\leq 7$ ). Esta aumentaria ainda com a incorporação pelas gotículas de outras partículas ácidas com que chocassem nos movimentos incessantes daquelas.

A precipitação ácida tem que ser enquadrada no problema geral da poluição e no transporte de poluentes, a longas distâncias, pelos mecanismos da circulação geral da atmosfera. Por isso, no estudo da precipitação ácida, devemos considerar, em conjunto, a sequência: fonte poluente-transporte-deposição dos poluentes e os mecanismos que têm lugar nas várias fases da cascata.

(\*) Define-se pH como o logaritmo do inverso da concentração hidrogeniônica. Uma solução neutra tem um pH = 7. Para valores inferiores a solução é ácida e para valores de pH superiores a 7 a solução é básica.



Fig. 19 — As reacções químicas na atmosfera podem converter dióxido de enxofre e óxidos de nitrogénio gasosos numa grande variedade de compostos, como os ácidos sulfúrico e nítrico. A radiação solar, a humidade relativa e a presença de oxidantes e de catalisadores todos concorrem para a formação de novos compostos.

Afinal as chaminés que se construíram cada vez mais altas para ejectar os poluentes nas nuvens mais elevadas da atmosfera onde se poderiam deixar levar pelas circulações dominantes resolveram o problema local, próximo, da poluição, mas não conseguem eximir-se à inexorabilidade da Lei de Newton... «o que vai para cima tem de vir para baixo». E assim, os problemas locais transformam-se em problemas regionais.

Tal como os problemas seus aparentados, a precipitação ácida, a distribuição global de dióxido de carbono ou a perda de ozono não reconhecem nem fronteiras nem geografia e muito menos apresentam credenciais...

É relativamente fácil medir a composição química e a acidez das águas dos lagos e dos solos e determinar as possíveis espécies biológicas, que podem ser potencialmente afectadas. É, porém, extremamente difícil determinar a origem das substâncias ácidas e os seus percursos na atmosfera. Contudo, não há dúvida que «num lado se põe o ramo e noutro se vende o vinho». É, também, extremamente difícil avaliar, numa base quantitativa, os prejuízos ambientais que decorrem da precipitação ácida.

Determinações contínuas da acidez e da composição química das águas da chuva sugerem que a acidez se deve



atribuir, em primeiro lugar, à existência de sulfatos e de nitratos na atmosfera e de gases precursores, como o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), o trióxido de enxofre ( $SO_3$ ), o óxido nítrico ( $NO$ ) e o peróxido de nitrogénio ( $NO_2$ ), entre outros. Os valores relativamente baixos do pH da precipitação na região nordeste dos Estados Unidos devem estar relacionados com as emissões de dióxido de enxofre e de óxidos de azoto, provenientes de fontes poluentes da região, altamente industrializada, dos Grandes Lagos. Não obstante as fontes naturais de partículas ácidas, como as que provêm de erupções vulcânicas, rebentamento das vagas marinhas, decomposição anaeróbica de matéria orgânica, hoje aceita-se que a precipitação ácida que cai nos Estados Unidos, no Canadá, na Escandinávia, no Japão e na China tem origem na combustão de combustíveis fósseis.

Como se sabe, a utilização de combustíveis fósseis associada à actividade industrial, à geração de energia e aos transportes, lança na atmosfera quantidades enormes de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e de óxidos nítricos ( $NO_x$ ). Nas regiões fortemente industrializadas como a Europa, a América do Norte, a China-Japão, as emissões antropogénicas são da ordem de cinco vezes maiores do que as emissões naturais.

A taxa de oxidação dos óxidos de enxofre e de nitrogénio depende de factores atmosféricos complexos, da intensidade da radiação solar, da humidade relativa, da existência e da natureza dos núcleos de condensação na atmosfera. À oxidação atmosférica deve, ainda juntar-se a que se verifica nas gotas das nuvens, dos nevoeiros, etc. Em solução aquosa, o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e o trióxido de enxofre ( $SO_3$ ) formam ácidos sulfuroso e sulfúrico, respectivamente. No entanto, o  $SO_2$  absorvido pelas gotas de água, em presença de outras substâncias químicas, pode ser oxidado para originar ácido sulfúrico.

Os óxidos de azoto formados pela combustão a altas temperaturas de combustíveis fósseis na atmosfera passam por transformações paralelas às do  $SO_2$  (ainda que as reacções sejam agora mais complexas), para formarem partículas de nitratos ou de ácido nítrico. A acidez da precipitação pode, em geral, ser atribuída à presença de ácido sulfúrico e de ácido nítrico nas gotas de chuva, ou nos cristais de neve («ano de nevão, ano de pão») (fig. 19).

É evidente que se torna indispensável o conhecimento dos factores meteorológicos, que levam à dispersão, ao transporte e à actividade química dos óxidos de enxofre e de nitrogénio na atmosfera, porque o destino final destes poluentes depende decisivamente desses factores. Os ventos varrendo as regiões industrializadas da Inglaterra, do Rur, da Alemanha Ocidental, acareiam e processam as partículas precursoras ácidas para as lançarem sem cerimónia nas montanhas ou nos lagos da Suécia. Durante o transporte dos poluentes, ocorrem reacções na matéria particulada em suspensão na atmosfera (aerosol), que podem transformar o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) em sulfatiões ( $SO_4 =$ ). Estas partículas podem permanecer em suspensão na atmosfera, durante vários dias e serem transportadas pelos ventos dominantes das regiões de origem a distâncias de muitas centenas de quilómetros antes de serem incorporadas nos mecanismos de condensação e da precipitação. Esta, ao incorporar umas partículas e ao arrastar outras, vai limpando a atmosfera.

Uma nuvem de poluentes lançada na atmosfera é transportada pelos ventos dominantes, ao mesmo tempo que se dá a sua dispersão turbulenta e molecular em todas as direcções. Parte do material poluente, quimicamente transformado ou não, pode ir caindo no solo, por deposição seca. Mas, esta ocorre muito lentamente, ficando na atmosfera uma grande parte de matéria particulada, formando o aerosol, que passa a constituir um grande manancial de núcleos de condensação. Além disso, uma vez formadas as gotículas, estas colidem com um número considerável de matéria particulada, que, depois, é incorporada e dissolvida, à medida que as gotículas continuam a crescer. Estes são os dois mecanismos que se supõe que ocorrem na incorporação na fase inicial da formação das gotículas ou dos cristais de gelo das nuvens, dos óxidos de enxofre e de nitrogénio e dos sulfatiões e dos nitriões na precipitação. Quando se dá a precipitação, os cristais de gelo e as gotas funcionam ainda como aglutinadores de poluentes, por arrastamento e por coalescência.

Como se depreende desta análise, a precipitação ácida, que cai numa região, pode ser originada a grandes distâncias. O processo começa com o lançamento de poluentes na atmosfera (fig. 4). Depois dá-se o seu transporte pelas circulações atmosféricas e, em seguida, a sua incorporação em sistemas nebulosos

que, com o movimento das massas de ar, continuam o seu arrastamento. Finalmente, verifica-se a sua queda com a precipitação.

Para avaliar o impacto que as emissões domésticas e industriais de  $SO_2$  e de  $NO_x$  têm na acidez da precipitação, tem-se recorrido à utilização de modelos matemáticos que simulam a sequência dos fenómenos naturais, já referidos. Estes modelos, devido à sua complexidade, são mais difíceis de estabelecer do que os modelos de dispersão que se utilizam no estudo da qualidade do ar, designadamente na distribuição da poluição atmosférica. De facto o modelo matemático tem que tomar em linha de conta as numerosas variáveis que se supõem contribuir para o fenómeno da precipitação ácida, e simular mecanismos complexos que incluem transformações secundárias dos poluentes observados na atmosfera, o seu transporte, a sua incorporação nos sistemas nebulosos e, finalmente, a sua deposição pela precipitação na superfície do globo.

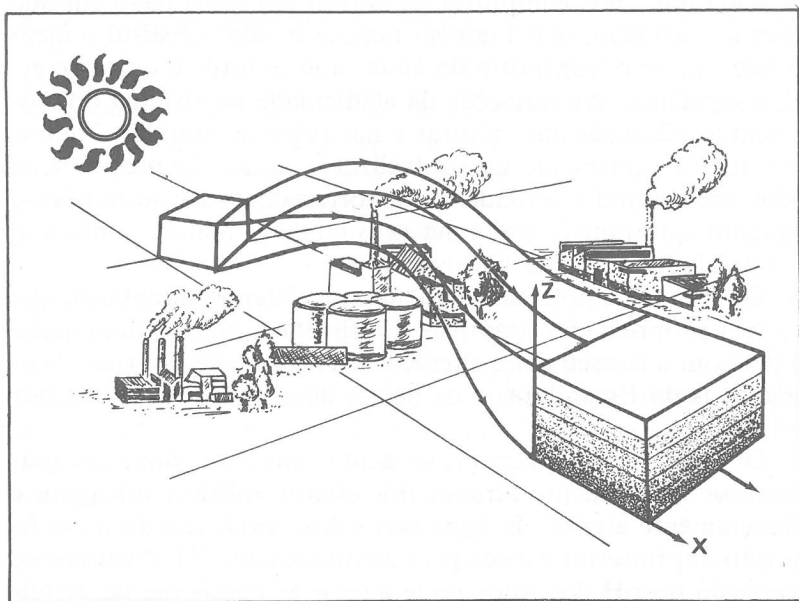


Fig. 20 — Modelos de trajetórias permitem simular o percurso de partículas de ar no espaço e no tempo. Através do modelo podem calcular-se os efeitos do vento, da insolação e da temperatura na partícula e as reacções químicas.

A abordagem sistémica tem permitido alguns avanços neste sentido. Pensa-se, assim, que será possível obter modelos mais ambiciosos e mais adequados ao fim em vista. Nestes, procuram simular-se as trajectórias das partículas do ar no espaço e no tempo e tenta incluir-se por um lado os efeitos do vento, da radiação solar e da temperatura nas partículas e, por outro, os efeitos da adição de fontes de poluição, das reacções químicas e da dispersão atmosférica.

## 6.2 — Efeitos ecológicos e erosivos da precipitação ácida

Os efeitos da precipitação ácida podem ser directos e indirectos. Em especial, devemos considerar os efeitos de natureza química e biológica sobre os solos, sobre a água e, em geral, sobre os ecossistemas e sobre a vegetação. O impacte da precipitação ácida nos solos é importante, não só por ser o meio em que cresce a vegetação, mas também porque o solo constitui o meio em que ocorre o transporte da água, que se infiltra e que se escoia à superfície. As variações da acidez no sistema dos solos têm implicações nas culturas e nas reservas hídricas. Alguns solos têm a capacidade de neutralizar a acção da precipitação ácida, constituindo verdadeiros amortecedores ou «tampões», enquanto que outros têm uma sensibilidade maior, como é o caso de alguns solos da Escandinávia.

Os efeitos da precipitação ácida nos sistemas aquáticos, que não têm propriedades «tampão», refletem-se numa diminuição do pH com a conseqüente alteração das condições de vida. Nalguns lagos da Escandinávia os peixes desapareceram quase por completo.

O impacte da precipitação ácida sobre as florestas manifesta-se directamente através dos efeitos sobre a folhagem e indirectamente através da água dos solos, modificando a configuração das florestas e a sua produtividade (fig. 21). Além disso, a variação do pH dos solos pode alterar as condições de germinação das sementes das plantas, a sua taxa de crescimento e, ainda, perturbar a acção das bactérias do solo na fixação do azoto. Os canadianos estão fortemente preocupados com as suas flores-

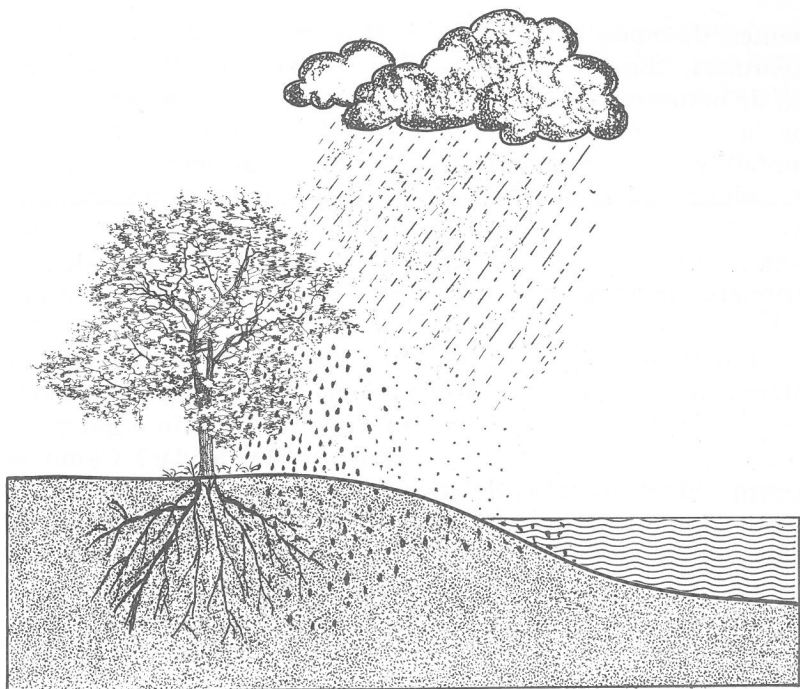


Fig. 21 — *A precipitação ácida pode afectar a vegetação directamente à medida que cai e indirectamente através dos solos. O cálcio pode ser removido dos solos (e até das folhas) podendo assim inibir-se a fixação do azoto pelas raízes das plantas.*

tas que constituem a matéria prima da sua indústria n.º 1. O mesmo se passa na Alemanha e na Escandinávia.

Muitos dos grandes monumentos são construídos com materiais que se vão deteriorando por acção dos elementos do clima a que estão inexoravelmente expostos. Neste contexto, convém destacar, entre outras, a acção desgastante e deletéria dos ventos, da variação da temperatura e da humidade, as rupturas e disrupções associadas com a formação do gelo, a acção da radiação solar, etc. A este cortejo de factores que actuam sobre os materiais por via mecânica, com maior ou menor lentidão, ainda que de forma persistente, temos que juntar agora a precipitação ácida. Esta, actuando por via mecânica e por via química e corrosiva, produz estragos mais profundos e alterações mais defor-

mantas, de modo mais rápido. Esta acção nociva torna-se mais acentuada, como é óbvio, quando os materiais de construção são de natureza calcária, como acontece com muitos monumentos da antiguidade. E que dizer quando se afirma: «Most acid rainfall in the United States is more acid than lemon juice». A precipitação ácida não será a questão do ambiente mais importante da nossa década, mas está a tornar-se, talvez, a mais emocional, corroendo não só florestas, mas também relações de boa vizinhança entre países amigos, como os Estados Unidos e o Canadá, por exemplo.

Em Junho 1982 reuniu-se em Estocolmo uma Conferência Internacional para tratar do problema da precipitação ácida. Fundamentalmente a conferência incidiu sobre as duas questões. Quais são os efeitos ecológicos das emissões ácidas? Como se podem reduzir as taxas de emissão respectivas? A conferência reuniu 22 ministros e era assistida por duas comissões de especialistas.

Os poluentes ácidos principais, resultantes das actividades humanas, são, como dissemos, o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e os óxidos de Nitrogénio ( $NO_x$ ). Quando consideramos as médias globais, as quantidades de  $SO_2$  de origem natural e de origem antropogénica são da mesma ordem de grandeza, *i.e.* 100 milhões de toneladas por ano. No entanto, nas regiões altamente industrializadas (Europa, Estados Unidos, China-Japão, etc.) as emissões artificiais são 5 vezes maiores do que as emissões naturais.

Os solos arenosos com valores intermédios de pH, entre 5 e 6, são particularmente susceptíveis de acidificação. Este é um processo lento e os seus efeitos só são detectáveis para períodos da ordem de 15 a 50 anos.

As regiões mais atreitas para a acidificação das águas são as regiões graníticas. Nalguns países da Europa as águas subterrâneas podem atingir valores de pH de 4,5.

Os prejuízos nas florestas, numa extensão de 1 milhão de hectares só na Europa Central, são devidos aos efeitos directos da poluição atmosférica, aos solos acidificados e à precipitação ácida que cai.

A acidificação das águas doces é principalmente devida à acção dos ácidos fortes como o ácido sulfúrico e nítrico. Nalgumas regiões em que a taxa de deposição excede  $0,5 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ ano})$

as águas superficiais encontram-se acidificadas e nalguns casos verificaram-se aumentos de 2-3 unidades do pH. Nalguns lagos acidificados da Suécia começou a fazer-se uma operação de neutralização usando carbonato de cálcio.

Como se podem reduzir as emissões de dióxido de enxofre e de óxidos de nitrogénio, tal como se impõe para protecção do ambiente?

Há tecnologias que permitem fazer uma redução à taxa de emissões e que já estavam a ser gradualmente instaladas, mas reconheceu-se que todas as medidas que se tomem para a conservação da energia implicam uma redução média dos poluentes, como era de esperar, já que os combustíveis livres de enxofre são muito caros para serem utilizados de rotina, principalmente em épocas de recessão económica.

Há limites para as taxas de emissão de poluentes e enxofre fixados por várias Organizações Supranacionais (OMS, CEE, OCDE, etc.) mas que nem sempre são observados.

## 7 — O METABOLISMO DAS GRANDES CIDADES E O CLIMA

As grandes cidades, com o seu metabolismo próprio, activo, intenso e contínuo, influenciam de forma decisiva o clima em escala local. As concentrações da poluição em partículas e em matéria gasosa são muito superiores às das regiões rurais circundantes. Logo, a visibilidade e a intensidade da radiação solar, em particular na região do ultravioleta, sofrem reduções, por vezes, consideráveis. Os outros elementos climáticos, designadamente a temperatura, a humidade, a velocidade dos ventos, a nebulosidade e a precipitação, são também afectados pelas grandes cidades.

Como se sabe, a temperatura média nas cidades é, em geral, 1°C a 2°C mais elevada do que a das áreas rurais vizinhas. Durante a «estação agrícola» o aumento pode ser atribuído à quase ausência de evaporação e de evapotranspiração nas cidades, ao contrário do que se passa nas regiões rurais agrícolas. A radiação solar absorvida pela superfície, não sendo utilizada na evaporação, vai aquecer a atmosfera da camada limite vizinha, por



conductividade e através da transferência turbulenta de calor sensível. Durante a noite a temperatura nas cidades é mais elevada, porque se dá o aquecimento do ar em contacto com edifícios e com as ruas relativamente aquecidos e por absorção da energia radiante emitida. Com efeito, os materiais de construção (tijolos, cimento, asfalto, etc.) têm calores específicos e condutividades térmicas mais elevados do que os dos solos e da vegetação. Por isso, têm maior capacidade de armazenar energia e ficam a temperatura mais elevada. Sendo assim, o ar vizinho é aquecido por contacto e por absorção da radiação infravermelha emitida pelos materiais. Por fim há que juntar a energia lançada no ambiente pelo aquecimento doméstico e industrial, pelos transportes, pela iluminação dos edifícios e das ruas e, talvez, até pelo metabolismo humano.

As superfícies verticais das construções, com várias orientações e, por vezes, escuras, contribuem para reflexões múltiplas da radiação solar, com sucessivas absorções, contribuindo portanto para a diminuição do albedo efectivo.

A região afectada pelo aquecimento da cidade designa-se por *ilha urbana de calor*, porque as regiões rurais circundantes têm temperaturas mais baixas. O efeito do aquecimento urbano é mais pronunciado com céu limpo do que com nebulosidade e, em regra, o aquecimento chega a desaparecer com ventos fortes. Varia também durante o dia e atinge a intensidade máxima ao fim da tarde. A inversão de temperatura da radiação, que se forma junto ao solo nas regiões rurais, durante a madrugada em noites de céu limpo, não ocorre, em regra, nas cidades. De facto, o ar frio que converge sobre a cidade e é proveniente dos arredores é aquecido na «ilha urbana», desfazendo-se a inversão junto ao solo. Por isso, a espessura da camada em que se podem difundir os poluentes aumenta.

A intensidade do efeito de ilha, varia com as estações do ano e, em geral, é mais pronunciada nas estações de transição, designadamente a Primavera e Outono. Além disso, aumenta com a extensão da cidade e com a poluição. Para grandes cidades o efeito é muito mais pronunciado, o que implica que no Inverno, por exemplo, a frequência de geadas seja menor, a fusão da neve mais rápida, o que corresponde a uma certa economia de energia. Devido ao efeito de ilha, no Verão, uma vaga de ca-



lor provoca maior desconforto numa grande cidade do que nos arredores rurais. Depois, junta-se ainda o aquecimento provocado pela dissipação da energia que mantém a refrigeração, o ar condicionado, a climatização de ambientes e todo o conforto que os grandes centros «exigem».

Devido às temperaturas mais elevadas e à menor evaporação, a humidade relativa nas cidades é baixa. No entanto, apesar disso, os nevoeiros são mais frequentes sobre as grandes cidades, porque há uma maior abundância de núcleos higroscópicos de condensação, devido à maior poluição da atmosfera. Esta situação foi particularmente relevante em Londres, enquanto se usou o carvão como principal combustível para o aquecimento doméstico.

Os ventos nas grandes cidades são, em geral, mais fracos, porque as construções actuam como obstáculos e aumentam consideravelmente o atrito e o «parâmetro de rugosidade» da superfície, favorecendo a turbulência. A intensidade dos ventos nas cidades é da ordem de 0,5 dos valores das velocidades em campo livre. Podem, no entanto, ocorrer «anomalias» com os conhecidos efeitos de canal em que os ventos de certos rumos

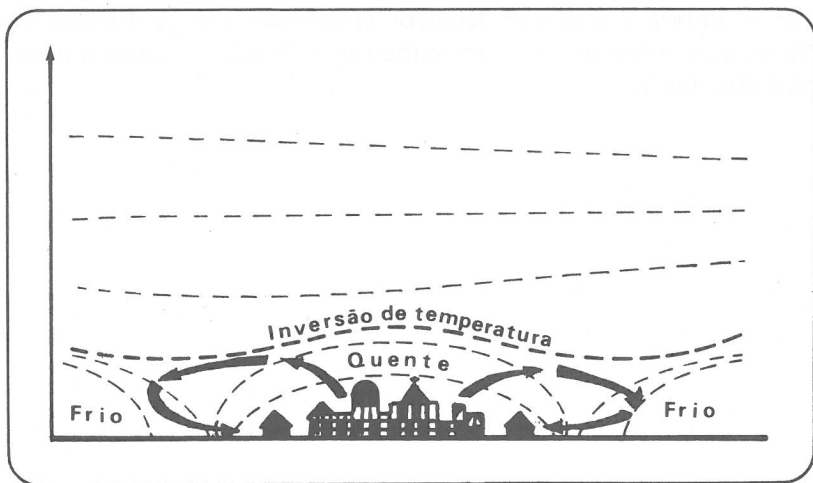


Fig. 22 — A circulação urbana quando os ventos regionais são fracos, e a distribuição da temperatura. Devido ao aquecimento a cidade comporta-se como se fosse uma «ilha térmica» no meio do «oceano de ar» vizinho.

são canalizados e sopram com velocidades maiores. Logo, no planeamento de uma cidade, os ventos dominantes devem constituir um factor a ter em consideração na urbanização.

Com ventos fracos ou em situações de calma, o efeito de ilha tende a desenvolver um sistema de brisas próprias.

O estudo do efeito de ilha sobre a precipitação parece levar à conclusão de que esta, a jusante das grandes cidades, aumenta ligeiramente (10%), devido à superabundância de núcleos de condensação. Este efeito pode fazer-se sentir a grandes distâncias das megalopoles, ou dos grandes complexos industriais.

Como se vê, uma cidade cria um microclima que se diferencia do clima da região. Por outro lado, o clima é um factor dominante a ter em consideração no planeamento, na urbanização e no tipo de construção. Mas o conhecimento das condições climáticas não basta! É necessário ter a sensibilização e um conhecimento de base de climatologia em todos os problemas que digam respeito ao ambiente. Ou já nos esquecemos ou ainda não aprendemos que vivemos no fundo de um «oceano de ar», cujo comportamento devemos conhecer para evitar os seus males e aproveitar as suas virtudes?... Poderá ser um dever ingrato estudar climatologia, mas é um dever inadiável sabê-la utilizar; dever que se impõe a todos os técnicos envolvidos em problemas de planeamento (arquitectos, engenheiros, urbanistas, economistas, médicos, etc.).

**V — O CLIMA E OS GRANDES  
PROBLEMAS  
DA HUMANIDADE**

## 1 — INTRODUÇÃO

A assinatura do clima da Terra e das suas variações revelam-se através do recorte das costas, da distribuição dos fósseis, das formas do relevo, das marcas na raça humana, da literatura, das artes e dos grandes monumentos das civilizações passadas. As grandes migrações do homem, que o teriam levado das estepes da Ásia ao continente Americano, o aparecimento, o florescimento e a decadência das grandes civilizações tiveram como componente fundamental as vicissitudes do clima no decurso dos tempos.

As calamidades das secas e a fúria destruidora das cheias deixam marcas profundas na raça humana. Os triunfos da escassez e da abundância saldaram-se sempre por grandes derrotas para a humanidade. Como diz Will Durant na *History of Civilization*: «Certain factors condition civilization and may encourage or impede it [...] civilization is an interlude between Ice Ages; at any time current of glaciation may rise again, cover with ice and stone the works of man, and reduce life to some narrow segment of the earth [...].

The heat of the tropics [...] are hostile to civilization, rain is necessary [...] the unintelligible whim of the elements may condemn to desiccation regions that once flourished empire, like Ninevah and Babylon.»

A qualidade de vida do homem é fortemente condicionada pelo clima e pelas suas variações. Vejamos, por exemplo, o caso da saúde.

Algumas doenças, as epidemias, as grandes pestes e o número de falecimentos estão associados às condições meteorológicas. Antes da drenagem de pauis e de pântanos e de algumas medidas de saneamento nos meios rurais, a mortalidade era maior no Verão devido à propagação da malária, da febre tifóide, de doenças provocadas pelos parasitas. No entanto, as doenças das vias respiratórias, tão frequentes no Inverno, não foram reduzi-

das em proporção. Já se sabe que no Outono, nas regiões temperadas, há epidemias de «influenza». As afecções nos brônquios são mais frequentes no Inverno. As doenças de coração aumentam com as grandes «tensões de temperatura» a que o homem fica sujeito. Nos climas frios as doenças de coração são mais frequentes no Inverno e nos climas quentes no Verão. Todos sabemos as implicações que as condições meteorológicas têm nas artrites e no reumatismo. Também são bem conhecidos os efeitos do Fohen e doutros ventos quentes (Siroco, Harmattan, etc.): crises depressivas, dores de cabeça, dificuldades respiratórias, etc.

E que dizer da influência do clima, nas artes, na literatura e na música? Não têm beleza as *Quatro Estações* de Vivaldi, a *Sinfonia da Primavera* de Schuman ou a *Sinfonia Pastoral* de Beethoven? E as cenas famosas da trovoadra na abertura da *Guilherms Tell* de Rossini? E a fúria dos elementos no prelúdio do *Navio Fantasma* de Wagner ou os ventos uivantes das tempestades avassaladoras das *Valkirias*? A literatura antiga assume um estilo épico, dominante. E isso, talvez, porque os povos das antigas civilizações viviam mais próximos da natureza e mais expostos à fúria dos elementos do que nós. A *Bíblia* está cheia de maravilhas e de calamidades do clima. Na *Iliada* de Homero faz-se eco dos ventos Bora e Zéfiro. Na *Eneida* de Virgílio dá-se uma descrição empolgante de uma tempestade no Mediterrâneo que constitui um dos pontos culminantes do Poema «Apparent rara nantes in gurgite vasto...» Com que mestria se descrevem nos *Lusíadas* tantos fenómenos, que vão desde as grandes tempestades, até ao fogo de S. Telmo? E a invectivação na *Romagem de Agravados* do nosso mestre Gil contra os desmandos do tempo? A beleza com que decorre o *Rei Lear* de Shakespeare é, em grande parte, devida à forma magistral como o estado do tempo participa no desenrolar da tragédia. Donde porvém a beleza da *Baldada da Neve*, de Augusto Gil, e do uivar do vento suão de José Régio?

Os pintores sempre que olham o céu são sensíveis à sua beleza e à sua força. E são, em geral, uns óptimos «observadores meteorológicos». É que eles também sentem que «as nuvens são a caligrafia do céu, sem erros de ortografia...» Uma análise cuidadosa das várias produções de pintura mostra que as reprodu-

ções dos matizes dos crepúsculos ou das alvoradas e as configurações das nuvens se ajustam ao tema em questão. Que diferença entre um pintor da escola Flamenga, da escola Inglesa, ou das escolas Italiana, Espanhola e Portuguesa.

Na arquitectura o clima impõe formas de construção e de aproveitamento de espaços e de volumes. A urbanização, que ignora o factor clima, está sujeita a desastre.

## 2 — A PROBLEMÁTICA DO CLIMA E O HOMEM

Dadas as naturais mudanças das condições de vida na Terra, o papel da climatologia está a tornar-se cada vez mais significativo e relevante e, em determinadas circunstâncias, mesmo decisivo. Desde há muito que o estudo das variações do clima tem constituído um problema de grande interesse científico. Todavia, agora, há razões determinantes e mais fortes para o seu estudo, porque se reconhece que a estabilidade económica e social é profundamente influenciada pelo clima. Por outro lado, como referimos, a actividade humana, através do impacte sobre o ambiente, pode porvocar sérias modificações no clima de forma inadvertida ou deliberada.

O clima da Terra tem variado no decurso da sua história e continuará a evoluir no futuro. Todavia, no estado actual do conhecimento, a extensão dessas variações e o momento em que se vão desencadear não são fáceis de prever.

Uma variação rápida do clima, levaria a ajustamentos económicos e sociais profundos, em escala mundial, porque os cenários globais da produção de alimentos e a distribuição das populações no mundo dependem, implicitamente, do clima. Não são os avanços lentos das grandes camadas de gelo ou dos glaciares sobre áreas cultivadas e urbanizadas, no decurso do tempo geológico, que tem que temer-se, por mais devastadoras que se apresentem, porque tais transgressões levam milhares de anos a desenvolver-se.

São mais preocupantes as variações persistentes da temperatura e da precipitação, em menores escalas de tempo. Em áreas de aptidão agrícola o recrudescimento da formação de gelos nos solos de regiões subpolares (Canadá, Sibéria) põe problemas

preocupantes e, as flutuações da temperatura da água dos oceanos, em regiões de produção de nutrientes, têm consequências nefastas, quase imediatas, nas pescas e, portanto, na disponibilidade das matérias proteicas para a humanidade.

As secas, as cheias, os ciclones tropicais e os sismos são considerados grandes catástrofes naturais. No entanto, as secas constituem a principal calamidade climática e diferem das outras catástrofes naturais, porque a sua evolução é lenta e são de natureza difusa e insidiosa. É muito difícil detectar os momentos do início e do fim duma seca e prever a sua duração, a intensidade e a área de incidência.

A sua ocorrência é determinada pelo clima, pelas condições meteorológicas e pelo comportamento do ciclo hidrológico, duas faces da mesma realidade. De facto, as secas estão relacionadas com as variações da circulação geral da atmosfera e dos oceanos e, mais remotamente, com o balanço da radiação solar e terrestre. Do ponto de vista climatológico, uma seca ocorre quando a precipitação num certo período é inferior ao valor médio, fixando-se o limite e percentagem do valor médio. Do ponto de vista hidrológico, uma seca ocorre sempre que há carências de água considerando-se não só a precipitação, mas também os escoamentos das águas de superfície e subterrâneas.

As secas estão associadas a variações do clima e são pouco frequentes. Podem considerar-se como acontecimentos extremos e raros, o que explica a falta de preparação das populações para as enfrentarem. Tendem a ser esquecidas até ocorrerem de novo! E, afinal, raras são as partes do mundo em que as secas se não observam. Todos temos presentes as secas recentes na Rússia, no Brasil e, sobretudo, no Sahel, entre 1968 e 1973.

Sob o ponto de vista socioeconómico, as secas arrastam consigo um cortejo de consequências dramáticas: a fome, a miséria, as epidemias e as carências de toda a ordem. Neste caso, a seca deve entender-se como uma situação em que se verifica um défice significativo de água, numa região suficientemente extensa. O défice de água é caracterizado pelo excesso de procura em relação à oferta de água.

O processo de desertificação ligado às secas constitui uma ameaça para as regiões áridas e semiáridas do globo. Devemos notar que embora os conceitos de aridez e de seca sejam ambos

caracterizados por falta de água disponível, o primeiro constitui uma característica climática média que se manifesta de forma persistente, enquanto que a seca corresponde a um acontecimento raro. É evidente que a aridez constitui um obstáculo sério e um grande impedimento para o desenvolvimento socioeconómico de certas regiões do globo. As secas têm um impacto mais generalizado e mais imediato, e podem afectar qualquer parte do globo.

A desertificação e a invasão das areias, associadas às secas, à sobrepastorícia, à má utilização dos solos e à erosão, são extremamente sensíveis às variações do clima. Tem que tomar-se medidas adequadas, de forma coordenada, a nível nacional e internacional, para evitar o alastramento da desertificação com o seu cortejo de calamidades. Todos temos presente o drama do avanço das areias e das deteriorações dos solos e ficamos estupefactos quando sabemos que os desertos do Sara e do Rasthjan já foram regiões férteis, em épocas passadas.

Sabemos, pela experiência, que a produção de alimentos no mundo depende, de forma muito crítica, das condições climáticas do ano agrícola. As secas e as inundações têm repercussões e implicações na migração de populações e na produção de alimentos, a nível internacional.

Durante o aquecimento global que se observou nos fins do século passado e na primeira metade do século presente, a estação agrícola, avaliada pela duração média do tempo em que a temperatura excede 5°C, cresceu cerca de duas ou três semanas em Inglaterra.

O clima tem uma influência decisiva nos recursos hídricos e, portanto, na agricultura, e na geração e na utilização da energia. O tipo de culturas e a sua produtividade, a água disponível para usos domésticos, industriais e agrícolas, a energia eléctrica e os combustíveis fósseis, as formas de energia renováveis, dependem, em larguíssima medida, da distribuição da temperatura, da precipitação, da insolação, da radiação solar e dos ventos.

Devemos acentuar, no entanto, que na maioria dos casos a variância e os valores extremos das variáveis que caracterizam o clima são mais importantes do que os próprios valores médios.

Parece que se deve procurar investigar através de modelos de simulação matemática, ainda que, inicialmente, a um nível



rudimentar, a resposta e a sensibilidade dos modelos do clima à produção e ao uso de energia e à avaliação dos recursos hídricos. Poderiam assim analisar-se as consequências que as várias modificações reais ou conceptuais poderiam ter na produção de alimentos, de energia e dos recursos hídricos. A simulação matemática do crescimento, assim concebida, poderia permitir analisar os limites do crescimento impostos pelos constrangimentos climáticos.

Enquanto que a população na Terra aumenta, e que o desenvolvimento de vários países se acentua, verifica-se uma procura crescente de alimentos, de água e de energia. Todavia, a capacidade real em satisfazer estas necessidades depende fortemente das vicissitudes do clima. O mau ordenamento do território e a pressão dum urbanismo desenfreado têm inutilizado extensões consideráveis de solos aráveis, enquanto que outros se encontram já exaustos pelo uso intensivo da terra a que ficaram submetidos durante séculos e séculos. Por outro lado, em muitos casos, os bancos tradicionais das pescas estão a ser utilizados praticamente a taxas que atingem, se é que não ultrapassam já, o limite do seu repovoamento natural.

À medida que o homem se vai aproximando da utilização plena dos recursos naturais, como a água, os solos e os subsolos, que garantem a produção de alimentos, a vida vai ficando cada vez mais dependente da estabilidade do clima actual em que vivemos. A vulnerabilidade do clima pode ser muito maior do que supomos, porque o clima actual pode não ser o «normal» ou estar mesmo a ser sujeito a tensões externas, sem o sabermos, e a disrupções provocadas pelas actividades humanas.

Para reduzir a dependência do factor climático na vida humana, há que estabelecer uma coordenação entre a produção, o uso dos recursos naturais e o comportamento do clima, de que aqueles dependem de forma tão crítica. Torna-se, por isso, essencial adquirir um conhecimento muito mais profundo da dinâmica do clima e das suas variações. Só este conhecimento tornará possível avaliar, de uma forma racional, a resposta às variações do clima, incluindo mesmo as que são devidas ao impacte do homem sobre o ambiente.

Estas considerações sobre as consequências e as implicações das mudanças do clima sobre o homem e sobre o ambiente estão

sintetizadas num documento histórico, que constitui a *Declaração da Conferência Mundial do Clima*, Genebra, 1979, quando se diz: «O clima do mundo tem variado lentamente durante os últimos milénios, séculos e decénios e continuará a variar no futuro. A humanidade aproveita o clima favorável, mas também é vulnerável às suas mudanças e variações quando se produzem fenómenos extremos, tais como secas e inundações. A alimentação, a água, a energia, a habitação e a saúde, são todas elas aspectos da vida humana, que dependem de forma crítica do clima».

### 3 — O CLIMA E A ALIMENTAÇÃO

#### 3.1 — O clima e a agricultura

As boas ou as más colheitas são fruto das condições climáticas, em particular da precipitação, da temperatura do ar e da insolação e sobretudo da sua distribuição no decurso do ano. A agricultura e a pecuária são actividades delicadas e muito susceptíveis de se deteriorarem com as variações do clima. Como dependemos da produção de alimentos, temos que proteger a agricultura e a pecuária contra as variações do clima e aprender a maximizar a produtividade agrícola, mesmo em condições adversas.

As variedades das culturas devem adaptar-se às condições climatológicas e à natureza dos solos. Todos sabemos que os solos das regiões tropicais, por exemplo, são pobres em nutrientes. E o emprego maciço de fertilizantes não resolve o problema, porque os solos são «lavados» muito rapidamente. Nos trópicos faz-se uma agricultura em que predomina a produção de carboidratos e faltam as proteínas. Os produtos agrícolas são pobres em valor alimentício, mas ricos em alcalóides. No entanto, não é fácil modificar este tipo de agricultura, nem se podem ignorar as práticas agrícolas tradicionais, como as queimadas e a rotatividade do emprego dos solos.

A cultura dos cereais, por exemplo, exige, como sabemos,

condições específicas em temperatura e em água. Basta comparar as condições em que se fazem as culturas do trigo, do milho e do arroz. Por exemplo, a cultura do arroz exige um clima de monção: abundância de precipitação associada a temperaturas elevadas, ao contrário da cultura do trigo. Entretanto, a melhoria das sementes, a racionalização do emprego dos fertilizantes, o aperfeiçoamento das variedades do trigo e do milho, associadas a um planeamento racional das práticas agrícolas, em relação às condições climáticas, levaram a um aumento considerável da produção de alimentos. Diremos hoje que estes factores levaram à *revolução verde*. Já pensámos na calamidade que seria para a humanidade um ano de seca nos Estados Unidos e no Canadá que constituem a «cintura verde» e um dos grandes celeiros do mundo? Já pensámos o que sucederia com um Verão muito chuvoso e com grande nebulosidade? Basta notar que um aumento de 1°C na temperatura média combinado com um decréscimo de 10% da precipitação podem reduzir de 20% a produção do milho e do trigo nas grandes regiões produtoras do Mundo.

Em trabalho anterior (Peixoto 1984) referimos que as variações clima no decurso dos tempos históricos tiveram influência decisiva nas práticas agrícolas e no tipo das culturas, tal como aconteceu com a cultura da vinha em Inglaterra, que praticamente desapareceu a partir da Alta Idade Média.

A produção agrícola mundial depende, de forma crítica, dos factores locais e regionais do clima, tais como a temperatura, a quantidade de precipitação e sua distribuição ao longo do ano, a humidade do ar e a disponibilidade em água. As inter-relações entre a temperatura, a precipitação e a fertilidade do solo, a nebulosidade e outros factores, são extremamente complexas. Todavia, aceitamos que uma variação do clima pode ter implicações importantes na produção de alimentos.

É evidente que condições meteorológicas severas têm um impacte directo, imediato e drástico nas culturas (tempestades, aguaceiros de granizo, geadas precoces ou tardias, etc.) As secas sazonais e as vagas de calor, que acompanham as flutuações do clima, têm implicações imediatas no ano agrícola. Mas as anomalias persistentes, que correspondem a variações do clima, podem ainda ter consequências mais catastróficas para a produção de alimentos.

Parece que, devido a um possível efeito do dióxido de carbono, as zonas climáticas, que agora constituem as regiões produtivas agrícolas, poderão deslocar-se mais para as regiões polares, acompanhando as variações da temperatura e da precipitação. Como as variações da precipitação mais decisivas para a produção de alimentos não virão a ser sistemáticas e uniformes, o potencial agrícola numas áreas poderá aumentar e noutras diminuir. As geadas deverão diminuir nas regiões de latitudes mais elevadas.

O aumento de temperatura devido ao acréscimo do dióxido de carbono poderá também incrementar a produtividade de regiões, hoje menos utilizáveis. Parece, portanto, que a influência do aumento do dióxido de carbono na agricultura não é muito bem definida, mas conduzirá, pelo menos, a uma mudança geográfica das grandes regiões agrícolas do globo.

### **3.2 — O clima e as pescas. A oscilação do hemisfério Sul e o fenómeno «El Niño»**

Numa escala de anos até decênios há, pelo menos, uma oscilação do clima bem estabelecida que é a Oscilação do Hemisfério Sul, (Southern Oscillation), descoberta, na década de 1930, por Sir Gilbert Walker. Esta oscilação está associada às grandes deslocações na região tropical no sentido leste-oeste da massa da atmosfera, entre os oceanos Índico e Pacífico Ocidental, por um lado, e o Pacífico Leste, por outro.

Esta oscilação torna-se evidente quando se faz, por exemplo, a diferença dos valores médios da pressão atmosférica entre as ilhas da Páscoa (27,5°, 109°W) e Darwin, Austrália (12°S, 107°E). As flutuações são variáveis, mas apresentam um período significativo de aproximadamente 38 meses.

Além da pressão atmosférica, muitos outros parâmetros climáticos apresentam, na atmosfera tropical, flutuações com períodos equivalentes. É o que se passa com a oscilação regular, anual, da intensidade dos ventos alisados e que resultam das flutuações das circulações médias meridionais de Hadley, nas regiões tropicais. A Oscilação do Hemisfério Sul está relacionada com as temperaturas das águas superficiais dos oceanos e com as

correntes marítimas no oceano Pacífico equatorial. Esta oscilação desempenha um papel crucial nas condições metereológicas da região subequatorial do hemisfério Sul. Enquadra-se num fenómeno regional muito intenso, que se observa ao longo das Costas do Perú e do Equador, o tão falado «El Niño».

É um fenómeno de grande amplitude em que as variações do clima modificam radicalmente o volume das pescas. É uma anomalia importante que se manifesta, quase periodicamente, no Pacífico, ao largo da parte norte da Costa da América do Sul. Nesta região as águas são habitualmente frias devido à ressurgência («upwelling») de águas mais profundas, ricas em nutrientes, o que permite a existência duma vida marinha prolífica e abundante. Constituem, por isso, bancos de pesca fundamentais de várias espécies, em que se destacam pela sua importância as anchovas. Com uma periodicidade aproximada de cinco anos, por altura do Natal, aparece uma corrente quente — «El Niño» (O Menino de Jesus) — que substitui as águas frias da corrente do Perú e reduz dramaticamente os volumes das pescas. Em 1972/73 «El Niño» provocou uma queda brusca na captura das anchovas, reduzindo-a a um sexto do normal. As consequências para o Perú foram, pode dizer-se, catastróficas.

«El Niño» pode ser a chave da explicação da interacção que transmite o sinal da Oscilação Sul dos oceanos para a atmosfera. Esta interacção, oceano-atmosfera, manifesta-se por um aumento da convecção e da precipitação sobre as águas sobreaquecidas na região leste do Pacífico equatorial. A ocorrência de água com temperaturas elevadas está, por seu turno, associada ao enfraquecimento da corrente fria do Perú. Por outro lado, as regiões dos oceanos «meteorologicamente desérticas», que constituem os grandes anticiclones do oceano Pacífico, recebem excepcionalmente uma precipitação abundante e torrencial, enquanto ocorre o fenómeno «El Niño». Ao mesmo tempo, verifica-se um aumento da pressão sobre a Índia, oceano Índico, Austrália e Indonésia, onde podem até ocorrer secas devido à forte subsidência.

Trata-se dum fenómeno de interacção muito complexo, entre os oceanos e a atmosfera e, dado o forte acoplamento entre os oceanos e a atmosfera, é muito difícil discernir entre causa e efeito. As observações mostram que as diferenças de temperatu-

ra na atmosfera entre os períodos de «El Niño» (quente) e normal (frio) estão fortemente correlacionadas com o aumento de temperatura que ocorre na atmosfera superior das latitudes equatoriais e não junto à superfície. Este sobreaquecimento pode ser devido à forte convecção desencadeada e à libertação do calor latente, que acompanha a condensação.

Existe uma descrição razoável da sequência dos acontecimentos que acompanham a anomalia «El Niño», (Oscilação Sul), mas não se sabe ainda o que desencadeia todo o processo ao fim de 3 ou 5 anos. Será devido ao armazenamento de energia da radiação solar absorvida nos anos normais e que, gerando energia potencial disponível nos oceanos, vai originar uma situação de instabilidade, com uma redistribuição das massas de água quente dos oceanos e a consequente transferência de calor para a atmosfera? Ou será exactamente o oposto?

Na primeira hipótese, um eventual aquecimento da camada superior dos oceanos seria acompanhado por um aumento da temperatura da atmosfera, e reciprocamente. Esta variação da temperatura das águas dos oceanos poderia modificar a produtividade da fauna marinha, através, por exemplo, da taxa da variação da ressurgência de águas mais frias de profundidade («upwelling»). Por outro lado, um aquecimento significativo da atmosfera poderá ter efeitos substanciais sobre a extensão e a localização dos bancos de pesca, em face das diferentes respostas dos vários ecossistemas marinhos às variações da temperatura.

É interessante acentuar que o fenómeno «El Niño» Oscilação Sul (ENSO) foi particularmente forte em 1982/83 e que o retorno às condições normais, no Pacífico Leste, se começou a verificar no Verão. Uma vez restabelecidas as condições de «El Niño», parece que se podem fazer pelas teleconecções que desencadeia previsões climáticas, a 6 meses de prazo, nas regiões temperadas.

## 4 — O CLIMA E ENERGIA

### 4.1 — Aspectos gerais

A interação entre o clima e a conversão de energia é uma faca de dois gumes, porque ocorre nos dois sentidos. De facto, as condições climáticas influenciam a produção, o consumo e a procura de energia e, por outro lado, os subprodutos da conversão de energia podem influenciar o clima. Temos, portanto, que tomar em linha de conta o impacte dos vários sistemas de produção e de consumo de energia sobre o clima, dada a aceitação generalizada das potencialidades que têm em interferir com o ambiente e em alterar o clima.

Fundamentalmente, há três vias através das quais a conversão da energia pode influenciar o clima. Em primeiro lugar destacaremos o calor libertado pelas grandes centrais de energia, para a atmosfera. Depois, temos que considerar os gases, as partículas e os produtos químicos lançados para a atmosfera, que podem afectar a constituição e a turvação da atmosfera, aumentar a nebulosidade e alterar o balanço da radiação. Finalmente, devemos considerar as alterações das condições fronteira, através das modificações do albedo, da rugosidade, da humidade do solo, ou da temperatura da superfície dos oceanos.

Os impactes sobre o ambiente, que decorrem dos mecanismos e dos processos de transformação e de utilização de energia, podem ser locais, regionais ou, mesmo, globais. Todos sabemos que se formam nuvens sobre as grandes centrais térmicas e que, em escala regional, se verifica um aumento da precipitação, a jusante dos grandes complexos urbano-industriais. O lançamento de gases, designadamente do dióxido de enxofre e do dióxido de carbono na atmosfera, pode originar modificações regionais ou globais, como já indicámos.

Podemos ainda referir os efeitos de segunda ordem na exploração dos recursos naturais e na conversão da energia, tais como o derrame de petróleo nos oceanos, que, além das consequências ecológicas, altera o albedo da superfície dos mares e, portanto, a sua temperatura, o escavamento das terras para abertura de minas, etc.

O consumo actual de energia é da ordem de  $8 \times 10^{12}$  Wano/ano. A distribuição geográfica do consumo é, porém, muito desigual. Basta notar que 75% da população do mundo tem um consumo «per capita» apenas de cerca de 2 kW. As grandes fontes capazes de satisfazer as necessidades e a procura global da energia são os combustíveis fósseis, a energia nuclear e a energia solar.

As grandes centrais de energia são alimentadas e mantidas por combustíveis fósseis. A «lenha» continua, no entanto, a representar uma fracção apreciável das fontes de energia nos países menos desenvolvidos. Os combustíveis fósseis convencionais (carvão, petróleo, gás natural) continuarão a ter um papel importante na transição das fontes de energia convencionais para possíveis fontes de energia renovável (energia solar, eólica, etc.) É evidente que as formas de energia renováveis têm um impacto muito menor sobre o ambiente e os seus efeitos sobre o clima são de carácter local.

A procura da energia está sempre a crescer, devido ao aumento da população do mundo, ao desenvolvimento económico, ao progresso tecnológico e, em certa medida, à mudança do estilo de vida. A procura global da energia dentro de 50 anos será possivelmente 3 a 5 vezes superior à procura actual. No entanto, as medidas de conservação de energia e a mudança do estilo de vida em países desenvolvidos poderão reduzir relativamente aquela procura.

Vejam agora os impactes imediatos do clima na procura da energia. É evidente que Invernos frios e prolongados demandam uma maior procura de energia, o que, muitas vezes, provoca dificuldades de abastecimento ou, mesmo, a sua escassez. Todos sabemos a incidência que estas faltas podem ter no funcionamento normal de escolas, de fábricas, de oficinas, etc., e no conforto humano. A congelação da água nas albufeiras, em Invernos frios, ou as secas prolongadas, em fases de grande estiagem, podem afectar a produção de energia hidroeléctrica, de forma decisiva.

A selecção dos locais para a instalação das grandes centrais de energia requer uma informação muito cuidada do clima, do local e da região. Tem que se tomar em consideração, além da exposição e da disponibilidade em água, a temperatura, a preci-



pitação, a distribuição dos ventos dominantes, a frequência e o tipo de inversões de temperatura. É que todos estes elementos do clima têm uma grande influência na dispersão dos poluentes, que sempre se originam na conversão de energia.

A informação climática é ainda mais importante ou mesmo decisiva, no caso das energias renováveis. É a informação climatológica e hidrológica que define as áreas possíveis de exploração de energia disponível (radiação solar, ventos, etc.). A intensidade da radiação solar directa e difusa depende da latitude, da altura do ano, da exposição ao Sol, da nebulosidade, do revestimento do solo, do albedo, etc. A energia eólica requer, para um aproveitamento adequado, o conhecimento das características da distribuição do campo vectorial do vento, em cada local, no decurso do ano.

#### **4.2 — Energia e poluição: dióxido de carbono e óxidos de enxofre**

Devido à forte correlação entre o aumento de dióxido de carbono na atmosfera e o consumo de combustíveis fósseis, parece importante analisar os efeitos quantitativos do aumento da concentração de dióxido de carbono, em vários cenários possíveis das fontes de energia. A concentração em dióxido de carbono na atmosfera, resultante de um consumo de combustíveis fósseis sem quaisquer restrições em qualidade e em quantidade, poderia vir a atingir níveis insuportáveis. A limitação desses níveis futuros impõe condicionalismos à utilização dos vários tipos de combustíveis na procura, sempre crescente, de novas formas de energia. No planeamento de quaisquer políticas de energia tem que atribuir-se uma alta prioridade ao problema do dióxido de carbono e às suas implicações meteorológicas, ambientais e ecológicas, para a determinação de estratégias futuras. Em 1980 a Academia Nacional das Ciências dos Estados Unidos, ao analisar o problema da energia, concluía assim: «Devemos reconhecer, agora, que aumentos no consumo da energia, utilizando combustíveis fósseis, terão efeitos climáticos crescentemente indesejáveis».

Em vista das dificuldades actuais com o petróleo e da inca-

pacidade das outras fontes de energia renováveis, ou não, satisfazerem as necessidades actuais ou num futuro próximo, parece que está reservado ao carvão e às areias betuminosas um papel importante. O carvão parece constituir o candidato mais provável para substituir o petróleo na Europa, por várias razões. Ao contrário das formas de energia renováveis, solar, eólica, geotérmica, etc., o carvão poderá vir a satisfazer os requisitos da energética da Europa, mesmo antes do fim deste século. Existem grandes reservas de carvão, distribuídas por toda a Europa, e os preços mantêm-se competitivos com os do petróleo. Há toda uma tecnologia e uma experiência, já adquiridas, para a exploração, para o transporte e para o tratamento do carvão. A sua utilização não é tão polémica como a da energia nuclear. Por fim, os problemas de ambiente, que a utilização do carvão pode vir a pôr, são, pelo menos, bem definidos e susceptíveis de serem atacados.

O consumo de carvão tende, portanto, a aumentar, principalmente na Europa, em face dos preços atingidos pelos combustíveis fósseis líquidos. Nas duas ou três décadas futuras, espera-se que esse aumento seja da ordem de 50%. O carvão contém sempre associado algum enxofre e derivados, o que com a sua combustão equivale a lançar na atmosfera uma quantidade considerável de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Assim, dos 57 milhões de toneladas lançados na atmosfera em 1982, estima-se que esse valor possa aumentar de 30% ou mais, atingindo 74 milhões de toneladas no ano 2000, se não forem tomadas medidas adequadas de prevenção e de controle das emissões. As emissões de  $SO_2$  apresentam-se dispersas por toda a Europa e por algumas regiões do continente Norte-Americano. Sem um programa de coordenação supranacional, bem pode dizer-se que nenhum país se poderá considerar incólume ou ecologicamente protegido, visto que os óxidos de enxofre podem ser transportados até grandes distâncias, antes de se verificar a sua deposição por via seca ou por precipitação. A deposição, num dado país, depende da distribuição das fontes de emissão em toda uma dada região e dos factores meteorológicos, que condicionam o seu transporte na atmosfera e a sua deposição no globo. Só na Inglaterra são lançadas 5 a 6 milhões de toneladas de  $SO_2$  na atmosfera o que faz do Reino Unido a maior fonte de poluição de toda a Europa.

Uma coisa é certa: as concentrações em dióxido de carbono e em óxidos de enxofre da atmosfera estão a aumentar. E qual é a perspectiva futura? Ora, a humanidade tem um apetite voraz para a energia e parece insaciável na sua sofreguidão. E nem sequer se tem dado conta do grande ensaio experimental que, inadvertidamente, estamos a realizar com o consumo intensivo de combustível. É uma fogueira, em escala global, que está constantemente a arder e sem se ver! E ainda que os efeitos não sejam do nosso agrado e muito menos benéficos, não se vê uma via fácil de se inverter, de forma rápida e decisiva, o curso dos acontecimentos. A compreensão do que se está a passar é, por vezes, difícil de atingir. No entanto, não há dúvida que a prudência impõe um esforço no sentido de conter tais taxas de crescimento. Este esforço de cooperação e de colaboração tem que ser tomado a nível internacional. E, na análise desta cooperação, devem ter-se presentes as assimetrias actuais do consumo de energia e as necessidades futuras dos países menos desenvolvidos.

## 5 — A DESERTIFICAÇÃO: UM PROBLEMA UNIVERSAL

No volume I desta colecção (*O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima*, cap. IV) apresentámos uma classificação do clima, com base no valor médio da quantidade de precipitação R. Aí definimos o clima *desértico* ( $R < 125$  mm), *árido* (R entre 125 mm e 250 mm) e *semiárido* (R entre 250 mm e 500 mm), *moderadamente chuvoso* (R entre 500 mm e 1000 mm), *chuvoso* (R entre 1000 mm e 2000 mm) e *excessivamente chuvoso* ( $R > 2000$  mm).

As regiões quentes e secas cobrem mais de um terço da superfície dos continentes da Terra. Estas regiões compreendem uma grande diversidade de zonas ecológicas. Vão das regiões desérticas das latitudes subtropicais até às regiões polares.

Com base em dados climáticos, aproximadamente 36,3% da área é desértica e árida, ou semiárida. No entanto, estudos baseados na vegetação e nos tipos de solos indicam uma área da ordem de 43%. Admite-se que a diferença 6,7% é devida à desertificação provocada pela acção do homem.

Os desertos estão a aumentar constantemente; e uma vez que se verifique a invasão das areias a recuperação dos solos só se faz à custa de preços muito elevados. Estimativas regionais revelam uma expansão dos desertos e uma degradação das terras semiáridas. A desertificação constitui um dos problemas grandes que a humidade tem que enfrentar. O avanço do Sára para sul é um facto aceite. Mas não podemos esquecer a desertificação da costa Sul do mar Merditerrâneo que tem vindo a verificar-se de forma assustadora. No *volume I*, já citado, vimos como o clima tem variado nessas regiões (Líbia, Tunísia, Argélia, Marrocos) que foram um dos celeiros do Império Romano. O deserto de Thar na parte oeste e o deserto de Rajasthan são hoje desolados quando há uns milhares de anos eram regiões férteis.

Séculos de sobrepastorícia, cortes de florestas, fogos, sobre uso da terra originam vastas regiões de solos estéreis, quase desérticas na região do Médio Oriente, que vai de Israel até ao Afeganistão, áreas que foram moderadamente cobertas por vegetação.

A calamidade do Sahel (em árabe quer dizer fronteiras) veio trazer à superfície não só o efeito do clima, que se traduziu por quase ausência de precipitação e por secas sucessivas, como também os efeitos da sobrepastorícia do uso e abuso desmedido da terra e da superpopulação de rebanhos que conduziram à ruptura do equilíbrio ecológico com a quase destruição da vegetação e ao dessondamento dos solos com a consequente erosão.

A desertificação tão evidente nas bordas do Sara constitui um problema à escala mundial. De facto, verifica-se a desertificação noutras regiões da África, da Ásia, do Médio Oriente, da América do Sul, da América do Norte, da Austrália, etc.

A água é a fonte da vida do deserto e uma variação, a longo prazo, da quantidade de precipitação pode alterar profundamente as características ecológicas duma região. Quando se verifica que os desertos estão a avançar, podia perguntar-se se está em curso uma variação do clima. Ora, os nossos conhecimentos sobre as causas das variações do clima e sobre a evolução histórica das condições meteorológicas na maioria dos desertos são muito limitados para nos permitirem concluir, de forma inequívoca, qual o papel do clima no avanço dos desertos.

As variações do clima para grandes períodos de tempo não

são difíceis de constatar. Como referimos no vol. I, já citado, (cap. I) não há dúvida de que há 4000 anos florescia uma civilização no rio Indus num clima muito mais húmido do que aquele que hoje se observa na região do Paquistão.

Parece, no entanto, que o mau uso da terra conduz à erosão dos solos e ao lançamento na atmosfera de grandes quantidades de poeiras, como se verifica no noroeste da Índia e no Paquistão Oriental em que constituem como que uma cortina acastanhada sempre presente. Este aumento de núcleos de condensação pode levar à pulverização e à uniformidade das gotículas da água das nuvens o que, em última análise, leva a uma diminuição de precipitação. O aumento de núcleos de condensação pode ainda ser devido aos fogos e às práticas das queimadas.

Quaisquer que sejam os resultados da investigação do clima, uma lição já aprendemos: as secas são inevitáveis e constituem um dos aspectos que caracteriza um ambiente árido. Resultam em grande parte de variação da circulação geral da atmosfera, que pode levar as superfícies frontais polares das latitudes médias ou a zona intertropical de convergência para latitudes menos frequentes. O mesmo se dá com os grandes anticiclones subtropicais que podem eventualmente ocupar posições «anómalas».

Desde 1940 que se tem vindo a observar um arrefecimento global da atmosfera e prevê-se uma certa instabilidade no clima nas próximas décadas. Essa instabilidade pode traduzir-se por uma maior frequência de secas nas regiões áridas ou por irregularidade nas monções que, de facto, são condicionadas pelo deslocamento para norte e para sul da *Zona Intertropical de Convergência*.

As populações das regiões áridas devem estar preparadas para enfrentar estas calamidades e não para alargar desmedidamente a agricultura, aumentar os rebanhos em anos da precipitação favorável.

A prática, que se tem vindo a utilizar nalguns países das regiões áridas, de fazer uma «agricultura industrializada» de produtos para exportação, em busca de divisas, deve ser contemplada com prudência. Temos que ter presente a experiência das populações nómadas. Estas, isoladas dos circuitos económicos e da circulação fiduciária, recorrem ao «capital» zootécnico consti-

tuído por rebanhos que lhes dão o leite, carne e dinheiro para as necessidades mínimas. Aprenderam a viver no deserto sem destruir animais, vegetação e culturas, que têm revelado a capacidade de sobreviver em condições ambientais extremamente adversas. E têm sabido manter historicamente um certo equilíbrio ecológico. Os nómadas são quase sempre apresentados como se fossem bandos que se movem sem destino no deserto. E não é assim: os movimentos nomádicos estão quase sempre ligados ao ritmo sazonal do clima e ao ciclo vegetativo das plantas; são orientados no sentido de alimentação adequada para os rebanhos no decurso do ano e permitir a recuperação das terras de pastagens que largaram. Mantêm os rebanhos em dimensões razoáveis, porque sabem por experiência (e nós pela Termodinâmica e pela Fisiologia) que da alimentação consumida por um animal, metade, aproximadamente, é consumida na energia para a reprodução e, finalmente, um quarto para a produção de leite, de reservas de proteínas e de gorduras (carne). Qualquer redução forçada nas pastagens vai reflectir-se imediatamente nas duas últimas funções.

As últimas secas da África, ao longo de todo o Sahel, com o cortejo de desolação e de miséria ficarão como um acontecimento maior na história da humanidade e que nos chama a atenção para a fragilidade ecológica e para a necessidade de não romper o balanço delicado que só pode levar à desertificação. Acresce ainda que as regiões áridas e semiáridas são, por vezes, pasto de pragas de insectos (v. g. gafanhotos) que com uma voragem assustadora destroem regiões extensas de vegetação, diminuindo consideravelmente por um lado as reservas alimentares das populações e dos rebanhos e, por outro, expondo solos que assim ficam a descoberto.

Desastres nas regiões áridas e desérticas não constituem nada de novo; as secas sempre constituíram uma das grandes pragas destas regiões como «José do Egipto reconheceu ao avisar o Faraó para armazenar o grão nos anos de fartura para se utilizar nos anos de falta.»

**VI — CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
CLIMA E AMBIENTE**

## 1 — PROBLEMÁTICA DA POLUIÇÃO E O AMBIENTE

A problemática da poluição enquadra-se no macroquadro da interacção da ciência e da tecnologia com o ambiente e, portanto, com a qualidade da vida e insere-se na necessidade geral da preservação do meio ambiente.

Com o aumento da população mundial e à medida que a industrialização se intensificou e o progresso económico se acentuou, a poluição do meio ambiente passou a constituir um problema cada vez mais preocupante, transformando-se num dos grandes desafios à sociedade. O nível da poluição tem implicações em vários sectores da actividade humana, porque tem repercussões de natureza biológica, ecológica, económica, social, moral e mesmo estética. Por isso, o controle da poluição requer a participação de cientistas e técnicos de muitas disciplinas, designadamente a meteorologia, a física, a química, a medicina, a economia, a engenharia, a biologia, etc.

A problemática da poluição deve encarar-se em função do crescimento da população; do desenvolvimento da Ciência e da sua aplicação sob a forma de tecnologia na produção industrial e nas actividades socioeconómicas; e, finalmente, do grau de prioridade quando os efeitos de primeira ordem da tecnologia se contrapõem aos efeitos de segunda, de terceira, ou de ordem mais elevada (efeitos colaterais).

Na análise do processo histórico é costume tomarem-se os séculos XVII e XVIII como os séculos que marcaram o início da revolução científica e o século XIX como o século da revolução industrial e tecnológica. O aumento acelerado da população mundial nos últimos dois séculos só foi possível devido ao desenvolvimento científico e à difusão da tecnologia.

O aumento da população conduziu à multiplicação de bens e de serviços, com o uso crescente da tecnologia. Esta expansão



da tecnologia gerou, por sua vez, efeitos secundários que se traduzem pelo lançamento de «detritos», de «resíduos» ou de «poluentes», no meio ambiente, com todas as suas consequências.

Na fase inicial do processo tecnológico, a preocupação concentrava-se, apenas, nos efeitos de primeira ordem que se resumiam à produção de bens. Os efeitos de ordem superior com o desencadeamento da poluição e da deterioração do meio ambiente eram considerados apenas em escala local e tomados como o preço inevitável do progresso.

O desenvolvimento da tecnologia, a industrialização rápida das sociedades e os efeitos colaterais associados, lançaram para o ambiente materiais estranhos, alguns constituindo substâncias nocivas, originando aquilo que se designa por poluição do ambiente. Em certa medida, foi o advento da energia nuclear, com as explosões atômicas e a precipitação radioactiva na atmosfera que conduziu, de vez, à necessidade de atacar o problema da poluição atmosférica. Em princípio, a solução para evitar a poluição da atmosfera consistiria em evitar a emissão de substâncias poluentes. Ora, numa sociedade industrializada como a actual, esta solução nem sempre se apresenta de realização fácil nem mesmo, por vezes, é possível.

Neste contexto, tomaremos para definição de poluição atmosférica a introdução directa ou indirecta de matéria ou de energia na atmosfera, resultante da actividade do homem, a níveis de quantidade ou de intensidade muito mais elevados do que os que resultam de processos naturais, e que têm geralmente efeitos deletérios ou indesejáveis para o homem e destruidores para a vegetação, animais e propriedade.

Na fase actual do desenvolvimento tecnológico assiste-se a uma mudança profunda de atitude na escala de valores. Embora se considerem indispensáveis os frutos e os benefícios potenciais da inovação científica, que constituem os efeitos tecnológicos de primeira ordem, reconhece-se que é fundamental atender à eliminação e ao controle dos efeitos secundários. Só assim pode atingir-se um equilíbrio adequado entre os benefícios colhidos e os prejuízos inexoráveis provocados pelo desenvolvimento tecnológico. Espera-se que, usando as mesmas armas fundamentais da ciência e da técnica, seja possível minimizar e controlar os seus efeitos colaterais. Neste trabalho, abordaremos com mais

pormenor a poluição da atmosfera. Parece-nos, por isso, pertinente que apresentemos, ainda que a nível elementar, os fundamentos científicos em que assenta a análise do problema da poluição atmosférica. Na verdade, o estudo da poluição em escala local tem que basear-se só no conhecimento da dinâmica da meteorologia física e da camada limite da atmosfera. Em escala regional ou planetária, que caracteriza a poluição transfronteira, o estudo da poluição deve assentar na dinâmica da atmosfera à escala planetária.

A atmosfera apresenta variações de natureza química e física, mas a constituição e a composição de base não tem variado de forma substancial no decurso dos últimos milhões de anos.

No entanto, em termos objectivos e reais, a atmosfera deve ser encarada como um aerosol, em que a fase dispersante constitui a atmosfera «pura» e a fase dispersa é constituída por elementos estranhos que constituem os poluentes, que podem ser gases, líquidos ou sólidos. Os poluentes podem ter origem natural (v. g. as nuvens, as poeiras e cinzas de origem vulcânica, etc.) ou resultarem de actividades humanas (partículas, gases, fumos, etc.). Em sentido restrito, a poluição da atmosfera só diz respeito aos poluentes de origem humana (artificiais).

A poluição deve ser encarada como uma manifestação da 2.<sup>a</sup> Lei Fundamental da Termodinâmica, que é inexorável quando diz que a desordem deve aumentar na natureza ou que a entropia, que mede a desordem numa transformação natural, nunca diminui. A entropia é um índice de degradação da energia e uma medida daquela, que não pode ficar disponível numa transformação. O desperdício é, portanto, energia dissipada e uma manifestação da 2.<sup>a</sup> Lei Fundamental da Termodinâmica.

A energia disponível, também designada por *exergia*, é que de facto mede o recurso energético utilizável. A Segunda Lei afirma que *em todos os processos naturais a entropia aumenta e a exergia diminui*. E toda a poluição é fruto de um processo entrópico; todo o esforço se deve concentrar na necessidade de tornar o aumento inevitável da entropia o mínimo possível.

A crise do ambiente é uma crise da entropia. Ao contrário do que se passa com a energia a entropia pode ser gerada e criada. O aumento da entropia, que se verifica com as transformações de energia associadas à actividade do homem, conduz de

forma mais ou menos acentuada a uma depreciação do ambiente. É por isso que podemos dizer que a energia, a entropia e o ambiente estão indissolivelmente ligados entre si.

## 2 — O GRANDE DESAFIO DE HOJE E O FUTURO

Agora que nos apercebemos e começamos a compreender melhor a acção do homem sobre o ambiente e a sua influência sobre o clima, temos que reconsiderar a utilização da tecnologia, mas reconhecer que sem o conhecimento científico e investimentos tecnológicos os grandes problemas da sociedade moderna só poderão vir a aumentar e a agravar-se. A situação actual há-de ser encarada como uma fase com riscos mas positiva na evolução contínua da humanidade. Abandonar as fontes de capacidade e de vitalidade do homem que são a ciência e a tecnologia constituirá uma alternativa perigosa e insensata para o progresso e desenvolvimento da humanidade. Os que só vêem os pecados da tecnologia pecam também por soberba ou erram por ignorância. Falham por não reconhecerem que a situação se tornaria extremamente mais grave, se se detivesse a procura de novas soluções tecnológicas, para remediar os males da própria tecnologia. Os problemas técnicos que surgem são difíceis e levarão tempo a resolver. Por exemplo, quando se põe a alternativa de continuar a viver por uns tempos com as consequências da poluição ou abandonar já o transporte automóvel, a escolha é difícil e nem sequer se põe para a maioria da sociedade. Situações análogas se deparam em quase todos os domínios em que se enfrentam as dificuldades provenientes do uso generalizado e desregrado da tecnologia.

A grande ironia do dilema presente é que estas dificuldades são o preço dos sucessos obtidos. O paradoxo dos nossos tempos é que o progresso no domínio social e tecnológico, inicialmente concebido para a melhoria da qualidade de vida, venha agora a pôr problemas nunca previstos, e que constituem grandes desafios à sociedade moderna. Enquanto os benefícios da tecnologia se circunscreverem a um sector reduzido, não se criaram problemas sociais e de ambiente. Mas, a partir do momento que se verificou a generalização dos benefícios, os efeitos secun-

dários da tecnologia tornaram-se mais visíveis e quase insuportáveis. Ora tal expansão era inevitável. O grande desafio que se põe é transitar do estado actual para outras tecnologias, que evitem os efeitos prejudiciais e incontroláveis no futuro, porque seria difícil abandonar as vantagens adquiridas. Abrandar a ciência é anular a possibilidade de obter novos conhecimentos. E deter a inovação ou enfraquecer a nossa capacidade de inverter a situação actual não contribui para a solução do problema. É certo que a tecnologia, só por si, não constitui a resposta. Mas, sem o desenvolvimento tecnológico e a inovação, poucas serão as esperanças de obter respostas susceptíveis de dar solução ao problema com que nos deparamos.

A tecnologia não cria energia, apenas utiliza a energia disponível. A tecnologia é um transformador de energia sujeito portanto ao juízo supremo da ciência e da Segunda Lei Fundamental da Termodinâmica.

Não mantenhamos ilusões de que a tecnologia nos liberta da dependência do nosso meio ambiente. Nada mais ilusório. A vida não é uma manifestação dum sistema fechado.

O homem só sobrevive porque é capaz de localizar e processar energia disponível. Poluição e desperdício são afinal a energia dissipada que se vai acumulando como consequência do fluxo de energia na sociedade. Em termos de entropia, ao nível de vida mais elevado exige um maior fluxo de energia e portanto maior jeracção de entropia cuja taxa de crescimento teremos que saber controlar para garantir o futuro.

Energia, entropia e ambiente é uma trilogia inseparável. «Os custos externos» da tecnologia constituem uma manifestação da nossa falta de capacidade em reduzir e evitar as consequências da Segunda Lei Fundamental da Termodinâmica.

### 3 — EPÍLOGO: GLÓRIA, DESESPERO E ESPERANÇA

Muitos dos efeitos colaterais inesperados provenientes da aplicação da tecnologia, transformaram-se em grandes problemas ou mesmo em ameaças, porque não nos apercebemos das implicações duma lei exponencial de crescimento. Até há pouco, reagia-se ou não como vivêssemos num mundo linear; havia

muito tempo para corrigir, num futuro apropriado, os pequenos problemas que iam surgindo ou até se poderia, mesmo, desprezá-los. Ignorávamos a inexorabilidade da Lei da entropia...

A tecnologia e a ciência permitiram, nos últimos séculos, transpor barreiras naturais, consideradas insuperáveis, conduzindo a um aumento considerável do progresso industrial e a uma taxa de acréscimo sem precedentes da população da Terra. Todavia, tornou-se óbvio, nas últimas décadas, que se deviam encarar os lados negativos do progresso tecnológico e surgiu a preocupação sobre os perigos possíveis da utilização não controlada da tecnologia.

No decorrer da história do homem, o grande desafio que a natureza lhe punha era o de ele ser capaz de utilizar os recursos do ambiente natural e de se ajustar ao meio de forma a garantir a sua sobrevivência. Agora, porém, tudo mudou. Nos últimos três séculos o homem alargou tanto a fronteira do seu conhecimento, multiplicou de tal forma as forças sob o seu próprio controle, estendeu a eficiência das suas actividades a um nível tal, que o progresso material gerado pelo recurso à ciência e pela aplicação da tecnologia provocou mudanças no ambiente constituindo como que um desafio à própria natureza.

A avaliação da tecnologia deve ser feita através da análise do balanço de todas as consequências, directas e indirectas, e do impacte presente ou previsível duma inovação tecnológica na sociedade, no ambiente e na economia.

Depois de uma fase de glórias e de hossanas, chegou-se à conclusão que é a própria tecnologia que pode vir a perturbar os limites do crescimento, pela depleção rápida e descontrolada dos recursos naturais não renováveis e pelas suas consequências na deterioração do ambiente.

Os limites são impostos por leis naturais que não podemos ignorar e que temos que saber utilizar de forma sábia. Não se podem utilizar as armas poderosas da ciência e da tecnologia, sem estabelecer, em contrapartida, um programa científico de protecção ao ambiente. Com efeito, a tecnologia, que gerou uma produtividade notável e que contribuiu decisivamente para o conforto do homem, tem vindo a destruir o capital ambiental do ecossistema em que o homem é forçado a viver.

São estes aspectos negativos que têm levado certos sectores

a manifestar-se em atitudes de desconfiança pela ciência e pela tecnologia. Muitos dos receios assentam na suspeita de que algumas das dificuldades da sociedade provêm da aplicação desregrada da tecnologia que nem sempre teria sido utilizada por caminhos muito rectos. O antagonismo e a animosidade em face do papel do cientista na sociedade assume, às vezes, aspectos estranhos e difíceis de aceitar, tendo-se chegado mesmo a propor-se por alguns sectores mais radicais que se limitasse a investigação científica e que se incentivasse o desenvolvimento tecnológico. Em nome duma falsa concepção, aparentemente puritana, da conservação do ambiente, denunciava-se a ciência como o falso Deus dos nossos tempos. A contínua utilização da ciência diziam conduziria inexoravelmente à desumanização da sociedade e, mesmo, à sua destruição. Esta desconfiança assenta na convicção de que no futuro se manterá a mesma actuação «perniciosa» do passado.

O futuro que assim se nos ofereceria, por extrapolação do passado, conduziria a uma visão apocalíptica de um Juízo Final.

É importante e salutar saber escutar críticas, analisá-las e compreendê-las, porque é um processo eficiente de aprender, corrigir e melhorar. Mas, temos que ter esperança na capacidade do homem em modificar o seu comportamento com prestreza suficiente para evitar os desastres catastróficos pelos «arautos de maus presságios».

Outros sectores menos extremistas, exprimem as suas preocupações de forma mais pragmática e moderada. Sugerem que se detenha o apoio à tecnologia e que se moderem os esforços na investigação científica, até que se resolvam os problemas da poluição e de outras pragas que afligem a sociedade e se eliminem os perigos inerentes a uma rápida utilização dos recursos naturais.

Ora, sejamos claros e inequívocos. Não se pode alterar de forma imediata a maneira como o homem tem explorado e se tornou dependente do seu ambiente. E pensar que é possível introduzir correcções e melhorar o ambiente abandonando o conhecimento científico e rejeitando a técnica seria simplesmente desastroso. Sem o recurso à ciência e sem investimentos tecnológicos sensatos, agora e no futuro, os problemas do ambiente só poderão vir a aumentar e agravar-se. Muitos dos problemas com

que agora nos deparamos, se é que vão ser resolvidos, necessitam de recorrer à inovação e à tecnologia, mas de uma tecnologia relevante e adequada, concebida, desde logo, para aceitar que a própria tecnologia pode criar problemas que têm que resolver-se. Todavia, temos que reconhecer também que só o recurso à ciência e à tecnologia não chega. Necessitamos de forma crítica de considerar outros factores que envolvem o larguíssimo espectro de interesses nos domínios das humanidades e das ciências sociais. Em especial, tem que se desenvolver a capacidade de estimar racionalmente os impactes sobre o ambiente e de seleccionar criteriosamente, entre as várias opções possíveis as tecnologias novas, antes de se tomarem quaisquer decisões. E, acima de tudo, devemos ter a humildade para admitir que nem sempre será fácil, ou mesmo possível, encontrar respostas absolutas ou soluções permanentes e definitivas. Temos que estar cientes das ameaças que se põem na qualidade de vida e alertados para os perigos provenientes do uso descuidado das novas tecnologias.

É esta competição entre os benefícios da tecnologia e os seus custos ambientais que nós temos que encarar.

Durante muito tempo, não se reconheceu a necessidade de encarar ou mesmo de reconhecer a existência dos efeitos secundários da tecnologia. Agora que tal necessidade não oferece dúvida corre-se o risco, em muitas circunstâncias, de uma sobre reacção. De facto, de momento, os nossos esforços assumem todos os aspectos dum sistema de retroacção («feed back») concebido de forma imperfeita e projectado pobremente. À fase de hossanas e de glórias dos progressos técnico-científicos seguiu-se uma fase de descrença e desespero, pelo uso destemperado da tecnologia a que nós agora contrapomos uma fase de equilíbrio e de esperança na capacidade do homem e na sua grande arma que é a ciência para resolver os problemas postos pela própria tecnologia.

Entretanto, aprendemos uma lição: não se pode actuar agora e contabilizar no futuro, aplicando às cegas e caprichosamente a tecnologia, sem que se incorra em sérias dificuldades. Compreendemos, afinal, que temos a capacidade de interferir com o ambiente de forma inadvertida ou deliberada, numa escala tal, que podemos mesmo pôr em causa a nossa próxima existência. Ainda que a sociedade tenha vindo a aprender a lidar com tais



problemas, há, no entanto, que incentivar e acelerar o desenvolvimento e a aplicação de medidas adequadas. E não é tarefa fácil. Requer o esforço conjunto de muitos estudiosos de várias disciplinas. Envolve, digamos assim, uma polarização de esforços no processo global. E o seu êxito requer uma compreensão muito mais profunda por parte do grande público da natureza da ciência e da tecnologia e das relações do seu impacto na evolução social.

Ainda que se tenha vindo a actuar neste sentido, graças ao esforço esclarecido de alguns, o que é certo, porém, é que só agora as instituições (Universidades, Governo, etc.) e o grande público começaram a aperceber-se da existência real de tais perigos. Só recentemente, se começou a desencadear um processo de recuperação do ambiente e a esclarecer legislação atinente para a reparação de alguns efeitos e para a prevenção de males futuros

As nossas interrogações e apreensões, infelizmente, de momento excedem a nossa compreensão e a nossa capacidade em gerir os processos que se desencadeiam no ambiente. Na verdade, estamos em face dum desafio que nos é posto pela necessidade de saber como hão-de usar-se as nossas possibilidades tecnológicas e sociais, na utilização e na perservação dos recursos naturais duma forma construtiva e responsável, sem, ao mesmo tempo, deixar de fomentar o progresso e aumentar as nossas possibilidades técnicas.

Há trinta anos Vanevar Bush, Presidente do Massachusetts Institute of Technology e Conselheiro Científico do Presidente dos Estados Unidos, chamou à Ciência «a grande fronteira sem fim». E assim se mantém hoje! A amplitude e a vastidão da investigação presente excedem tudo o que o Dr. Bush poderia imaginar, quando há quatro décadas formulou esta afirmação. A astrofísica e a rádio-astronomia vieram mostrar que o universo vasto em que estamos imersos é muito mais complexo, dinâmico e interessante do que se poderia suspeitar, há quatro décadas. A biologia ataca o problema fundamental da base da vida. A física penetrou mais na essência da matéria e da energia. As ciências da informação e de computação abriram áreas de estudo nunca então suspeitadas. Com estes e outros domínios de pujança sempre crescente, o homem tem um vastíssimo campo de investigação, em que a mente humana há-de encontrar emoção e beleza



para as gerações presentes e vindouras. No entanto, nós aprendemos que a aplicação do conhecimento científico para benefício da humanidade não é tão simples e linear como se esperava. As sociedades humanas, tais como a matéria, são mais complexas do que se supunha e cada intervenção contém, em potência, consequências que não são facilmente previsíveis.

Parece às vezes que um poderio maior não nos fez nem mais esclarecidos nem mais prudentes! Só uma compreensão mais profunda das sociedades humanas, combinada com o vigor crescente do progresso da ciência, nos poderá ajudar a alcançar um mundo melhor. E só nos resta uma escolha: não nos poderemos deter, mas antes, caminhar para um nível cada vez mais elevado de compreensão e de uma maior sensibilidade na utilização da ciência e da tecnologia, em proveito da humanidade. É que devemos ter presente a condição inexorável da natureza humana, que nos impõe obrigações já expressas no *Ecclesiastes*:

«Apliquei o meu espírito a um estudo atencioso e à observação sábia de todas as cousas que se observam debaixo dos Céus. É que Deus impôs ao homem este dever ingrato» (1:12).

Na ciência e na investigação, como em todos os aspectos da vida, há que estar preparado para alegrias e para agruras, sucessos e decepções, porque há sempre muito mais para aprender. Por isso, juntaremos agora à guisa de epílogo a mensagem de humildade e de esperança, tão bem expressa no *Ecclesiastes*:

«Porque na muita sabedoria há muita tristeza, todo aquele que aumenta a sua ciência aumenta a sua dôr». *Ecclesiastes*, (1:18).

## Bibliografia

- Causes of Climate* — John Lockwood, John Wiley & Sons, Nova Iorque — 1979.
- Climate History and the Modern World* — H. H. Lamb, Methuen, Londres e Nova York — 1982.
- Meteorologia Descritiva* — José Pinto Peixoto — Ed. do Instituto Geofísico D. Luís — Lisboa 1979-1980.
- A Radiação Solar e o Ambiente* — José Pinto Peixoto — Ed. da Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1980.
- O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima* — José Pinto Peixoto. Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1984 (no prelo).
- Mudanças do Clima e o Ambiente* — José Pinto Peixoto. Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1984.
- Climate Change* — John Gribbin. Cambridge Univ. Press. Londres, 1978.
- The Genesis Strategy: Climate and Global Survival* — S. H. Schneider, Plenum Press, Nova Iorque e Londres, 1976.