Tradução comentada do artigo "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" de Svante Arrhenius (1896)

Matheus Barbosa Rasch¹, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima¹ e Felipe T. Falciano $({\rm tradutor})^2$

¹Universidade Federal do Espírito Santo ²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Publicado em 1896 na *Philosophical Magazine and Journal of Science*, o artigo científico de Arrhenius é pioneiro no estudo quantitativo do efeito estufa, tema central na discussão sobre aquecimento global. Além de ser um registro histórico importante, é interessante notar que este trabalho contém uma metodologia que abriu caminho para os modelos climáticos atuais.

Abstract

Published in 1896 in the *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Arrhenius' scientific paper is a pioneer in the quantitative study of the greenhouse effect, a central theme in the discussion on global warming. As well as being an important historical record, it is interesting to note that this work contains a methodology that paved the way for today's climate models.

Palavras-chave: dióxido de carbono, aquecimento global, efeito estufa Keywords: carbon dioxide, global warming, greenhouse effect

DOI: 10.47456/Cad.Astro.v6n1.48125

1 Introdução

O artigo "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", publicado por Svante Arrhenius em 1896, ocupa um lugar de destaque no estudo sobre as mudanças climáticas, em particular, sobre o aquecimento global. Esse artigo foi pioneiro sobre o estudo quantitativo do efeito estufa, a partir do qual ele explorou a influência da concentração atmosférica de vapor d'água e, principalmente, dióxido de carbono ("carbonic acid", na terminologia da época) na temperatura da superfície terrestre. Svante Arrhenius (1859-1927) foi um cientista sueco cujas contribuições se estenderam por diversas áreas da ciência, incluindo a físico-química e a climatologia. Ele é amplamente reconhecido por seus estudos nas propriedades condutoras das soluções e estabeleceu a teoria da dissociação eletrolítica, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Química em

1903. Seus conhecimentos permitiram atuar em diversos segmentos da físico-química, incluindo aspectos sobre a velocidade das reações, descobrindo a relação do aumento da velocidade das reações químicas com a temperatura. Apesar do maior reconhecimento de Arrhenius ser em estudos ligados à eletroquímica, ele tem um papel de destaque em seus estudos pioneiros sobre o efeito estufa, que estabeleceram as bases da ciência climática moderna. Em um período em que o conhecimento sobre as variações climáticas estava fortemente vinculado a fatores geológicos e astronômicos, Arrhenius foi um dos primeiros a sugerir que a composição da atmosfera desempenhava um papel fundamental na regulação do clima. Sua pesquisa, realizada no final do século XIX, é considerada precursora do estudo moderno sobre o efeito estufa.

Em seu artigo, Arrhenius constrói, a partir

das visões apresentadas por outros autores, seu ponto de vista acerca da absorção da radiação proveniente do Sol pela atmosfera, apresentando inúmeros pontos que merecem destaque. Seus cálculos, realizados sem os recursos computacionais modernos, são impressionantes para a época e fornecem uma estimativa inicial do impacto do CO_2 na temperatura global. Ele baseou sua teoria em diferentes estudos anteriores, como o publicado por John Tyndall, que tinha demonstrado como certos gases tinham a capacidade de absorver calor. Porém, Arrhenius foi além e, pela primeira vez, quantificou o efeito do CO_2 sobre a temperatura da Terra.

Ao se basear no trabalho de Samuel Pierpont Langley sobre a temperatura da Lua, o ângulo de desvio que a radiação vinda da Lua sofre ao passar por um prisma de sal-gema (halita) foi utilizado por Arrhenius para classificar diferentes faixas do espectro. Estes dados foram, então, correlacionados à absorção desta radiação em função das concentrações tanto de CO_2 quanto de d'água, incluído em seus cálculos como outro gás importante na regulação da temperatura. Diante disto, o ápice de seu trabalho se dá em uma extensa (e meticulosamente elaborada) sequência de cálculos, em que conclusões puderam ser tiradas, como: a quantidade de CO₂ e d'água na atmosfera pode influenciar na temperatura global, bem como proporcionar diferentes períodos climáticos de nosso planeta.

Arrhenius considerou também em seus cálculos o caminho médio percorrido pela radiação através do ar, além da dependência da quantidade de CO_2 e vapor d'água presentes. Ele calculou como a temperatura da Terra mudaria se a concentração de CO₂ fosse reduzida ou aumentada e seus resultados indicaram que um aumento na concentração de CO₂ levaria a um aquecimento global, enquanto uma redução causaria um resfriamento. Nesse artigo, Arrhenius relacionou suas descobertas às eras glaciais e aos períodos interglaciais, sugerindo que variações na concentração de CO₂ poderiam explicar as mudanças climáticas observadas no registro geológico. Na visão de Arrhenius, durante os períodos glaciais, a concentração de CO₂ poderia ter sido significativamente menor, levando a um resfriamento global, enquanto durante os períodos de temperaturas amenas (interglaciais), o aumento do CO_2 teria contribuído para o aquecimento. Essa visão, que à época era especulativa, revelou-se acertada dentro do contexto moderno da paleoclimatologia.

Nota-se ao longo do texto como a terminologia científica utilizada reflete o conhecimento da época. A referência ao CO₂ como "ácido carbônico" (nomenclatura aceita na época, porém imprecisa atualmente) e a linguagem utilizada por Langley - e parcialmente adotada por Arrhenius - de atmosfera como "massas de ar", podem ser citadas como exemplo. Além de seu conteúdo científico, a forma como Arrhenius escreve também se destaca em comparação com os padrões atuais. Seu artigo é escrito em primeira pessoa - algo incomum nos artigos científicos modernos da área de ciências exatas, que frequentemente adotam um tom mais impessoal. Ainda, sua argumentação, estruturada de forma bastante lógica, com a apresentação de premissas e conclusões ao longo do texto, aproxima-se do estilo de um raciocínio lógico-científico, no qual premissas são estabelecidas e seguidas até suas conclusões. Isso reflete o pensamento metódico que guiava a filosofia natural, evidenciando como seu trabalho ainda se insere em um período próximo à transição da filosofia natural para a ciência moderna.

Vale observar: ao contrário dos artigos científicos modernos, que frequentemente priorizam objetividade e concisão, o texto de Arrhenius é detalhado em sua argumentação, conduzindo o leitor desde a apresentação do tema até a conclusão - sem deixar lacunas. Apesar de algumas limitações, como a superestimação do impacto do CO_2 e a falta de uma abordagem mais detalhada sobre o papel das correntes oceânicas e da circulação atmosférica na distribuição global de calor, o trabalho de Arrhenius continua sendo incrivelmente relevante. Nesse trabalho, por exemplo, Arrhenius indica, pela primeira vez, uma possível conexão entre as atividades humanas e mudanças climáticas futuras, contribuindo para a conscientização sobre as consequências do aumento das emissões de gases de efeito estufa.

Ao revisitar este artigo, temos não apenas um registro histórico valioso, mas também informações inovadoras que iniciaram o caminho para os modelos climáticos modernos, auxiliando a estabelecer questões que só seriam plenamente desenvolvidas no século XX e que hoje influenciam políticas ambientais globais e a luta contra as mudanças climáticas. Assim, o arquivo de Arrhenius permite compreender melhor como a investigação científica evolui, refinando conceitos e incorporando novas evidências ao longo do tempo.

Sobre os autores

Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima (maria.t.lima@ufes.br) é professora titular do Departamento de Química do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Ela possui graduação em Química Industrial, com mestrado e doutorado em Química Analítica Inorgânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Atualmente, é pesquisadora do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e professora permanente do Programa de Pós- Graduação em Química da UFES. É líder do grupo de pesquisa em Espectrometria Atômica, coordenando o Laboratório de Espectrometria Atômica (LEA). Sua linha de pesquisa concentra-se na determinação de elementos-traço em diversas matrizes utilizando diferentes técnicas analíticas relacionadas com a espectrometria atômica.

Matheus Barbosa Rasch é professor independente e criador de conteúdos educacionais. Desenvolve cursos on-line e materiais didáticos, com foco em aprofundamento teórico para estudantes. É mestre em Química pela Universidade Federal do Espírito Santo, onde também se graduou. Em diferentes projetos ao longo da graduação, adquiriu experiência na área de preparo de amostras e determinação de elementos-traço por espectrometria atômica, como com o "Monitoramento de potenciais impactos do rejeito de minério de ferro na praia e antepraia adjacentes da desembocadura do rio doce". Em seu projeto de mestrado propôs o uso de solventes eutéticos para o preparo de amostras poliméricas, com o projeto intitulado como "Utilização de solventes eutéticos profundos em resinas poliméricas quimicamente recicladas para determinação multielementar".

Felipe T. Falciano (ftovar@cbpf.br) foi o tradutor. É Doutor em Física (2008) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia (2017) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado a coordenação COSMO, e pesquisador do CNPq, atuando nas áreas de cosmologia e gravitação. Sobre a influência do ácido carbônico no ar na temperatura do solo 1

Svante Arrhenius

I. Introdução: Observações de Langley sobre absorção atmosférica

Muito já foi escrito sobre a influência da absorção da atmosfera no clima. Tyndail² em particular, apontou a enorme importância dessa questão. Para ele, foram principalmente as variações diurnas e anuais da temperatura que foram reduzidas por essa circunstância. Outro lado da questão, que há muito tempo atrai a atenção dos físicos, é o seguinte: A temperatura média do solo é de alguma forma influenciada pela presença de gases que absorvem calor na atmosfera? Fourier³ sustentou que a atmosfera age como o vidro de uma estufa, pois deixa passar os raios de luz do sol, mas retém os raios escuros do solo. Essa ideia foi elaborada por Pouillet⁴; e Langley foi levado a pensar, por algumas de suas pesquisas, que "a temperatura da Terra sob luz solar direta, mesmo que nossa atmosfera estivesse presente como agora, provavelmente cairia para -200° C, se essa atmosfera não possuísse a qualidade de absorção seletiva"⁵. Esse ponto de vista, que se baseava em um uso muito amplo da lei de resfriamento de Newton, deve ser abandonado, pois o próprio Langley, em um livro de memórias posterior, mostrou que a lua cheia, que certamente não possui nenhuma atmosfera sensível que absorva calor, tem uma "temperatura média efetiva" de cerca de $45^{\circ}C^{6}$.

 4 Comptes rendus, t. vii. p. 41 (1838)

O ar retém o calor (claro ou escuro) de duas maneiras diferentes. Por um lado, o calor sofre uma difusão seletiva em sua passagem pelo ar; por outro lado, alguns dos gases atmosféricos absorvem quantidades consideráveis de calor. Essas duas ações são muito diferentes. A difusão seletiva é extraordinariamente grande para os raios ultravioleta e diminui continuamente com o aumento do comprimento de onda da luz, de modo que é insensível para os raios que formam a parte principal da radiação de um corpo com a temperatura média da Terra.⁷

⁷Langley, 'Prof. Papers,' No. 15, p. 151. Tentei calcular uma fórmula para o valor da absorção devido à reflexão seletiva, conforme determinado por Langley. Entre as diferentes fórmulas examinadas, a seguinte é a que melhor concorda com os resultados experimentais:

$$\log a = b(1/\lambda) + c(1/\lambda)^3.$$

Determinei os coeficientes dessa fórmula com o auxílio do método dos mínimos quadrados e descobri que

$$b = -0.0463, \quad c = -0.008204$$

a representa a intensidade de um raio de comprimento de onda λ (expresso em μ) depois que ele entrou com a intensidade 1 e passou pela massa de ar 1. A estreita concordância com o experimento pode ser vista na tabela a seguir:

| λ | $a^{1/7.6} (\text{obs.})$ | $a^{1/7.6}$ (calc.) | Prob. error |
|------------|---------------------------|---------------------|-------------|
| 0.358μ | 0.904 | 0.911 | |
| 0.383 | 0.920 | 0.923 | 0.0047 |
| 0.416 | 0.935 | 0.934 | |
| 0.440 | 0.942 | 0.941 | |
| 0.468 | 0.950 | 0.947 | 0.0028 |
| 0.550 | 0.960 | 0.960 | |
| 0.615 | 0.968 | 0.967 | |
| 0.781 | 0.978 | 0.977 | |
| 0.870 | 0.982 | 0.980 | 0.0017 |
| 1.01 | 0.985 | 0.984 | |
| 1.20 | 0.987 | 0.937 | |
| 1.50 | 0.989 | 0.990 | 0.0011 |
| 2.59 | 0.990 | 0.993 | 0.0018 |

Para os raios ultravioleta, a absorção torna-se extremamente grande, de acordo com os fatos. Como se pode ver pelos erros prováveis que coloquei ao lado dos valores menos concordantes e também de um valor (1.50μ) , em que o erro provável é extremamente pequeno, as diferenças são apenas da magnitude que se poderia esperar em uma fórmula de ajuste exato. As curvas para a fórmula e para os valores experimentais se cortam em quatro pontos ($1/\lambda = 2.43$, 1.88, 1.28 e 0.82, respectivamente). A partir da fórmula, podemos estimar o valor da reflexão seletiva para as partes do espectro que prevalecem no calor da Lua e da Terra (ângulo de desvio = $38 - 36^{\circ}$, $\lambda = 104 - 24.4\mu$). Descobrimos que a absorção por essa causa varia entre

¹Título original: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. Publicado em: Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276, e foi extraído de um artigo apresentado para a Academia de Ciências Real Suéca em 11 de Dezembro de 1895. Traduzido por Felipe Tovar Falciano.

²'Heat a Mode of Motion,' 2nd ed. p. 405 (Lond., 1865).

³Mém. de l'Ac. R. d. Sci. de l'Inst. de France, t. vii. 1827.

⁵Langley, 'Professional Papers of the Signal Service,' No. 15. "Researches on Solar Heat,"p. 123 (Washington, 1884).

⁶Langley, "The Temperature of the Moon."Mem. of the National Academy of Sciences, vol. iv. 9th mem. p. 193 (1890).

A absorção seletiva da atmosfera é, de acordo com as pesquisas de Tyndall, Lecher e Pernter, Röntgen, Heine, Langley, Angström, Paschen e $outros^8$, de um tipo totalmente diferente. Ela não é exercida pela massa principal do ar, mas em alto grau pelo vapor aquoso e ácido carbônico, que estão presentes no ar em pequenas quantidades. Além disso, essa absorção não é contínua em todo o espectro, mas quase insensível na parte clara dele, e principalmente limitada à parte de ondas longas, onde se manifesta em bandas de absorção muito bem definidas, que caem rapidamente em ambos os lados ⁹. A influência dessa absorção é comparativamente pequena no calor do sol, mas deve ser de grande importância na transmissão de raios da Terra. Tyndall sustentou a opinião de que o vapor de água tem a maior influência, enquanto outros autores, como Lecher e Pernter, estão inclinados a pensar que o ácido carbônico desempenha o papel mais importante. As pesquisas de Paschen mostram que esses dois gases são muito eficazes, de modo que, provavelmente, às vezes um, às vezes o outro, pode ter o maior efeito, de acordo com as circunstâncias.

Para se ter uma ideia da intensidade com que a radiação da Terra (ou de qualquer outro corpo com temperatura de $+15^{\circ}$ C) é absorvida por quantidades de vapor d'água ou ácido carbônico nas proporções em que esses gases estão presentes em nossa atmosfera, deveríamos, a rigor, organizar experimentos sobre a absorção de calor de um corpo a 15° por meio de quantidades apropriadas de ambos os gases. Mas esses experimentos ainda não foram feitos e, como exigiriam um aparato muito caro além do que tenho à disposição, não tive condições de realizá-los. Felizmente, há outras pesquisas feitas por Langley em seu trabalho sobre "A Temperatura da Lua", com a ajuda das quais parece não ser impossível determinar a absorção de calor pelo vapor aquoso e pelo ácido carbônico exatamente nas condições que ocorrem em nossa atmosfera. Ele mediu a radiação da lua cheia (se a Lua não estivesse cheia, a correção necessária relativa a esse ponto era aplicada)

em diferentes alturas e estações do ano. Além disso, essa radiação foi dispersa em um espectro, de modo que em seu livro de memórias encontramos os números do calor radiante da Lua para 21 grupos diferentes de raios, que são definidos pelo ângulo de desvio com um prisma de rocha de sal com um ângulo de refração de 60 graus. Os grupos estão entre os ângulos 40° e 35°, e cada grupo está separado de seus vizinhos por um intervalo de 15 minutos. Agora, a temperatura da Lua é quase a mesma da Terra, e os raios lunares, ao chegarem aos instrumentos de medição, passaram por camadas de ácido carbônico e de vapor aquoso de diferentes espessuras, de acordo com a altura da Lua e a umidade do ar. Se, então, essas observações fossem totalmente comparáveis entre si, três delas seriam suficientes para calcular o coeficiente de absorção em relação ao vapor aquoso e ao ácido carbônico para qualquer um dos 21 grupos diferentes de raios. Mas, como uma inspeção das 24 séries diferentes de observações mostrará prontamente, esse não é o caso. A intensidade da radiação para qualquer grupo de raios deve sempre diminuir com o aumento da quantidade de vapor aquoso ou ácido carbônico atravessado. Agora, a quantidade de ácido carbônico é proporcional ao caminho do raio através da atmosfera, ou seja, à quantidade chamada "massa de ar" nas figuras de Langley. Portanto, como unidade para o ácido carbônico, tomamos a massa de ar = 1, ou seja, a quantidade de ácido carbônico que é atravessada no ar por um raio vertical. A quantidade de vapor aquoso atravessada é proporcional, em parte, à "massa de ar" e, em parte, à umidade, expressa em gramas de água por metro cúbico. Como unidade para o vapor aquoso, tomei a quantidade de vapor aquoso que é atravessada por um raio vertical, se o ar contiver 10 gramas por metro cúbico na superfície da Terra¹⁰. Se tabularmos as 24 séries de observações publicadas por Langley na obra citada com relação às quantidades de ácido carbônico e vapor aquoso, percebemos imediatamente que seus números são muito irregulares, de modo que muitas exceções à regra são encontradas de que o calor transmitido deve diminuir continuamente quando essas duas quantidades aumentam.

E parece que ocorreram alterações periódicas

^{0,5} e 1 p. c. para a massa de ar 1. Essa ação insensível, que é totalmente coberta pelos erros experimentais, foi negligenciada nos cálculos a seguir.

⁸Vide Winkelmann, Handbuch der Physik.

 $^{^{9}\}mathrm{Cf.},$ e. g., Trabert, Meteorologische Zeitschrift, Bd. ii, p. 238 (1894).

 $^{^{10}\}rm{Essa}$ unidade corresponde quase à unidade média do ar (consulte a Tabela 6 pág. 18)

com o tempo de observação em sua série. Só podemos fazer vagas conjecturas sobre as circunstâncias dessas alterações com o tempo: provavelmente a claridade do céu pode ter se alterado em um longo período de observação, embora isso não pudesse ser detectado pelo olho. Para eliminar essa variação irregular, dividi as observações em quatro grupos, para os quais as quantidades médias de ácido carbônico (K) e de vapor d'água (W) foram 1.21 e 0.36, 2.21 e 0.86, 1.33 e 1.18 , e 2.22 e 2.34 respectivamente. Com a ajuda dos valores médios da radiação de calor para cada grupo de raios nesses quatro grupos de observações, calculei aproximadamente os coeficientes de absorção $(x \in y)$ para ambos os gases e, por meio deles, reduzi o valor de cada observação para o valor que ela teria se K e W fossem 1.5 e 0.88, respectivamente. Os 21 valores para os diferentes raios foram então somados, de modo que obtive a radiação total de calor para cada série de observações, reduzida para K = 1.5 e W = 0.88. Se os materiais de observação fossem muito regulares, os valores para essa radiação total não deveriam diferir muito uns dos outros. De fato, observa-se que as observações feitas quase ao mesmo tempo também fornecem valores quase iguais, mas se as observações foram feitas em momentos muito diferentes, os valores geralmente também diferem muito. Para os períodos a seguir, encontrei os valores médios correspondentes da radiação total:

| Período | Valor Médio | Fator de Redução |
|-----------------------------|----------------|---------------------|
| 1885. Fev.21 - Jun.24 | 4850 | 1.3 |
| 1885. Jul.29 - 1886. Fev.16 | 6344 | 1.00 |
| 1886. Set.13 - Set.18 | 2748 | 2.31 |
| 1886. Out.11 - Nov.8 | 5535 | 1.15 |
| 1887. Jan.8 - Fev.9 | 3725 | 1.70 |

A fim de reduzir os números de Langley para que sejam comparáveis entre si, apliquei os fatores de redução tabulados acima às observações feitas nos respectivos períodos. Estou convencido de que, com esse modo de trabalho, nenhum erro sistemático é introduzido nos cálculos a seguir.

Depois que isso foi feito, reorganizei os números dos grupos de Langley de acordo com os valores de K e W na tabela 1. (Para obter mais detalhes, consulte meu livro de memórias original).

Na tabela 1, o ângulo de desvio é considerado como título. Depois de K e W estão as quantidades de ácido carbônico e vapor de água atravessadas pelo raio nas unidades mencionadas acima. Abaixo disso, vem depois de i obs. a intensidade da radiação (reduzida) observada por Langley no bolômetro e, depois disso, o valor correspondente i calc., calculado por meio dos coeficientes de absorção fornecidos na Tabela 2 abaixo. G é o "peso" dado ao correspondente i obs. no cálculo, usando o método dos mínimos quadrados.

Para os coeficientes de absorção, calculados dessa maneira, apresento a tabela a seguir (Tabela 2). (Os logaritmos comuns dos coeficientes de absorção estão tabulados).

O significado desses números pode ser ilustrado por um exemplo. Se um raio de calor, correspondente ao ângulo de desvio 39°45, passa pela unidade de ácido carbônico, ele diminui de intensidade na proporção 1 : $0.934(\log = -0.0296)$, o valor correspondente para a unidade de vapor de água é 1 : $0.775(\log = -0.1105)$. Esses números são, obviamente, válidos apenas para as circunstâncias em que as observações foram feitas, ou seja, que o raio deveria ter atravessado uma quantidade de ácido carbônico K = 1.1 euma quantidade de vapor d'água W = 0.3 antes que a absorção nas próximas quantidades de ácido carbônico e vapor d'água fosse observada. E essas segundas quantidades não devem exceder K = 1.1 e W = 1.8, pois as observações não se estendem por um intervalo maior do que entre K = 1.1 e K = 2.2, e W = 0.3 e W = 2.1 (os números de K e W são um pouco diferentes para raios de tipos diferentes). Abaixo de A está escrito o valor relativo da intensidade da radiação para um determinado tipo de raio na luz da Lua depois de ter atravessado K = 1 e W = 0.3. Em alguns casos, o cálculo fornece valores positivos para $\log x$ ou $\log y$. Como isso é um absurdo físico (significaria que o raio deveria ser fortalecido por sua passagem através do gás absorvente), nesses casos, que devem depender de erros de observação, assumi a absorção igual a zero para o gás correspondente e, por meio desse valor, calculei o coeficiente de absorção do outro gás e, a partir daí, também de A.

Como será visto em uma inspeção da Tabela 1, os valores de i obs. concordam, na maioria dos casos, muito bem com os valores calculados i calc. Mas, em alguns casos, a concordância não é tão boa quanto se poderia desejar. Esses casos são caracterizados principalmente por um pequeno "peso" G, ou seja, em outras palavras, o material

| | 40° | $39^{\circ}45$ | $39^{\circ}30$ | $39^{\circ}15$ | 39° | $38^{\circ}45$ | $38^{\circ}30$ | $38^{\circ}15$ | 38° | $37^{\circ}45$ | $37^{\circ}30$ |
|---------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| Κ | 1.16 | 1.12 | 1.16 | 1.13 | 1.16 | 1.13 | 1.16 | 1.13 | 1.16 | 1.13 | 1.16 |
| W | 0.32 | 0.269 | 0.32 | 0.271 | 0.32 | 0.271 | 0.32 | 0.271 | 0.32 | 0.271 | 0.32 |
| i obs. | 28.7 | 26.6 | 27.0 | 26.4 | 24.8 | 24.8 | 12.6 | 20.1 | 43.8 | 65.9 | 74.4 |
| i calc. | 27.0 | 34.5 | 29.0 | 25.7 | 24.4 | 23.5 | 12.5 | 19.4 | 40.8 | 58.0 | 68.8 |
| G | 79 | 27 | 75 | 56 | 69 | 53 | 35 | 43 | 121 | 140 | 206 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.28 | 1.27 | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.27 | 1.26 | 1.29 | 1.27 | 1.27 |
| W | 0.81 | 1.07 | 0.86 | 1.04 | 0.86 | 1.04 | 0.90 | 0.96 | 0.86 | 1.07 | 1.00 |
| $i \ \mathrm{obs.}$ | 22.9 | 31.2 | 26.7 | 21.3 | 18.2 | 11.0 | 5.8 | 3.7 | 14.0 | 32.0 | 52.3 |
| i calc. | 23.1 | 27.9 | 25.4 | 21.2 | 21.8 | 12.5 | 8.6 | 12.8 | 26.1 | 42.1 | 52.7 |
| G | 76 | 135 | 109 | 73 | 74 | 38 | 24 | 13 | 57 | 139 | 261 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.46 | 1.40 | 1.39 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.50 | 1.49 | 1.50 | 1.49 | 1.50 |
| W | 0.75 | 0.823 | 0.78 | 0.87 | 0.89 | 0.89 | 0.82 | 0.89 | 0.82 | 0.87 | 0.84 |
| i obs. | 11.9 | 28.2 | 23.0 | 18.9 | 18.0 | 9.2 | 9.9 | 14.4 | 24.6 | 34.8 | 46.6 |
| i calc. | 23.6 | 29.4 | 25.4 | 20.9 | 18.6 | 12.7 | 7.8 | 10.8 | 24.4 | 43.2 | 55.2 |
| G | 28 | 28 | 25 | 38 | 37 | 17 | 33 | 28 | 81 | 70 | 151 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.48 | 1.52 | 1.48 | 1.51 | 1.48 | 1.51 | 1.48 | 1.51 | 1.48 | 1.52 | 1.48 |
| W | 1.80 | 2.03 | 1.78 | 1.64 | 1.78 | 1.95 | 1.80 | 1.95 | 1.80 | 2.03 | 1.67 |
| i obs. | 25.2 | 27.6 | 24.6 | 18.3 | 27.6 | 4.8 | 3.7 | 3.6 | 17.6 | 45.5 | 43.9 |
| i calc. | 16.9 | 21.4 | 20.2 | 17.9 | 18.5 | 5.9 | 4.7 | 6.6 | 12.0 | 28.2 | 40.2 |
| G | 30 | 22 | 51 | 31 | 37 | 5 | 4 | 3 | 21 | 37 | 119 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κ | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | 2.27 | 2.26 | 2.27 |
| W | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.06 | 1.08 | 1.06 |
| i obs. | 21.3 | 23.4 | 20.8 | 16.4 | 11.1 | 8.2 | 4.5 | 3.5 | 17.3 | 36.1 | 47.1 |
| i calc. | 21.2 | 25.9 | 21.3 | 16.6 | 10.1 | 7.7 | 4.5 | 5.1 | 14.7 | 33.9 | 48.3 |
| G | 44 | 49 | 43 | 34 | 23 | 17 | 9 | 7 | 37 | 75 | 112 |
| | | | | | | | | | | | |
| Κ | 2.05 | 1.92 | 1.92 | 1.93 | 1.92 | 1.92 | 1.92 | 2.45 | 2.37 | 1.92 | 2.05 |
| W | 1.93 | 2.30 | 2.24 | 2.16 | 2.24 | 2.30 | 2.24 | 2.25 | 2.20 | 2.30 | 1.93 |
| i obs. | 13.4 | 12.8 | 14.8 | 15.1 | 10.3 | 6.6 | 3.4 | 3.4 | 7.9 | 20.8 | 31.5 |
| i calc. | 16.2 | 19.4 | 17.3 | 14.5 | 13.0 | 3.8 | 2.9 | 2.6 | 6.1 | 23.4 | 35.1 |
| G | 55 | 29 | 35 | 47 | 25 | 15 | 8 | 10 | 26 | 47 | 129 |

Tabela 1: Radiação (i) da Lua Cheia para diferentes valores de $K \in W$.

Continua...

de observação é, nesses casos, relativamente insuficiente. Esses casos também ocorrem principalmente para os raios que são fortemente absorvidos pelo vapor de água. Esse efeito provavelmente se deve à circunstância de que o vapor aquoso na atmosfera, que se supõe ter variado proporcionalmente à umidade na superfície da Terra, nem sempre teve a distribuição ideal e uniforme presumida com a altura. A partir de observações feitas durante viagens de balão, sabemos também que a distribuição do vapor aquoso pode ser muito irregular e diferente da distribuição ideal média. Também é uma característica marcante o fato de que em alguns grupos, por exemplo, o terceiro, quase todos os números observados são menores do que os calculados, enquanto em outros grupos, por exemplo, o quarto, ocorre o contrário. Essa circunstância mostra que a divisão do material estatístico foi levada um pouco longe demais; e uma combinação desses dois grupos teria mostrado uma concordância próxima entre os números calculados e os observados. Como, no entanto, essa combinação não influencia a exatidão dos coeficientes de absorção calculados, omiti a reorganização dos números em grupos maiores, com o consequente recálculo.

Uma circunstância que argumenta muito a favor da opinião de que o coeficiente de absorção dado na Tabela 2 não pode conter grandes erros é o fato de que pouquíssimos logaritmos têm um valor positivo. Se as observações de Langley tivessem sido totalmente insuficientes, seria de se

| | $37^{\circ}15$ | 37° | $36^{\circ}45$ | $36^{\circ}30$ | $36^{\circ}15$ | 36° | $35^{\circ}45$ | $35^{\circ}30$ | $35^{\circ}15$ | 35° |
|----------------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Κ | 1.16 | 1.16 | 1.18 | 1.18 | 1.27 | 1.16 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.16 |
| W | 0.32 | 0.32 | 0.34 | 0.34 | 0.48 | 0.32 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.32 |
| $i \ \mathrm{obs.}$ | 68.6 | 59 | 56.2 | 48.3 | 43.4 | 40.7 | 39.0 | 32.6 | 31.5 | 19.7 |
| i calc. | 73.7 | 57.1 | 50.9 | 46.0 | 34.9 | 36.4 | 31.3 | 27.7 | 27.3 | 19.3 |
| G | 190 | 163 | 118 | 102 | 28 | 112 | 25 | 21 | 20 | 54 |
| | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.27 | 127 | 1.31 | 1.32 | 1.32 | 1.28 | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 1.25 |
| W | 1.00 | 1.00 | 1.05 | 1.00 | 1.00 | 0.81 | 0.51 | 0.51 | 1.07 | 0.60 |
| $i \ \mathrm{obs.}$ | 58.9 | 50.3 | 47.9 | 41.2 | 31.7 | 29.7 | 25.7 | 18.8 | 27.5 | 16.6 |
| i calc. | 53.0 | 51.2 | 47.1 | 39.2 | 34.2 | 31.1 | 30.3 | 26.8 | 21.3 | 17.2 |
| G | 294 | 251 | 205 | 140 | 108 | 98 | 16 | 12 | 39 | 22 |
| | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.49 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.41 | 1.45 | 1.41 | 1.41 | 1.41 | 1.41 |
| W | 0.87 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.97 | 0.89 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| $i \ \mathrm{obs.}$ | 43.1 | 36.4 | 35.4 | 31.2 | 28.3 | 24.9 | 16.6 | 15.4 | 10.3 | 9.2 |
| i calc. | 55.2 | 47.1 | 42.5 | 36.3 | 33.0 | 29.3 | 27.3 | 22.3 | 22.0 | 14.7 |
| G | 87 | 149 | 146 | 127 | 54 | 78 | 32 | 29 | 19 | 17 |
| | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 |
| W | 1.66 | 1.58 | 1.66 | 1.66 | 1.83 | 1.66 | 1.83 | 1.58 | 1.83 | 1.66 |
| $i \ \mathrm{obs.}$ | 47.5 | 48.7 | 45.8 | 34.5 | 35.0 | 27.5 | 28.7 | 21.4 | 17.4 | 15.4 |
| i calc. | 38.2 | 43.4 | 42.5 | 33.0 | 32.0 | 23.6 | 23.4 | 17.8 | 15.4 | 11.6 |
| G | 136 | 176 | 131 | 99 | 82 | 79 | 67 | 81 | 41 | 43 |
| | | | | | | | | | | |
| Κ | 2.26 | 2.12 | 1.91 | 1.90 | 1.91 | 2.09 | 1.91 | 1.90 | 1.90 | 2.12 |
| W | 1.08 | 1.15 | 1.10 | 1.11 | 1.10 | 1.18 | 1.10 | 1.11 | 1.11 | 1.15 |
| $i \; \mathrm{obs.}$ | 44.6 | 32.0 | 27.8 | 24.7 | 26.6 | 24.5 | 19.0 | 16.0 | 13.9 | 10.1 |
| i calc. | 47.1 | 33.5 | 32.8 | 27.4 | 26.8 | 23.6 | 21.3 | 17.5 | 20.4 | 12.2 |
| \mathbf{G} | 93 | 98 | 66 | 58 | 63 | 72 | 45 | 37 | 32 | 31 |
| | | | | | | | | | | |
| Κ | 1.92 | 2.05 | 2.45 | 2.37 | 2.45 | 2.37 | 1.97 | 1.97 | 1.97 | 1.97 |
| W | 2.30 | 1.93 | 2.25 | 2.20 | 2.25 | 2.20 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 |
| $i \; \mathrm{obs.}$ | 24.7 | 33.2 | 26.7 | 19.4 | 22.6 | 18.8 | 16.4 | 10.9 | 12.1 | 7.9 |
| i calc. | 27.1 | 31.8 | 23.7 | 18.4 | 21.4 | 16.8 | 17.4 | 11.5 | 12.2 | 8.4 |
| G | 56 | 137 | 77 | 63 | 65 | 61 | 32 | 22 | 24 | 16 |

Tabela 1 (continuação): Radiação (i) da Lua Cheia para diferentes valores de $K \in W$.

esperar encontrar quase tantos logaritmos positivos quanto negativos. Agora, há apenas três desses casos, a saber, para o ácido carbônico em um ângulo de 40° e para o vapor de água nos ângulos 36°.45 e 36°.15. As observações para 40° não são muito precisas, porque eram de pouco interesse para Langley, pois os raios correspondentes não pertencem ao espectro da Lua, mas apenas à luz solar difusa da Lua. Como esses raios também não ocorrem em nenhum grau sensível no calor de um corpo de 15°C, essa não concordância não tem importância para o nosso problema. Os dois valores positivos para os logaritmos pertencentes ao vapor aquoso são bastante insignificantes. Eles correspondem apenas a erros de 0.2 e 1.5 porcento para a absorção da quantidade W = 1 e estão totalmente dentro da faixa de erros experimentais.

Certamente não é desprovido de interesse comparar esses coeficientes de absorção com os resultados das observações diretas de Paschen e \mathring{A} ngström¹¹. Ao fazer essa comparação, deve-

¹¹Paschen, Wied. Ann. 1, p. 409, 1893; li. p. 1, lii. p. 2C9, e liii. p. 334, 1894, especialmente vol. l.otab. ix. fig. 5, curva 1 para ácido carbônico, curva 2 para vapor aquoso. Angström, Bihang till K. Vet.-Ak. Handlingar, Bd. xv. Afd. 1, No. 9, p. 15, 1889; Öfversigt of K. Vet.-Ak, Förhandl. 1889, No. 9, p. 553.

| Ângulo de | $\log r$ | log y | А |
|----------------|--|---|--------------|
| Desvio. | 108 | 1089. | |
| 40° | $ \left\{\begin{array}{c} +0.0286 \\ 0.0000 \end{array}\right. $ | $\left. \begin{array}{c} -0.1506 \\ -0.1455 \end{array} \right\}$ | 27.2 |
| $39^{\circ}45$ | -0.0296 | -0.1105 | 34.5 |
| $39^{\circ}30$ | -0.0559 | -0.0952 | 29.6 |
| $39^{\circ}15$ | -0.1070 | -0.0862 | 264 |
| 39° | -0.3412 | -00068 | 27.5 |
| 38°45 | -0.2035 | -0.3114 | 24.5 |
| 38°30 | -0.2039 | -0.3114 | 135 |
| 38°15 | -0.3760 | -0 1933 | 10.0 21 / |
| 380 | -0.1877 | 0.3108 | |
| 50 | -0.1077 | -0.5156 | 44.4 |
| $37^{\circ}45$ | -0.0931 | -0.1576 | 59.0 |
| $37^{\circ}30$ | -0.0280 | -0.1661 | 70.0 |
| $37^{\circ}15$ | -0.0416 | -0.2036 | 75.5 |
| 37° | -0.2067 | -0.0484 | 62.9 |
| | (-0.2465) | ±0.0008) | |
| $36^{\circ}45$ | $\begin{bmatrix} 0.2400 \\ -0.2466 \end{bmatrix}$ | | 56.4 |
| 36°30 | -0 2571 | -0.0507 | 51.4 |
| 50 50 | $\int -0.2071$ | ± 0.0007 | 01.4 |
| 36.15 | -0.1700 | -0.0000 | 39.1 |
| 36° | -0.0940 | -0.1184 | 37.9 |
| | | | |
| $35^{\circ}45$ | -0.1992 | -0.0628 | 36.3 |
| $35^{\circ}30$ | -0.1742 | -0.1408 | 32.7 |
| $35^{\circ}15$ | -0.0188 | -0.1817 | 29.8 |
| 35° | -0.0891 | -0.1444 | 21.9 |

Tabela 2: Coeficientes de absorção de ácido carbônico (x) e vapor aquoso (y).

mos ter em mente que não se pode esperar uma concordância exata, pois o significado dos coeficientes acima é bastante diferente daquele dos coeficientes que são ou podem ser calculados a partir das observações desses dois autores. Os coeficientes acima fornecem a taxa de absorção de um raio que atravessou quantidades de ácido carbônico (K = 1.1) e vapor d'água (W = 0.3); enquanto os coeficientes de Paschen e Ångström representam a absorção experimentada por um raio na passagem pelas primeiras camadas desses gases. Em alguns casos, podemos esperar uma grande diferença entre essas duas quantidades, de modo que apenas uma concordância geral pode ser almejada.

De acordo com os números de Paschen, parece não haver emissão ou absorção sensível pelo vapor aquoso em comprimentos de onda entre 0.9μ e 1.2μ (correspondente ao ângulo de desvio 40°). Por outro lado, a representação do espectro do Sol feita por Langley mostra um número muito maior de bandas de absorção nesse intervalo, entre as

quais as marcadas com ρ , σ , $\tau \in \phi$ são as mais proeminentes¹², e essas bandas de absorção pertencem muito provavelmente ao vapor aquoso. O fato de Paschen não ter observado nenhuma emissão de vapor d'água nesse intervalo pode muito bem ser explicado pelo fato de que seu espectro de calor tinha uma intensidade muito pequena para esses raios de ondas curtas. Mas pode-se admitir que o coeficiente de absorção para vapor aquoso nesse ângulo na Tabela 2 não é muito preciso (provavelmente muito grande), em consequência da pouca importância que Langley atribuiu às observações correspondentes. Depois disso, ocorre no espectro de Langley a grande banda de absorção ψ no ângulo 39.45 ($\lambda = 1.4 \mu$), onde na curva de Paschen a emissão se torna sensível pela primeira vez ($\log y = -0.1105$ na Tabela 2). Em comprimentos de onda de maior valor, encontramos, de acordo com Paschen, fortes bandas de absorção em $\lambda = 1.83 \ \mu$ (Ω no espectro de Langley), ou seja, na vizinhança de 39°.30 e a $\lambda = 2.64 \ \mu$ (X de Langley) um pouco acima do ângulo 39°.15. De acordo com isso, encontrei coeficientes de absorção bastante grandes para vapor aquoso nesses ângulos (log y = -0.0952 e -0.0862 respectivamente). De $\lambda = 3.0\mu$ a $\lambda = 4.7 \mu$ depois disso, de acordo com Paschen, a absorção é muito pequena, concordando com meu cálculo ($\log y = -0.0068$ em 39°, correspondente a $\lambda = 4.3 \ \mu$). A partir desse ponto, a absorção aumenta novamente e apresenta novos máximos em $\lambda = 5.5 \ \mu, \ \lambda = 6.6 \ \mu$ e $\lambda = 7.7 \ \mu$, ou seja, nas proximidades dos ângulos 38°.45 ($\lambda = 5.6 \ \mu$) e 38°.30 ($\lambda = 7.1 \ \mu$). Nessa região, a absorção do vapor de água é contínua ao longo de todo o intervalo, o que torna inteligível o grande coeficiente de absorção nessa parte $(\log y = -0.3114 \text{ e} -0.2362)$. Em decorrência da intensidade decrescente do espectro de emissão do vapor aquoso na curva de Paschen, não podemos examinar os detalhes de perto, mas parece que a emissão do vapor de água também seria considerável em $\lambda = 8.7 \ \mu \ (39^{\circ}.15)$, o que corresponde ao grande coeficiente de absorção ($\log y = -0.1933$) nesse local. As observações de Paschen não se estendem mais, terminando em $\lambda = 9.5 \ \mu$, o que

¹²Langley, Ann. Ch. et Phys. sér. 6, t. xvii. pp. 323 e 326, 1889, Prof. Papers, No. 15, placa 12. Lamansky atribuiu suas bandas de absorção, que provavelmente ocupavam esse lugar, ao poder de absorção do vapor aquoso (Pogg. Ann. cxlvi. p. 200, 1872)

corresponde a um ângulo de 39°.08.

Para o ácido carbônico, encontramos inicialmente o valor zero em 40°, de acordo com os valores de Paschen e Ångström¹³. A absorção de ácido carbônico primeiro assume um valor sensível em $\lambda = 1.5 \ \mu$, depois aumenta rapidamente para um máximo em $\lambda = 2.6 \ \mu$ e atinge um novo máximo extraordinariamente forte em $\lambda = 4.6$ (Langley's Y). De acordo com Angström, a absorção de ácido carbônico é zero em $\lambda = 0.9 \ \mu$ e muito fraca em $\lambda = 1.69 \ \mu$, após o que aumenta continuamente para $\lambda\,=\,4.6\mu$ e diminui novamente para $\lambda = 6.0 \ \mu$. Esse comportamento está totalmente de acordo com os valores de $\log x$ na Tabela 2. A partir do valor zero em 40° ($\lambda = 1.0 \ \mu$), ele atinge um valor sensível (-0.0296) em 39°.45 ($\lambda = 1.4 \mu$) e, depois disso, valores cada vez maiores (-0.0559 em $39^{\circ}.30$, e $-0.1070 \text{ em } 39^{\circ}.15$) até atingir um máximo considerável (-0.3412 a 39° , $\lambda = 4.3 \mu$). Depois desse ponto, a absorção diminui (em $38^{\circ}.45$ = 5.6 μ , log x = -0.2035). De acordo com a Tabela 2, a absorção de ácido carbônico a 38°.30 e 38°.15 ($\lambda = 7.1 \ \mu \in 8.7 \ \mu$) tem valores muito grandes (log x = -0.2438 e -0.3730), enquanto, de acordo com Angström, deveria ser insensível. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que o espectro de Angström tinha uma intensidade muito pequena para os comprimentos de onda maiores. Na curva de Paschen, há traços de uma absorção contínua pelo ácido carbônico em toda essa região com máximos fracos em $\lambda = 5.2\mu, \ \lambda = 5.9\mu, \ \lambda = 6.6\mu$ (possivelmente devido a traços de vapor de água), $\lambda = 8.4\mu$ e $\lambda = 8.9\mu$. Em consequência da forte absorção de vapor de água nessa região do espectro, a intensidade da radiação foi muito pequena nas observações de Langley, de modo que os coeficientes de absorção calculados não são muito exatos (cf. acima, págs. 6-7). Possivelmente, a absorção calculada do ácido carbônico pode ter sido muito grande e a do vapor de água muito pequena nessa parte (entre 38°.30 e 38°.0). Isso pode a
contecer mais facilmente, como na Tabela 1. K e W em geral aumentam juntos porque ambos são proporcionais à "massa de ar". É importante ressaltar que isso também ocorre nos problemas que serão tratados a seguir, de modo que o erro causado não é tão importante quanto se poderia pensar à primeira vista.

Para ângulos maiores que 38° ($\lambda > 9.5\mu$) não temos nenhuma observação direta da emissão ou absorção destes dois gases. O espectro do Sol, de acordo com Langley, tem grandes bandas de absorção em torno de 37°.50, 37°.25, 37°, e 36°.40°. De acordo com meus cálculos, o vapor aquoso tem seu poder máximo de absorção no espectro de 38° a 35° em ângulos entre $37^{\circ}15$ e $37^{\circ}45$ (os valores de 35°.45, 35°.30, e 35°.15 são muito incertos, uma vez que eles dependem de um número muito pequeno de medições), e o ácido carbônico entre 36°.30 e 37°.0. Isto parece indicar que as duas primeiras bandas de absorção são devido à ação do vapor-de-água, as duas últimas ao ácido carbônico. Deve ser enfatizado que Langley usou de todo cuidado nas medidas de intensidade da radiação lunar nos ângulos entre 36° e 38°, onde esta radiação tem seu máximo de intensidade. Devese, desta forma, assumir que os coeficientes de absorção calculados para esta parte do espectro são os mais exatos. Isto é de grande importância para os cálculos seguintes, dado que a radiação da Terra¹⁴ tem de longe a maior intensidade (em torno de dois terços, cf. pág. 10) nesta parte do espectro.

II. A Absorção Total por Atmosferas de Composições variadas

Como agora determinamos, da maneira descrita, os valores dos coeficientes de absorção para todos os tipos de raios, com a ajuda dos números de Langley¹⁵ será possível calcular a fração do calor de um corpo a 15°C (a Terra) que é absorvida por uma atmosfera que contém quantidades específicas de ácido carbônico e vapor de água. Para começar, faremos esse cálculo com os valores K = 1 e W = 0.3. Tomamos aquele tipo de raio para o qual as melhores determinações foram feitas por Langley, e que se encontra no meio da parte mais importante da radiação (37°). Para esse feixe de raios, encontramos a intensidade da radiação em K = 1 e W = 0.3 igual a 62.9; e

 $^{^{13}\}mathrm{Deve}$ se lembrar que, nesse ponto, o espectro de Paschen era muito fraco, de modo que a coincidência com seu valor pode ser acidental,

 $^{^{14}{\}rm Depois}$ de ter sido espalhada por uma atmosfera de K = 1.1 e W = 0.3.

¹⁵'Temperature of the Moon', placa 5.

com a ajuda dos coeficientes de absorção, calculamos a intensidade para K = 0 e W = 0, e a encontramos igual a 105. Em seguida, usamos os experimentos de Langley sobre a distribuição espectral da radiação de um corpo de 15°C e calculamos a intensidade para todos os outros ângulos de desvio. Essas intensidades são fornecidas sob o título M. Depois disso, temos de calcular os valores para K = 1 e W = 0.3. Para o ângulo 37°, sabemos que ele é 62.9. Para qualquer outro ângulo, poderíamos usar os valores A da Tabela 2 se a Lua fosse um corpo de 15°C. Mas um cálculo dos números de Very¹⁶ mostra que a lua cheia tem uma temperatura mais alta, cerca de 100°C. Agora, a distribuição espectral é quase, mas não exatamente, a mesma para o calor de um corpo de 15°C e para o de um corpo de 100°C. Com a ajuda dos números de Langley, no entanto, é fácil reduzir as intensidades do corpo quente a 100° (a Lua) para que sejam válidas para um corpo a 15° (a Terra). Os valores de A reduzidos dessa maneira estão tabulados abaixo sob o título N.

| Ângulo M N | $40^{\circ} \\ 3.4 \\ 3.1$ | 39°45 11.6 10.1 | 39°30 24.8 11.3 | 39°15 45.9 13.7 | $39^{\circ} \\ 84.0 \\ 18.0$ | 38°45 121.7 18.1 | 38°30. 161 11.2 | $38^{\circ}15$ 189 19.6 | 38° 210 44.4 | 37°45 210 59 | 37°30 188 70 | |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|------|
| Ângulo M | $37^{\circ}15$ | 37° 105 | $36^{\circ}45_{103}$ | 36°30 99 | $36^{\circ}15$ | 36° | $35^{\circ}45_{65}$ | 35°30 62 | $35^{\circ}15_{43}$ | 35° | Sum. 2023 | P.c. |
| N | 75.5 | 62.9 | 56.4 | 555 | 39.1 | 37.9 | 39.2 | 37.6 | 36.0 | 28.7 | 743.2 | 37.2 |

Para ângulos menores que 37°, encontramos, da maneira descrita acima, números que são um pouco inferiores aos tabulados, que são encontrados por meio dos coeficientes de absorção da Tabela 2 e dos valores de N. Dessa forma, a soma dos M's é um pouco maior (6.8 porcento) do que seria de acordo com o cálculo fornecido acima. Essa não concordância resulta provavelmente da circunstância de que o espectro nas observações não era totalmente puro.

O valor 37.2 pode possivelmente ser afetado por um erro relativamente grande em consequência da incerteza dos valores M. Nos cálculos a seguir, não é tanto o valor 37.2 que desempenha um papel importante, mas sim a diminuição do valor causada pelo aumento das quantidades K e W. Para fins de comparação, pode-se mencionar que Langley estimou que a quantidade de calor da Lua que passou pela atmosfera (de composição média) em suas pesquisas foi de 38%.¹⁷ Como a atmosfera média nas observações de Langley correspondia a valores mais altos de K e W do que K = 1 e W = 0.3, veremos que ele atribuiu à atmosfera uma maior transparência para raios opacos do que eu fiz. De acordo com a estimativa de Langley, deveríamos esperar para K = 1 e W = 0.3um valor de aproximadamente 44 em vez de 37.2. A influência que essa diferença pode exercer será investigada a seguir.

Os coeficientes de absorção citados na Tabela 2 são válidos para um intervalo de K entre aproximadamente 1.1 e 2.25, e para W entre 0.3 e 2.22. Nesse intervalo, pode-se, com a ajuda desses coeficientes e dos valores de N fornecidos acima, calcular o valor de N para outro valor de K e W e, dessa forma, obter, por meio de soma, o calor total que passa por uma atmosfera de determinada condição. Para cálculos adicionais, também computei valores de N para atmosferas que contêm maiores quantidades de ácido carbônico e vapor aquoso. Esses valores devem ser considerados como extrapolados. Na tabela 3, forneci esses valores de N. Os números impressos em itálico são encontrados diretamente da maneira descrita; os números em tipo comum são interpolados a partir deles com a ajuda da fórmula exponencial de Pouillet. A tabela tem dois cabeçalhos, um que corre horizontalmente e representa a quantidade

¹⁶"The Distribution of the Moon's Heat", Utrecht Society of Arts and Sc. The Hague, 1891.

¹⁷Langley, 'Temperature of the Moon', p. 197.

de vapor aquoso (W), e outro que corre verticalmente e representa a quantidade de ácido carbônico (K) na atmosfera.

Tabela 3: A transparência de uma dada Atmosfera para o calor de um corpo de 15° C.

| $\overrightarrow{H_2O} \\ \downarrow CO_2$ | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 6.9 | 10.0 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 37.2 | 35.0 | 30.7 | 26.9 | 23.9 | 19.3 | 16.0 | 10.7 | 8.9 |
| 1.2 | 34.7 | 32.7 | 28.6 | 25.1 | 22.2 | 17.8 | 14.7 | 9.7 | 8.0 |
| 1.5 | 31.5 | 29.6 | 25.9 | 23.6 | 19.9 | 15.9 | 13.0 | 8.4 | 6.9 |
| 2 | 27.0 | 25.3 | 21.9 | 19.1 | 16.7 | 13.1 | 10.5 | 6.6 | 5.3 |
| 2.5 | 23.5 | 22.0 | 19.0 | 16.6 | 14.4 | 11.0 | 8.7 | 5.3 | 4.2 |
| 3 | 20.1 | 18.8 | 16.3 | 14.2 | 12.3 | 9.3 | 7.4 | 4.2 | 3.3 |
| 4 | 15.8 | 14.7 | 12.7 | 10.8 | 9.3 | 7.1 | 5.6 | 3.1 | 2.0 |
| 6 | 10.9 | 10.2 | 8.7 | 7.3 | 6.3 | 4.8 | 3.7 | 1.9 | 0.93 |
| 10 | 6.6 | 6.1 | 5.2 | 4.3 | 3.5 | 2.4 | 1.8 | 1.0 | 0.26 |
| 20 | 2.9 | 2.5 | 2.2 | 1.8 | 1.5 | 1.0 | 0.75 | 0.39 | 0.07 |
| 40 | 0.88 | 0.81 | 0.67 | 0.56 | 0.46 | 0.32 | 0.24 | 0.12 | 0.02 |

Bem diferente desse calor escuro é o comportamento do calor do Sol ao passar por novas partes da atmosfera da Terra. As primeiras partes da atmosfera exercem, sem dúvida, uma absorção seletiva de alguns raios ultravermelhos, mas assim que esses são extintos, o calor parece não diminuir ao atravessar novas quantidades dos gases em discussão. Isso pode ser facilmente demonstrado para o vapor aquoso com a ajuda das observações actinométricas de Langley em Mountain Camp e Lone Pine no Colorado¹⁸. Essas observações foram realizadas em Lone Pine, de 18 de agosto a 6 de setembro de 1882, em 7h15m e 7h45m da manhã, em 11h45m da manhã e 12h15m da tarde., e em 4h15m e 4h45m da tarde. No Mountain Camp, as observações foram realizadas de 22 a 25 de agosto nos mesmos horários do dia, exceto pelo fato de que apenas uma observação foi realizada pela manhã (as 8h). Dividi essas observações em dois grupos para cada estação, de acordo com a umidade do ar. Na pequena tabela a seguir são citados, primeiro, o local de observação e, depois disso, em D, a data média das observações (agosto de 1882), em W, a quantidade de água, em I, a radiação observada por meio do actinômetro, em I_1 , a segunda observação da mesma quantidade.

| | | М | anhã | | | М | eio-dia | | Noite | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------------|--------------------|--|---|--------------------------|
| Lone Pine. | D. 29.3 21.1 | W. 0.61 0.84 | I. 1.424 1.458 | $I_1.$ 1.554 1.583 | D. 23.6 26.9 | W. 0.46 0.59 | J. 1.692 1.699 | $I_1.$ 1.715 1.721 | D. 26.6 23.2 | W. 0.51 0.74 | I. 1.417 1.428 | $I_1.$ 1.351 1.359 |
| Mountain Camp. | $23.5 \\ 23.5$ | $0.088 \\ 0.153$ | $1790 \\ 1.749$ | | $22.5 \\ 24.5$ | $0.182 \\ 0.245$ | $\begin{array}{c} 1.904 \\ 1.890 \end{array}$ | $1.873 \\ 1.917$ | $24.5 \\ 22.5$ | $\begin{array}{c} 0.205 \\ 0.32 \end{array}$ | $\begin{array}{c} 1.701 \\ 1.601 \end{array}$ | $1.641 \\ 1.527$ |

Em uma umidade muito baixa (Mountain Camp), é evidente que o poder de absorção do vapor aquoso tem influência, pois os valores para maior umidade são (com uma exceção insignificante) inferiores aos de menor umidade. Mas para as observações de Lone Pine, o contrário parece ser verdadeiro. Não é permitido supor que a radiação possa ser reforçada por sua passagem através do vapor aquoso, mas o efeito observado deve ser causado por alguma circunstância secundária. Provavelmente o ar é, em geral, mais puro se houver mais vapor de água do que se houver menos. A difusão seletiva diminui em consequência dessa maior pureza, e esse efeito secundário mais do que contrabalança a absorção insignificante que a radiação sofre com o aumento do vapor de água. É digno de nota que Elster e Geitel provaram que os raios actínicos invisíveis de refrangibilidade muito alta atravessam o ar muito mais facilmente se ele estiver úmido do que se estiver seco. Os números de Langley demonstram, entretanto, que a influência do vapor aquoso na radiação do Sol é insensível assim que ultrapassa um valor de cerca de 0.4.

Provavelmente o mesmo raciocínio será válido para o ácido carbônico, pois o espectro de absorção de ambos os gases tem o mesmo

 $^{^{18}\}mathrm{Langley},$ 'Researches on Solar Heat', pp. 94, 98 e 177.

caráter geral. Além disso, a absorção pelo ácido carbônico ocorre em comprimentos de onda consideravelmente maiores e, consequentemente, em partes muito menos importantes do espectro do Sol do que a absorção pelo vapor d'água¹⁹. Portanto, é justificável supor que a radiação do Sol não sofra uma diminuição significativa se K e W aumentarem de um valor bastante insignificante (K = 1, W = 0.4) para valores mais altos.

Antes de prosseguirmos, precisamos examinar outra questão. Deixe o ácido carbônico no ar ser, por exemplo, o mesmo que agora (K = 1 para raios verticais) e a quantidade de vapor de água ser de 10 gramas por metro cúbico (W = 1 para raios verticais). Então, os raios verticais da Terra atravessam as quantidades K = 1 e W = 1; os raios que escapam em um ângulo de 30° com o horizonte (massa de ar = 2) atravessam as quantidades K = 2, W = 2; e assim por diante. Os diferentes raios que emanam de um ponto da superfície da Terra sofrem, portanto, uma absorção diferente - quanto maior, mais o caminho do raio diminui em relação à linha vertical. Pode-se perguntar, então, qual é o caminho mais longo que a radiação total deve percorrer para que a fração absorvida dela seja a mesma que a fração absorvida da massa total de raios que emanam para o espaço em diferentes direções. Para os raios emitidos, suporemos que a lei do cosseno de Lambert seja válida. Com o auxílio da Tabela 3, podemos calcular a fração absorvida de qualquer raio e, em seguida, somar o calor total absorvido e determinar qual é a fração da radiação total. Dessa forma, encontramos para o nosso exemplo o caminho (massa de ar) 1.61. Em outras palavras, a parte total absorvida de toda a radiação é tão grande quanto se a radiação total atravessasse as quantidades 1.61 de vapor aquoso e de ácido carbônico. Esse número depende da composição da atmosfera, de modo que se torna menor quanto maior for a quantidade de vapor aquoso e ácido carbônico no ar. Na tabela 4 a seguir, encontramos esse número para diferentes quantidades de ambos os gases.

Tabela 4: Caminho médio dos raios da Terra

| $\overrightarrow{H_2O} \\ \downarrow CO_2$ | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
|--|------|------|------|------|------|
| 0.67 | 1.69 | 1.68 | 1.64 | 1.57 | 1.53 |
| 1.0 | 1.66 | 1.65 | 1.61 | 1.55 | 1.51 |
| 1.5 | 1.62 | 1.61 | 1.57 | 1.51 | 1.47 |
| 2.0 | 1.58 | 1.57 | 1.52 | 1.46 | 1.43 |
| 2.5 | 1.56 | 1.54 | 1.50 | 1.45 | 1.41 |
| 3.0 | 1.52 | 1.51 | 1.47 | 1.44 | 1.40 |
| 3.5 | 1.48 | 1.48 | 1.45 | 1.42 | |

Se a absorção da atmosfera se aproximar de zero, esse número se aproximará do valor 2.

III. Equilíbrio térmico na superfície e na atmosfera da Terra

Como agora temos um conhecimento suficiente da absorção de calor pela atmosfera, resta examinar como a temperatura do solo depende do poder de absorção do ar. Essa investigação já foi realizada por Pouillet²⁰, mas deve ser feita novamente, pois Pouillet usou hipóteses que não estão de acordo com nosso conhecimento atual.

Em nossas deduções, assumiremos que o calor que é conduzido do interior da Terra para sua superfície pode ser totalmente negligenciado. Se ocorrer uma mudança na temperatura da superfície da Terra, as camadas superiores da crosta terrestre evidentemente também mudarão de temperatura; mas esse processo posterior passará em um tempo muito curto em comparação com o tempo necessário para a alteração da temperatura da superfície, de modo que, a qualquer momento, o calor que é transportado do interior para a superfície (positivo no inverno, negativo no verão) deve permanecer independente das pequenas variações seculares da temperatura da superfície e, no decorrer de um ano, ser quase igual a zero.

Da mesma forma, suporemos que o calor que é conduzido a um determinado local na superfície da Terra ou na atmosfera em consequência de correntes atmosféricas ou oceânicas, horizontais ou verticais, permanece o mesmo no decorrer do tempo considerado, e também suporemos que a parte nublada do céu permanece inalterada. Examinaremos apenas a variação da temperatura com a transparência do ar.

 $^{^{19}{\}rm Cf.}$ acima, pg. págs. 6-9, e a curva de Langley para o espectro solar, Ann. d., Ch. et d. Phys. sér. 6, t. xvii. pp. 323 e 326 (1889); 'Prof. Papers,' No. 15, placa 12.

²⁰Pouillet, Comptes rendus, t. vii. p. 41 (1888)

Todos os autores concordam com a opinião de que existe um equilíbrio na temperatura da Terra e de sua atmosfera. A atmosfera deve, portanto, irradiar para o espaço a mesma quantidade de calor que ganha, em parte pela absorção dos raios solares, em parte pela radiação da superfície mais quente da Terra e por meio de correntes ascendentes de ar aquecidas pelo contato com o solo. Por outro lado, a Terra perde tanto calor por radiação para o espaço e para a atmosfera quanto ganha por absorção dos raios solares. Se considerarmos um determinado local na atmosfera ou no solo, também devemos levar em consideração as quantidades de calor que são transportadas para esse local por meio de correntes oceânicas ou atmosféricas. Para a radiação, suporemos que a lei de Stefan da radiação, que agora é geralmente aceita, seja válida ou, em outras palavras, que a quantidade de calor (W) que irradia de um corpo com albedo $(1 - \nu)$ e temperatura T (absoluta) para outro corpo com coeficiente de absorção β e temperatura absoluta θ seja

$$W = \nu \beta \gamma \left(T^4 - \theta^4 \right)$$

onde γ é a chamada constante de radiação (1.21 \times $10^{-12}\,$ por segundo e cm²). O espaço vazio pode ser considerado como tendo a temperatura absoluta de $0.^{21}\,$

Provisoriamente, consideramos o ar como um envelope uniforme de temperatura θ e coeficiente de absorção α para o calor solar; de modo que, se A calorias chegam do Sol em uma coluna de 1 cm^2 de seção transversal, αA são absorvidas pela atmosfera e $(1 - \alpha)A$ chega à superfície da Terra. Nas calorias A, portanto, não está incluída a parte do calor do Sol que, por meio da reflexão seletiva na atmosfera, é lançada para o espaço. Além disso, seja β o coeficiente de absorção do ar para o calor que irradia da superfície da Terra; β também é o coeficiente de emissão do ar para a radiação de baixa temperatura - estritamente 15°; mas como a distribuição espectral do calor varia muito lentamente com a temperatura, β pode ser considerado como o coeficiente de emissão também na temperatura do ar. Deixe que o albedo da crosta terrestre seja designado por $(1-\nu)$ e que as quantidades de calor que são transportadas para o ar e para a superfície da Terra no ponto considerado sejam $M \in N$, respectivamente. Como unidade de tempo, podemos usar qualquer período: a melhor opção no cálculo a seguir talvez seja usar três meses para esse fim. Como unidade de superfície, podemos usar 1 cm^2 e, para o calor no ar, o calor contido em uma coluna de 1 cm^2 de seção transversal e a altura da atmosfera. O calor que é refletido do solo não é absorvido de forma significativa pelo ar (consulte a pág. 11), pois ele já atravessou grandes quantidades de vapor de água e ácido carbônico, mas uma parte dele pode ser devolvida ao solo por meio de reflexão difusa. Que essa parte não seja incluída no albedo $(1-\nu)$. As quantidades γ , A, ν , M, N e α devem ser considerados como constantes, β como variáveis independentes e θ e T como variáveis dependentes.

Então, encontramos para a coluna de ar

$$\beta \gamma \theta^4 = \beta \gamma \nu \left(\mathbf{T}^4 - \theta^4 \right) + \alpha \mathbf{A} + \mathbf{M} \tag{1}$$

O primeiro membro dessa equação representa o calor irradiado do ar (coeficiente de emissão β , temperatura θ) para o espaço (temperatura 0). O segundo dá o calor irradiado do solo (1 cm.², temperatura T, albedo 1-v) para o ar; o terceiro e o quarto dão a quantidade de radiação solar absorvida pelo ar e a quantidade de calor obtida por condução (correntes de ar) de outras partes do ar ou do solo. Da mesma forma, encontramos para a superfície da Terra

$$\beta \gamma \nu \left(\mathbf{T}^4 - \theta^4 \right) + (1 - \beta) \gamma \nu \mathbf{T}^4 = (1 - \alpha) \nu \mathbf{A} + \mathbf{N}$$
(2)

O primeiro e o segundo membros representam as quantidades irradiadas de calor que vão para o ar e para o espaço, respectivamente, $(1 - \alpha)\nu$ A é a parte da radiação solar absorvida e N o calor conduzido para o ponto considerado de outras partes do solo ou do ar por meio de correntes de água ou ar.

Combinando essas duas equações para a eliminação de θ , que não tem interesse considerável, encontramos para T⁴

$$T^{4} = \frac{\alpha A + M + (1 - \alpha)A(1 + \nu) + N(1 + 1/\nu)}{\gamma(1 + \nu - \beta\nu)} = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)}$$
(3)

 $^{^{21}\}mathrm{Langley},$ 'Prof. Papers,' No. 15, p. 122. "The Temperature of the Moon", p. 206.

Para a crosta sólida da Terra, podemos, sem erros sensíveis, colocar ν igual a 1, se excetuarmos os campos de neve, para os quais assumimos $\nu = 0.5$. Para as partes da Terra cobertas de água, calculei o valor médio de ν como sendo 0.925 com a ajuda dos números de Zenker²². Temos, também, que usar o albedo das nuvens. Não sei se ele já foi medido, mas provavelmente não difere muito daquele da neve recémcaída, que Zöllner determinou como sendo 0.78, ou seja, $\nu = 0.22$. Para neve velha, o albedo é muito menor ou ν muito maior; portanto, assumimos 0.5 como valor médio.

A última fórmula mostra que a temperatura da Terra aumenta com β , e quanto mais rápido, maior for ν . Para um aumento de 1° se $\nu = 1$, encontramos os seguintes aumentos para os valores de $\nu = 0.925$, 0.5 e 0.22, respectivamente:

| β | $\nu=0.925$ | 0.5 | 0.22 |
|---------|-------------|-------|-------|
| 0.65 | 0.944 | 0.575 | 0.275 |
| 0.75 | 0.940 | 0.556 | 0.261 |
| 0.85 | 0.934 | 0535 | 0.245 |
| 0.95 | 0.428 | 0.512 | 0.228 |
| 1.00 | 0.925 | 0.500 | 0.220 |

Esse raciocínio é válido se a parte da superfície da Terra considerada não alterar seu albedo como consequência da temperatura alterada. Nesse caso, as circunstâncias são totalmente diferentes. Se, por exemplo, um elemento da superfície que não está coberto de neve no momento, em consequência da queda da temperatura, ficar coberto de neve, devemos alterar na última fórmula não apenas β , mas também ν . Nesse caso, devemos nos lembrar de que α é muito pequeno em comparação com β . Para α , escolheremos o valor 0.40 de acordo com as estimativas de Langley ²³ Certamente, grande parte desse valor depende da parte difusamente refletida do calor do sol, que é absorvida pela atmosfera da Terra e, portanto, não deve ser incluída em α , como definimos acima. Por outro lado, o Sol pode, em geral, estar um pouco mais baixo do que nas medições de Langley, que foram realizadas com um Sol relativamente alto, e, em consequência disso, α pode ser um pouco maior, de modo que essas circunstâncias podem se compensar mutuamente. Para β , escolheremos o valor 0.70, que corresponde,

quando K = 1 e W = 0.3 (um pouco abaixo do ponto de congelamento), ao fator 1.66 (consulte a págs. 11-12). Nesse caso, encontramos a relação entre T (descoberta) e T_1 (superfície coberta de neve) como sendo

$$\begin{split} \mathbf{T}^4 &: \mathbf{T}_1^4 = \\ \frac{\mathbf{A}(1+1-0\cdot 40) + \mathbf{M}}{\gamma(1+1-0\cdot 70)} &: \frac{\mathbf{A}(1+0\cdot 50-0\cdot 20) + \mathbf{M}}{\gamma(1+0\cdot 50-0\cdot 35)} \\ &= \frac{1\cdot 60 + \phi}{1\cdot 30} : \frac{1\cdot 30 + \phi}{1\cdot 15} \quad , \end{split}$$

se $M = \phi A$. Devemos ter em mente que a média de M para toda a Terra é zero, para as regiões equatoriais é negativa e para as regiões polares é positiva. Para uma latitude média M = 0 e, nesse caso, T₁, torna-se 267.3 se T = 273, ou seja, a temperatura diminui em consequência da cobertura de neve em 5°.7C.²⁴ A diminuição da temperatura por essa causa será válida até que $\phi = 1$, ou seja, até que o calor fornecido pela convecção ao ar exceda toda a radiação do sol. Isso só pode ocorrer no inverno e nas regiões polares.

Mas esse é um fenômeno secundário. O principal efeito que examinamos é a influência direta de uma alteração de β sobre a temperatura T da superfície da Terra. Se partirmos de um valor T = 273 e β = 0.70, descobriremos que a alteração (t) na temperatura causada pela variação de β para os seguintes valores é

$$\begin{split} \beta &= 0.60 \quad t = -5^\circ\,\mathrm{C} \\ 0.80 &+ 5.6 \\ 0.90 &+ 11.7 \\ 1.00 &+ 18.6 \end{split}$$

Esses valores são calculados para $\nu = 1$, ou seja, para a crosta sólida da superfície da Terra, exceto os campos de neve. Para superfícies com outro valor de ν , como, por exemplo, o oceano ou os campos de neve, temos que multiplicar esse valor t por uma fração dada acima.

Agora, vamos considerar brevemente a influência das nuvens. Grande parte da superfície da Terra não recebe calor diretamente do sol, porque os raios solares são bloqueados pelas nuvens.

 $^{^{22}}$ Zenker, Die Vertheilung der Wärme auff der Eidoberfläche, p. 54 (Berlim, 1888)

 $^{^{23} {\}rm Langley},$ "Temperature of the Moon", p. 189. Na p. 197, ele estima que α seja apenas 0.33.

 $^{^{24}\}mathrm{De}$ acordo com a correção introduzida na sequência para as diferentes alturas das camadas de absorção e radiação da atmosfera, o número 5°.7 é reduzido para 4°0. Mas como cerca de metade do céu é coberto por nuvens, o efeito será apenas a metade do que seria para um céu sem nuvens, ou seja, o efeito médio será uma redução de cerca de 2°C.

Quão grande é a parte da superfície da Terra coberta por nuvens, podemos descobrir pelo trabalho de Teisserenc de Bort²⁵ sobre nebulosidade. A partir da tabela 17 dessa publicação, determinei a nebulosidade média para diferentes latitudes e encontrei:

Latitude. 60. 45. 30. 15. 0. Nebulosidade 0.603 0.48 0.402 0.511

Latitude. 0. -15. -30. -45. -60.Nebulosidade $0.581 \ 0.463 \ 0.53 \ 0.701$

Para a parte da Terra entre 60°S. e 60°N. encontramos o valor médio de 0.525, i.e. 52.5 porcento do céu é encoberto por nuvens. O efeito do calor destas nuvens pode ser estimado da seguinte maneira. Suponha que a nuvem esteja numa parte da superfície da Terra e que não haja conexão entre esta parte sombreada e as partes vizinhas, então haverá um equilíbrio térmico entre a temperatura da nuvem e do solo abaixo dela. Eles irão irradiar de um para o outro e a nuvem também para o ar acima e para o espaço, e a radiação entre radiação entre a nuvem e a Terra pode, devido a pequena diferença de temperatura, ser tomada como proporcional a esta diferença. Outras trocas de calor por meio de correntes de ar são também, como uma primeira aproximação, proporcionais a esta diferença. Se nós então supusermos uma mudança da temperatura da nuvem (outras circunstâncias, como sua altura e composição, mantidas inalteradas), a temperatura do solo abaixo dela também deve se alterar da mesma maneira se houver disponível a mesma quantidade de calor para ambas - se não houver disponibilidade para o solo vinda das partes vizinhas, a nuvem e o solo irão finalmente adquirir a mesma temperatura média. Se, então, a temperatura das nuvens variar de uma determinada maneira (sem alteração das suas outras propriedades, como altura, compacticidade, etc.), o solo irá experimentar a mesma variação de temperatura. Agora, será mostrado a seguir que a variação do ácido carbônico da atmosfera na mesma proporção produz aproximadamente o mesmo efeito termal independente da sua magnitude absoluta (veja pág. 20). Assim, podemos calcular a varia-

ção de temperatura neste caso como se as nuvens cobrissem o solo com um filme fino de albedo 0.78 $(\nu = 0.22, \text{ veja pág. 13})$. Como agora na média K = 1 e W = 1 aproximadamente, e neste caso β vale em torno de 0.79, o efeito das partes cobertas por nuvens será de apenas 0.25 do efeito nas partes que têm $\nu = 1$. Se um correção similar for introduzida para os oceanos ($\nu = 0.925$) sob a suposição que as partes sem nuvens cobrindo a Terra consistir de tanta água quanto de solo firme (o que é aproximadamente verdade, pois as nuvens são preferencialmente estocadas nos oceanos), encontraremos um efeito médio de, em números redondos, 60 p.c. daquele que existiria se toda a superfície da Terra tivesse $\nu = 1$. As partes cobertas por neve não são consideradas, pois, por um lado, estas partes são em geral cobertas por nuvens até 65 p.c.; ademais, elas constituem apenas uma parte pequena da Terra (para todo o ano na média apenas em torno de 4 p.c.), de forma que a correção para este caso não excederia 0.5 p. c. no último número 60. E ainda, nos países fronteiriços entre os campos de neve e o solo livre, efeitos secundários devem ser levados em conta (veja págs. 13-14) que compensam, e talvez superam, o efeito moderador da neve.

Acima, nós fizemos a hipótese de que o ar poderia ser tomado como um envelope com temperatura perfeitamente uniforme. Isto, é claro, não é verdade, e agora iremos examinar as possíveis correções que devem ser introduzidas para eliminar os erros advindos desta imprecisão. É evidente que as partes do ar que irradiam para o espaço são predominantemente as externas, e por outro lado, a camada de ar que absorve a maior parte da radiação da Terra não está em uma altura muito alta. Por esta razão tanto a radiação do ar para o espaço ($\beta \gamma \theta^4$ na eq.(1)) quanto a radiação da Terra para o ar $(\beta \gamma \nu (T^4 - \theta^4) na eq.(2))$, são amplamente reduzidas, e o ar tem efeito muito maior para proteger contra a perda de calor para o espaço que o assumido nestas equações, e consequentemente também na eq.(3). Se nós soubéssemos a diferença de temperatura entre duas camadas do ar que irradiam para o espaço e absorvem a radiação da Terra, seria fácil introduzir a correção necessária nas (1), (2), (3). Com esta finalidade, eu apresentei a seguinte consideração.

Como na composição média da atmosfera (K = 1, W = 1) cerca de 80 p.c. da radiação da Terra é

 $^{^{25}}$ Teisserenc de Bort, "Distribution moyenve de la nébulosité", Ann. du bureau central metéorologique de France, Ann6e 1884, t. iv. 2^{bt} partie, p. 27.

absorvida pelo ar, podemos considerar como temperatura média da camada de absorção a temperatura na altura em que 40 p.c. do calor é absorvido. Como a emissão e a absorção seguem as mesmas leis quantitativas, podemos escolher, como temperatura média da camada emissora, a temperatura na altura em que a radiação que entra do espaço na direção oposta à emissão real é absorvida na extensão de 40 p.c.

Langley fez quatro medições do poder de absorção do vapor de água para a radiação de um cubo de Leslie quente de 100°C.²⁶ Esses valores fornecem praticamente o mesmo coeficiente de absorção se a fórmula de Pouillet for usada para o cálculo. A partir desses números, calculamos que, para a absorção de 40 p.c. da radiação, seria necessário intercalar tanto vapor de água entre o radiador e o bolômetro que, quando condensado, formaria uma camada de água de 3.05 milímetros de espessura. Se agora supusermos como média para toda a Terra K = 1 e W = 1 (consulte a Tabela 4), descobriremos que os raios verticais da Terra, se ela estivesse a 100°, deveriam atravessar 305 metros de ar para perder 40 p.c. Agora, a Terra está a apenas 15°C, mas isso não pode fazer nenhuma grande diferença. Como a radiação emana em todas as direções, temos que dividir 305 por 1.61 e obter, dessa forma, 209 metros. Em consequência da diminuição da quantidade de vapor de água com a altura²⁷, devemos aplicar uma pequena correção, de modo que o resultado final seja 233 metros. É claro que esse número é um valor médio, e valores mais altos serão válidos para partes mais frias e mais baixos para partes mais quentes da Terra. Em uma distância tão pequena da Terra, então, 40 p.c. da radiação da Terra deve ser bloqueada. Agora, não é totalmente correto calcular com a fórmula de Pouillet (é bastante curioso que os números de Langley concordem tão bem com ela), que fornece valores necessariamente muito baixos. Mas, por outro lado, não consideramos de forma alguma a absorção pelo ácido carbônico nessa parte, e isso pode compensar o erro mencionado. Nas camadas mais altas da atmosfera há muito pouco vapor d'água, de modo que devemos calcular com o ácido carbônico como o principal absorvente. A partir de uma medição por Ångström²⁸, aprendemos que os coeficientes de absorção do vapor de água e do ácido carbônico em quantidades iguais (número igual de moléculas) estão na proporção de 81 : 62. Essa proporção é válida para o radiador menos quente que Angström usou, e não há dúvida de que a radiação da Terra é muito menos refrangível. Mas, na ausência de uma determinação mais apropriada, podemos usá-la para nosso propósito; é provável que, para um radiador menos quente, o poder de absorção do ácido carbônico seja um pouco maior em comparação com o do vapor de água, pois as bandas de absorção de CO₂ são, em geral, menos refrangíveis do que as de H_2O (consulte as págs. 8-9). Usando o número 0.03 vol. p.c. para a quantidade de ácido carbônico na atmosfera, descobrimos que os raios que emanam da parte superior do ar são derivados até a extensão de 40 p. c. de uma camada que constitui 0.145 parte da atmosfera. Isso corresponde a uma altura de cerca de 15.000 metros. Com relação a esse valor, podemos fazer a mesma observação que fizemos sobre o valor anterior. Nesse caso, negligenciamos a absorção pelas pequenas quantidades de vapor de água na atmosfera superior. A diferença de temperatura dessas duas camadas - uma absorvendo e a outra irradiando é, de acordo com as medições de Glaisher²⁹ (com uma pequena extrapolação), cerca de 42°C.

Para as nuvens, obtemos naturalmente números ligeiramente modificados. Devemos considerar a altura média das nuvens que são iluminadas pelo sol. Como tais nuvens, escolhi os cumes dos cúmulos que se encontram a uma altura média de 1.855 metros, com uma altura máxima de 3.611 metros e uma mínima de 900 metros.³⁰. Fiz cálculos para valores médios de 2000 e 4000 metros (correspondentes a diferenças de temperatura de 30°C e 20°C em vez de 42°C para a superfície da Terra).

Se quisermos agora ajustar nossa fórmula (1) a (3), teremos que introduzir em (1) e (2) θ como a temperatura média da camada radiante e (θ + 42), (θ + 30) ou (θ + 20) respectivamente para

²⁶Langley, "Temperature of the Moon", p. 186.

²⁷Hann, Meteorologische Zeitschrift, xi. p. 196 (1894)

 $^{^{28}\}text{\AA}ngström,$ Bihang till K. Vet-Ak. Handl. Bd. xv. Afd. 1, No, 9, pp. 11 and 18 (1889).

 $^{^{29}}$ Joh. Müller's Lehrbuch d. kosmischen Physik, 5 5* Aufl. p. 589 (Braunschweig, 1894)

³⁰De acordo com as medições de Ekholm e Hagström, Biheng. till K. So. Vet-Ak. Handlengar, Bd. xii. Afd. 1, No. 10, p. 11 (1686)

a temperatura média da camada absorvente. No primeiro caso, devemos usar $\nu = 1$ e $\nu = 0.925$, respectivamente; no segundo e no terceiro casos, $\nu = 0.22$.

Encontramos então ao invés da fórmula (3)

$$T^4 = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)}$$

outra fórmula bem similar

$$T^{4} = \frac{K}{1 + c\nu(1 - \beta)} \quad , \tag{4}$$

onde c é uma constante com valores 1.88, 1.58, e 1.37 respectivamente para os três casos.³¹ Desta forma, nós encontramos os seguintes valores corrigidos que representam a variação da temperatura, se o solo firme mudar sua temperatura de 1°C em consequência da variação de β como calculado pela fórmula (3).

Tabela 5: Fator de Correção para a Radiação.

| | Solo | Água | Neve | Nuver | ns $(\nu = 0)$ | 0.22) |
|---------|-----------|---------|---------|-------|----------------|---------|
| β | firme | $\nu =$ | $\nu =$ | a uma | altura o | de (m.) |
| | $\nu = 1$ | 0.925 | 0.5 | 0 | 2000 | 4000 |
| 0.65 | 1.53 | 1.46 | 0.95 | 0.49 | 0.42 | 0.37 |
| 0.75 | 1.60 | 1.52 | 0.95 | 0.47 | 0.40 | 0.35 |
| 0.85 | 1.69 | 1.59 | 0.95 | 0.46 | 0.38 | 0.33 |
| 0.95 | 1.81 | 1.68 | 0.94 | 0.43 | 0.36 | 0.31 |
| 1.60 | 1.88 | 1.74 | 0.94 | 0.41 | 0.35 | 0.30 |

Se agora nós assumirmos como média para a Terra como um todo K = 1 e W = 1, temos $\beta = 0.785$, e tomando a parte encoberta sendo de 52.5 p.c. e as nuvens tendo uma altura de 2000 metros, assumindo ainda a parte da Terra remanescente sem nuvem consistindo igualmente de terra e água, encontramos como variação média da temperatura

 $1.63{\times}0.2385 + 1.54 {\times} 0.2385 + 0.39 {\times} 0.525 = 0.979$

ou muito próximo do mesmo efeito como podemos calcular diretamente pela fórmula (3). Nestas bases, eu usei a fórmula mais simples.

No que foi dito anteriormente, observei que, de acordo com minha estimativa, o ar é menos transparente para o calor escuro do que na estimativa de Langley e quase na proporção de 37.2 : 44. O quão grande influência essa diferença pode exercer é facilmente calculada com a ajuda das fórmulas (3) ou (4). De acordo com a avaliação de Langley, o efeito deve ser quase 15 p.c. maior do que de acordo com a minha. Acho que minha estimativa está mais de acordo com a grande absorção que Langley encontrou para o calor de corpos radiantes terrestres (consulte a pág. 15) e, em todas as circunstâncias, preferi subestimar um pouco do que superestimar o efeito em questão.

IV. Cálculo da Variação da Temperatura que resultaria como consequência de uma dada Variação do Ácido Carbônico no Ar.

Agora temos todos os dados necessários para estimar o efeito sobre a temperatura da Terra que seria o resultado de uma determinada variação do ácido carbônico atmosférico. Só precisamos determinar o coeficiente de absorção para um determinado local com a ajuda da Tabela 3, se soubermos a quantidade de ácido carbônico (K = 1agora) e vapor de água (W) desse local. Com o auxílio da Tabela 4, primeiro determinamos o fator ρ que fornece o caminho médio da radiação da Terra através do ar e multiplicamos os valores de K e W fornecidos por esse fator. Em seguida, determinamos o valor de β que corresponde a ρK e ρ W. Suponha agora que o ácido carbônico tenha outra concentração K_1 (e.g. $K_1 = 1.5$). Então, a princípio, supomos W inalterado e buscamos o novo valor de ρ , digamos ρ_1 , que é válido com essa suposição. Em seguida, temos que buscar β , que corresponde a ρ_1 K₁ (1.5 ρ_1) e ρ_1 W. A partir da fórmula (3), podemos calcular facilmente a alteração (t) (aqui, aumento) na temperatura em um determinado local que acompanhará a variação de β de β para β_1 . Em consequência da variação (t)na temperatura, W também deve sofrer uma variação. Como a umidade relativa não varia muito, a menos que a distribuição de terra e água mude (consulte a tabela 8 do meu livro de memórias original), supus que essa quantidade permanecesse constante e, assim, determinei o novo valor W_1 de W. Uma aproximação nova fornece, na maioria dos casos, valores de W_1 e β_1 que podem ser considerados definitivos. Dessa forma, portanto, obtemos a variação de temperatura assim que conhecemos a temperatura e a umidade reais em um determinado local.

A fim de obter valores para a temperatura de toda a Terra, calculei, a partir dos gráficos do

 $[\]overline{{}^{31}1.88 = \left(\frac{288}{246}\right)^4, 1.58} = \left(\frac{276}{246}\right)^4$, e $1.37 = \left(\frac{2c6}{246}\right)^4$. 246° é a temperatura absoluta média da camada irradiante mais alta de ar.

| | | Temp | eratura l | Média | | Un | nidade | e Rela | tiva N | Aédia | U | Jmidade | Absolu | ta Média | ι |
|----------|---------|---------|-----------|---------|-----------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|----------|-----------------|
| Latitude | DezFev. | MarMaio | JunAgo. | SetNov. | Média do Ano | DezFev. | MarMaio | JunAgo. | SetNov. | Média do Ano | DezFev. | MarMaio | JunAgo. | SetNov. | Média do Ano |
| 70 | _21.1 | -83 | +7.5 | -6.0 | -7.0 | 86 | 81 | 77 | 84 | 82 | 1 15 | 2 14 | 6.22 | 2.84 | 3.09 |
| 60 50 | -11.2 | +0.2 | +13.5 | +2.2 | +1.2 | 83 | 74 | 76 | 80 | 78.2 | 2.22 | 3.82 | 8.82 | 4.7 | 4.9 |
| 50 | -1.4 | +7.8 | +18.7 | +9.7 | +8.7 | 78 | 73 | 69 | 76 | 74 | 3.86 | 5.98 | 10.8 | 7.16 | 6.95 |
| 40 | +8.4 | +14.5 | +21.8 | +16.6 | +15.3 | 73 | 68 | 67 | 71 | 69.7 | 6.53 | 8.63 | 13.4 | 10.13 | 9.7 |
| | +17.0 | +21.5 | +26.0 | +23.0 | +21.9 | 71 | 68 | 70 | 73 | 70.5 | 10.36 | 12.63 | 17.1 | 15.0 | 13.8 |
| 20 | +23.2 | +25.5 | +26.8 | +25.9 | +25.4 | 74 | 73 | 78 | 77 | 75.5 | 15.3 | 17.0 | 19.6 | 16.8 | 17.2 |
| | +25.5 | +25.8 | +25.4 | +25.5 | +25.5 | 77 | 78 | 82 | 81 | 79.5 | 17.7 | 18.9 | 19.9 | 19.3 | 18.9 |
| -10 | +25.7 | +25.5 | +24.0 | +25.0 | +25.1 | 81 | 81 | 82 | 80 | 81 | 19.4 | 19.0 | 17.9 | 18.3 | 18.7 |
| | +24.9 | +24.0 | +20.8 | +23.1 | +23.2 | 79 | 78 | 80 | 77 | 78.5 | 18.0 | 17.1 | 14.6 | 16.0 | 16.4 |
| -20 | +22.4 | +20.5 | +16.4 | +19.3 | +19.7 | 75 | 79 | 80 | 75 | 77.2 | 14.8 | 14.0 | 11.1 | 13.0 | 13.2 |
| -30 | +17.5 | +15.2 | +11.3 | +14.2 | +14.5 | 75 | 80 | 80 | 79 | 78.5 | 11.1 | 10.4 | 8.1 | 9.6 | 9.8 |
| -40 | +11.6 | +9.5 | +5.9 | +8.2 | +8.7 | 81 | 81 | 83 | 79 | 81 | 8.34 | 7.08 | 5.94 | 6.63 | 6.99 |
| -50 | +5.3 | +2.0 | -0.4 | +1.6 | +2.1 | 83 | 79 | - | - | - | 5.74 | 4.46 | - | - | - |

Tabela 6: Temperatura Média, Umidade Relativa e Absoluta (a partir dos valores de temperatura e umidade relativaeu calculei a umidade absoluta em gramas por metros cúbicos.).

Dr. Buchan, a temperatura média em diferentes locais de cada mês³² a temperatura média em cada distrito contido entre dois paralelos com diferença de 10 e dois meridianos com diferença de 20 graus (por exemplo, entre 0° e 10° N. e 160° e 180°W). A umidade ainda não foi suficientemente examinada em toda a Terra: portanto, coletei muitas medições da umidade relativa em diferentes locais (cerca de 780) da Terra e as marquei em mapas do mundo e, depois disso, estimei os valores médios para cada distrito. Essas quantidades foram tabuladas para as quatro estações, dezembro-fevereiro, março-maio, junho-agosto e setembro-novembro. A tabela detalhada e as observações usadas podem ser encontradas em meu livro de memórias original: aqui reproduzo apenas os valores médios para cada décimo paralelo (Tabela 6).

Por meio desses valores, calculei a alteração média de temperatura que ocorreria se a quantidade de ácido carbônico variasse de seu valor médio atual (K = 1) para outro, ou seja, para K = 0.67, 1.5, 2, 2.5 e 3, respectivamente. Esse cálculo é feito para cada décimo paralelo e separadamente para as quatro estações do ano. A variação é apresentada na Tabela 7.

Uma olhada nessa tabela mostra que a influência é praticamente a mesma em toda a Terra. A influência tem um mínimo próximo ao equador e, a partir daí, aumenta até um máximo plano que se situa tanto mais longe do equador quanto maior for a quantidade de ácido carbônico no ar. Para K = 0.67, o efeito máximo está próximo ao paralelo 40, para K= 1.5 no 50, para K= 2 no 60 e para valores mais altos de K acima do paralelo 70. Em geral, a influência é maior no inverno do que no verão, exceto no caso das partes que ficam entre o máximo e o polo. A influência também será maior quanto mais alto for o valor de ν , que, em geral, é um pouco maior para a terra do que para o oceano. Devido à nebulosidade do hemisfério sul, o efeito será menor do que no hemisfério norte. Um aumento na quantidade de

³²Buchan: Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. 'Challenger', Physics and Chemistry, vol. ii., 1889.

ácido carbônico diminuirá, é claro, a diferença de temperatura entre o dia e a noite. Uma elevação secundária muito importante do efeito será produzida nos locais que alteram seu albedo pela extensão ou regressão da cobertura de neve (consulte a págs. 13-14), e esse efeito secundário provavelmente removerá o efeito máximo dos paralelos inferiores até a vizinhança dos polos.³³

Deve-se lembrar que os cálculos acima são encontrados por interpolação dos números de Langley para os valores K= 0.67 e K= 1.5, e que os outros números devem ser considerados como extrapolados. O uso da fórmula de Pouillet torna os valores de K= 0.67 provavelmente um pouco pequenos demais, e os de K= 1.5 um pouco grandes demais. Sem dúvida, esse também é o caso dos valores extrapolados, que correspondem a valores mais altos de K.

Podemos agora perguntar quão grande deve ser a variação do ácido carbônico na atmosfera para causar uma determinada mudança de temperatura. A resposta pode ser encontrada por interpolação na Tabela 7. Para facilitar essa investigação, podemos fazer uma observação simples. Se a quantidade de ácido carbônico diminuir de 1 para 0.67, a queda de temperatura será quase a mesma que o aumento de temperatura se essa quantidade aumentar para 1.5. E para obter um novo aumento dessa ordem de grandeza (3°.4), será necessário alterar a quantidade de ácido carbônico até que ela atinja um valor quase intermediário entre 2 e 2.5.

Assim, se a quantidade de ácido carbônico aumentar em progressão geométrica, o aumento da temperatura aumentará quase em progressão aritmética. Essa regra - que naturalmente é válida apenas na parte investigada - será útil para as seguintes estimativas resumidas.

V. Consequências Geológicas.

Eu certamente não teria feito esses cálculos tediosos se não houvesse um interesse extraordinário ligado a eles. Na Sociedade de Física de Estocolmo, houve ocasionalmente discussões muito animadas sobre as prováveis causas da Era Glacial; e essas discussões, na minha opinião, levaram à conclusão de que ainda não existe uma hipótese satisfatória que possa explicar como as condições climáticas para uma era glacial poderiam ser alcançadas em um período de tempo tão curto como o que se passou desde os dias da época glacial. A visão comum até agora tem sido a de que a Terra esfriou com o passar do tempo; e se não soubéssemos que o inverso tem acontecido, certamente afirmaríamos que esse resfriamento deve se manter continuamente. As conversas com meu amigo e colega Professor Högbom, juntamente com as discussões mencionadas acima, levaramme a fazer uma estimativa preliminar do provável efeito de uma variação do ácido carbônico atmosférico sobre a temperatura da Terra. Como essa estimativa levou à crença de que se poderia, dessa forma, provavelmente encontrar uma explicação para variações de temperatura de $5^{\circ} - 10^{\circ}$ C, elaborei o cálculo com mais detalhes e o apresento agora ao público e aos críticos.

A partir de pesquisas geológicas, está bem estabelecido o fato de que, em tempos terciários, havia vegetação e vida animal nas zonas temperadas e árticas que devem ter sido condicionadas por uma temperatura muito mais alta do que a atual nas mesmas regiões.³⁴. A temperatura nas zonas árticas parece ter excedido a temperatura atual em cerca de 8 ou 9 graus. A esse período agradável sucedeu-se a era glacial, que foi interrompida uma ou mais vezes por períodos interglaciais com um clima mais ou menos do mesmo tipo que o atual, às vezes até mais ameno. Quando a era glacial teve sua maior extensão, os países que hoje desfrutam da mais alta civilização estavam cobertos de gelo. Esse foi o caso da Irlanda, Grã-Bretanha (exceto uma pequena parte no sul), Holanda, Dinamarca, Suécia e Noruega, Rússia (até Kiev, Orel e Nijni Novgorod), Alemanha e Áustria (até Harz, Erz-Gebirge, Dresden e Cracóvia). Ao mesmo tempo, um manto de gelo dos Alpes cobriu a Suíça, partes da França, a Baviera ao sul do Danúbio, o Tirol, a Estíria e outros países austríacos, e desceu até a parte norte da Itália. Simultaneamente, a América do Norte também foi coberta de gelo na costa oeste até o paralelo 47, na costa leste até o paralelo 40 e na parte central até o paralelo 37 (confluência dos rios

³³Ver Adendo, pág. 25.

³⁴Para obter detalhes de. Neumayr, Erdgeschichte, B1. Londres, 1894; Nathorst, Jordens historia, p. 989, Estocolmo, 1894.

Tabela 7: Variação da Temperatura causada por uma dada Variação de Ácido Carbônico.

| 3.0 | onA ob sibàM | 9.3 | 9.3 | 9.17 | 8.82 | 8.1 | 7.52 | 7.3 | 7.35 | 7.62 | 8.22 | 8.8 | 9.25 | I |
|----------|----------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------|-------|------|
| = 00 | .voVt9Z | 9.4 | 9.5 | 9.2 | 8.8 | 7.9 | 7.5 | 7.3 | 7.4 | 7.6 | 8.3 | %. % | 9.3 | I |
| arbôn | .ogAnul | 9.4 | 8.9 | 8.6 | 8.2 | 7.5 | 7.2 | 7.2 | 7.4 | 8.0 | 8.6 | 9.1 | 9.4 | I |
| cido C | oisM1sM | 93 | 9.5 | 9.4 | 9.0 | 8.3 | 7.5 | 7.3 | 7.3 | 7.5 | 8.1 | 8.7 | 9.2 | 9.5 |
| Ą | DezFev. | 9.1 | 9.3 | 9.5 | 9.3 | 8.7 | 7.9 | 7.4 | 7.3 | 7.4 | 7.9 | 8.6 | 9.1 | 9.4 |
| 2.5 | Mean year | 7.95 | 7.8 | 7.7 | 7.42 | 6.8 | 6.52 | 6.42 | 6.5 | 6.6 | 6.87 | 7.32 | 7.8 | ı |
| ico = | .voVt92 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.3 | 6.7 | 6.6 | 6.4 | 6.6 | 6.7 | 7.0 | 7.4 | 7.9 | I |
| arbôn | .ogAnul | 7.9 | 7.6 | 7.0 | 6.9 | 6.6 | 6.3 | 6.3 | 6.6 | 6.7 | 7.0 | 7.7 | 7.9 | I |
| cido C | oisM1sM | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.6 | 7.0 | 6.6 | 6.4 | 6.4 | 6.6 | 6.8 | 7.2 | 7.9 | 8.0 |
| Ψ | DezFev. | 7.9 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.2 | 6.7 | 6.6 | 6.4 | 6.6 | 6.7 | 7.0 | 7.7 | 7.9 |
| 2.0 | onA ob sibàM | 6.05 | 6.02 | 5.92 | 5.7 | 5.3 | 5.02 | 4.95 | 4.95 | 5.07 | 5.35 | 5.62 | 5.95 | I |
| ico = | .vo ^N t9Z | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 5.6 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.4 | 5.6 | 6.0 | I |
| arbôn | .ogAnul | 6.0 | 5.8 | 5.5 | 5.4 | 50 | 4.9 | 4.9 | 5.0 | 5.2 | 5.5 | 5.8 | 60 | I |
| cido C | oisM1sM | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 5.8 | 5.4 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 5.3 | 5.6 | 6.0 | 6.1 |
| Á0 | DezFev. | 6.0 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 5.6 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 5.2 | 5.5 | 5.8 | 6.0 |
| 1.5 | onA ob sibàM | 3.52 | 3.62 | 3.65 | 3.52 | 3.47 | 3.25 | 3.15 | 3.15 | 3.2 | 3.27 | 3.52 | 3.7 | ı |
| ico = | .voVt92 | 3.6 | 3.8 | 3.7 | 3.5 | 3.5 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.3 | 3.5 | 3.7 | I |
| arbôn | .ogAnul | 3.8 | 3.6 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.4 | 3.7 | 3.8 | I |
| cido C | oisM1sM | 3.4 | 3.7 | 3.8 | 3.6 | 3.3 | 3.2 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.5 | 3.7 | 3.7 |
| Ą | DezFev. | 3.3 | 3.4 | 3.7 | 3.7 | 3.5 | 3.5 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.8 |
| | onA ob sibèM | -3.1 | -3.22 | -3.3 | -3.32 | -3.17 | -3.07 | -3.02 | -3.02 | -3.12 | -3.2 | -3.35 | -3.37 | ı |
| 0 = 0.67 | .voVj9Z | -3.1 | -3.3 | -3.4 | -3.3 | -3.1 | -3.1 | -3.0 | -3.0 | -3.1 | -3.2 | -3.4 | -3.4 | I |
| Jarbônic | .ogAnul | -3.4 | -3.4 | -3.3 | -3.2 | -3.1 | -3.0 | -3.0 | -3.1 | -3.2 | -3.3 | -3.4 | -3.3 | ı |
| Ácido (| oisM18M | -3.0 | -3.2 | -3.3 | -3.4 | -3.2 | -3.1 | -3.0 | -3.0 | -3.1 | -3.2 | -3.3 | -3.4 | -3.3 |
| | DezFev. | -2.9 | -3.0 | -3.2 | -3.4 | -3.3 | -3.1 | -3.1 | -3.0 | -3.1 | -3.1 | -3.3 | -3.4 | -3.2 |
| | 9butits.I | 20 | 00 | 00 | 40 | 00 | 07 | 01 0 | | 01- | 07- | 00- | 01- | 09- |

Mississípi e Ohio). Nas mais diferentes partes do mundo, também encontramos vestígios de uma grande era glacial, como no Cáucaso, Ásia Menor, Síria, Himalaia, Índia, Thian Shan, Altai, Atlas, no Monte Kênia e Kilimandjaro (ambos muito próximos ao equador), na África do Sul, Austrália, Nova Zelândia, Kerguelen, Ilhas Falkland, Patagônia e outras partes da América do Sul. Os geólogos em geral estão inclinados a pensar que essas glaciações foram simultâneas em toda a Terra;³⁵ e essa visão mais natural provavelmente teria sido aceita de modo geral, se a teoria de Croll, que exige uma era agradável no hemisfério sul ao mesmo tempo em que uma era glacial no norte e vice-versa, não tivesse influenciado a opinião. Por meio de medições do deslocamento da linha de neve, chegamos ao resultado - e isso é muito concordante em diferentes lugares - de que a temperatura naquela época deve ter sido de $4^{\circ} - 5^{\circ}$ C. menor do que a atual. A última glaciação deve ter ocorrido em tempos bastante recentes, geologicamente falando, de modo que a raça humana certamente surgiu naquele período. Alguns geólogos americanos acreditam que, desde o fim da era glacial, transcorreram apenas de 7.000 a 10.000 anos, mas isso provavelmente está muito subestimado.

Pode-se perguntar agora: Quanto deve variar o ácido carbônico de acordo com nossos números para que a temperatura atinja os mesmos valores das eras terciária e glacial, respectivamente? Um cálculo simples mostra que a temperatura nas regiões árticas aumentaria cerca de 8° a 9°C, se o ácido carbônico aumentasse para 2.5 ou 3 vezes o seu valor atual. Para que a temperatura da era glacial ficasse entre os paralelos 40 e 50, o ácido carbônico no ar deveria cair para 0.62 - 0.55de seu valor atual (redução de temperatura de $4^{\circ} - 5^{\circ}$ C). As exigências dos geólogos, de que nas épocas amenas o clima deveria ser mais uniforme do que agora, estão muito bem de acordo com nossa teoria. As variações geográficas anuais e diurnas de temperatura seriam parcialmente suavizadas se a quantidade de ácido carbônico fosse aumentada. O inverso seria o caso (pelo menos até uma latitude de 50° do equador), se o ácido carbônico diminuísse em quantidade. Mas, em ambos os casos, inclino-me a pensar que a ação secundária (consulte a pág. 14) devido à regressão ou ao progresso da cobertura de neve desempenharia o papel mais importante. A teoria também exige que, a grosso modo, toda a Terra tenha sofrido aproximadamente as mesmas variações de temperatura, de modo que, de acordo com ela, épocas agradáveis ou glaciais devem ter ocorrido simultaneamente em toda a Terra. Devido à maior nebulosidade do hemisfério sul, as variacões devem ter sido um pouco menores (cerca de 15%) do que no hemisfério norte. As correntes oceânicas também devem ter apagado as diferenças de temperatura em diferentes latitudes, como no momento atual, em uma extensão maior do que no hemisfério norte. Esse efeito também resulta da maior nebulosidade nas zonas árticas do que na vizinhança do equador.

Há agora uma pergunta importante que deve ser respondida, a saber: "É provável que variações tão grandes na quantidade de ácido carbônico, como exige nossa teoria, tenham ocorrido em tempos geológicos relativamente curtos? A resposta a essa pergunta é dada pelo Prof. Högbom. Como seu livro de memórias sobre essa questão podem não ser acessíveis à maioria dos leitores destas páginas, resumi e traduzi suas declarações, que são da maior importância para o nosso assunto³⁶:

"Embora não seja possível obter expressões quantitativas exatas para as reações na natureza por meio das quais o ácido carbônico é desenvolvido ou consumido, existem alguns fatores dos quais se pode obter uma estimativa aproximadamente verdadeira e a partir dos quais certas conclusões que lançam luz sobre a questão podem ser tiradas. Em primeiro lugar, parece ser importante comparar a quantidade de ácido carbônico atualmente presente no ar com as quantidades que estão sendo transformadas. Se a primeira for insignificante em comparação com a segunda, então a probabilidade de variações é totalmente diferente do que no caso oposto.

"Supondo que a quantidade média de ácido carbônico no ar atinja 0.03 vol.

 $^{^{35}\}mathrm{Neumayr},$ Erdgeschichte, p. 648; Nathorst, l.c. p. 992.

 $^{^{36}\}mathrm{H\"og}bom,$ Svensk kemisk Tudskrift, B
d. vi. p. 169 (1894). Phil. Mag. S. 5. Vol. 41. No. 251. April 1896.

porcento, esse número representa 0.045 porcento em peso, ou 0.342 milímetros de pressão parcial, ou 0.466 gramas de ácido carbônico para cada cm^2 da superfície da Terra. Reduzida a carbono, essa quantidade daria uma camada de aproximadamente 1 milímetro de espessura sobre a superfície da Terra. A quantidade de carbono fixada no mundo orgânico vivo certamente não pode ser estimada com o mesmo grau de exatidão; mas é evidente que os números que podem expressar essa quantidade devem ser da mesma ordem de grandeza, de modo que o carbono no ar não pode ser considerado nem muito grande nem muito pequeno em comparação com a quantidade de carbono que ocorre nos organismos. Com relação à grande rapidez com que a transformação na natureza orgânica prossegue, a quantidade disponível de ácido carbônico não é tão excessiva que as mudanças causadas por razões climatológicas ou outras na velocidade e no valor dessa transformação não sejam capazes de causar deslocamentos do equilíbrio.

"O sequinte cálculo é também muito instrutivo para a apreciação da relação entre a quantidade de Ácido Carbônico no ar e as quantidades que são transformadas. A atual produção mundial de Carvão atingiu em números redondos 500 milhões de toneladas por ano, ou 1 tonelada por km^2 da superfície da Terra. Transformada em ácido carbônico, esta quantidade corresponderia a algo em torno da milésima parte do ácido carbônico na atmosfera. Isto representa uma camada de pedra calcária de 0.003 milímetros de espessura para todo o globo, ou 1.5 km^3 em medidas cúbicas. Esta quantidade de ácido carbônico, que é fornecida à atmosfera predominantemente pelas industrias modernas, pode ser vista como compensando integralmente a quantidade de ácido carbônico que é consumido na formação de pedras calcárias (ou outra mineral carbonato) pela ação do clima ou nação da quantidade de substâncias dissolvidas, especialmente carbonatos, em certo número de rios em diferentes países e climas, e da quantidade de água fluindo nestes rios e suas superfícies de escoamento comparada com a superfície de terra do globo, é estimado que as quantidades de carbonatos dissolvidos que são fornecidos ao oceano no período de um ano alcança no máximo o volume de 3 km^3 . Como também é provado que os rios cujas regiões de escoamento que consistem de silicatos transportam quantidades pouco importantes de carbonato se comparada com aquelas que flui através de regiões de pedras calcárias, é admissível concluir, o que é também reforçado por outros argumentos, que apenas uma parte insignificante destes 3 km³ de carbonatos é formado diretamente pela decomposição de silicatos. Em outras palavras, apenas uma parte irrelevante desta quantidade de carbonato de cálcio pode ser derivado de um processo climático num ano. Apesar do número fornecido baseado em hipóteses inexatas ou incertas e erradas no alcance de 50 porcento ou mais, a comparação estabelecida é de um interesse enorme, dado que prova que o processo mais importante de todos pelos quais ácido carbônico tem sido removido da atmosfera em todos os tempos, a saber pela química climática de minerais silícico, é da mesma ordem de magnitude de um processo de efeito contrário, que é causado pelo desenvolvimento industrial do nosso tempo, e que deve ser considerado como sendo de natureza temporária.

decomposição de silicato. Pela determi-

"Em comparação com a quantidade de ácido carbônico que é fixada em pedras calcárias (e outros carbonatos), o ácido carbônico do ar desaparece. Com relação a espessura da formação sedimentar e a maior parte deles que é formada por pedras calcárias e outros carbonatos, não parece improvável que a quantidade total de carbonatos possa cobrir toda a superfície da Terra a uma altura de centenas de metros. Se assumirmos 100 metros, -um número que pode ser inexato em alto grau, mas provavelmente é subestimado,- encontramos que em torno de 25000 vezes mais ácido carbônico é fixado em cal nas formações sedimentares do que existente livre no ar. Cada molécula de ácido carbônico nessa massa de pedra calcária tem, no entanto, existido e passado pela atmosfera no curso do tempo. Embora tenhamos ignorado todos os outros fatores que podem ter influenciado a quantidade de ácido carbônico no ar, este número permite mas com probabilidade muito baixa a hipótese que esta quantidade deva em períodos geológicos anteriores ter mudado dentro dos limites que não difere muito das quantidades atuais. Enquanto o processo climático tenha consumido quantidades de ácido carbônico muitos milhares de vezes maior que a quantidade agora disponível no ar, e como este processo geografico, climático e outras causas diferentes tem com toda verosemelhança prosseguido com intensidade diferentes em épocas diferentes, a probabilidade de variações importantes na quantidade de ácido carbônico parece ter sido muito alta, apesar se levarmos em conta o processo compensatório que, como veremos a seguir, são suscitados logo que, por um motivo ou outro, a produção ou consumo de ácido carbônico começa a deslocar o equilíbrio em qualquer grau considerável. Ouve-se a opinião que a quantidade de ácido carbônico no ar deve ter sido muito maior anteriormente que agora, e que a diminuição deve advir da circunstância que o ácido carbônico tenha sido retirado do ar e estocado na crosta terrestre na forma de carvão e carbonatos. Em muitos casos esta diminuição hipotética é atribuída apenas a formação do carvão, enquanto que a muito mais importante formação de carbonatos é totalmente negligenciada. Este método todo de raciocínio na diminuição continuada de ácido carbônico no ar perde toda base em fatos, não obstante que quantidades enormes de ácido carbônico ao longo do tempo tenha se fixado em carbonatos, se nós considerarmos mais de perto o processo pelos quais o ácido carbônico tem sido em qualquer época fornecido a atmosfera. Assim podemos concluir que ocorreu uma enorme variação, mas não que a variação tenha sempre acontecido no mesmo sentido.

"O ácido carbônico é fornecido para a atmosfera pelos seguintes processos: -(1) erupções vulcânicas e fenômenos geológicos associados; (2) combustão de meteoritos carbônicos nas regiões mais altas da atmosfera; (3) combustão e decaimento de corpos orgânicos; (4) decomposição de carbonetos; (5) liberação de ácido carbônico mecanicamente aprisionados em minerais na sua ruptura ou decomposição. O ácido carbônico no ar é consumido primariamente pelos sequintes processos: (6) formação de carbonetos de silicatos pelo clima; e (7) o consumo do ácido carbônico por processos vegetativos. O oceano, também, tem papel importante como regulador da quantidade de ácido carbônico no ar por meio do poder absortivo da água, o qual libera ácido carbônico quando sua temperatura aumenta e o absorve quando se resfria. Os processos indicados em (4) e (5) são de pouca importância, de modo que podemos omiti-los. Também o são, os processos (3) e (7), já que a circulação da água no mundo orgânico ocorre tão rápido que suas variações não podem ter nenhuma influência sensível. Disto temos que excluir os períodos em que grandes quantidades de organismos foram armazenados nas formações sedimentares e assim retirados da circulação, ou quando tais produtos destes armazenamentos foram, como agora, introduzidos novamente em circulação. A fonte de ácido carbônico apontado em (2) é inteiramente incalculável.

"Assim os processos (1), (2), e (6) pre-

dominantemente se balanceiam entre si. Como as enormes quantidades de ácido carbônico (representando a pressão de várias atmosferas) que são agora fixadas nas pedras calcárias da crosta terrestre não podem ser consideradas de ter existido no ar mas como uma fração insignificante do total em qualquer tempo desde que a vida orgânica surgiu no globo, e já que desta forma o consumo através do clima e formação de carbonetos tem que ser compensados por meio de fornecimento contínuo, precisamos considerar as erupções vulcânicas com as fontes primárias de ácido carbônico na atmosfera.

"Porém esta fonte não flui de maneira regular e uniforme. Como vulcões individuais têm seus períodos de variação com alternância relativa de descanso e atividade intensa, da mesma maneira o globo como um todo parece ter em certas épocas geológicas apresentou uma atividade vulcânicas mais violentas e maior em geral, enquanto outros períodos foram marcados por uma calmaria relativa de força vulcânica. Parece assim provável que a quantidade de ácido carbônico no ar teve variações quase simultâneas, ou pelo menos que este fator tenha uma influência importante.

"Se revermos os processos mencionados acima de consumo e produção de ácido carbônico, iremos ver que eles evidentemente não estão numa relação ou dependência entre si que exista qualquer probabilidade para a manutenção de um equilíbrio do ácido carbônico na atmosfera. Um acréscimo ou decréscimo do fornecimento contínuo durante períodos geológicos deva, entretanto possa não ser importante, levar a alterações expressivas da quantidade de ácido carbônico no ar, e não há obstáculo concebível para imaginar que isto possa num certo período geológico ter sido várias vezes maior, ou por outro lado consideravelmente menor, que agora."

Quanto a questão da probabilidade da varia-

ção quantitativa do ácido carbônico na atmosfera é da forma mais definitiva respondida pelo Prof. Högbom, resta apenas um único ponto o qual eu gostaria de chamar atenção em poucas palavras, a saber: Ninguém propôs até agora uma explicação aceitável para a ocorrência dos períodos amenos e glaciais? Felizmente, durante o progresso dos cálculos precedentes, uma memória foi publicada pelo respeitado meteorologista italiano L. De Marchi que me livra de responder esta última questão.³⁷ Ele examina em detalhes as diferentes teorias até aqui propostas - astronômicas, físicas, ou geológicas, e delas eu aqui dou um breve resumo. Estas teorias afirmam que a ocorrência dos períodos amenos ou glaciais devem depender em uma ou mais mudanças das seguintes circunstâncias:

- 1. A temperatura do lugar da Terra no espaço.
- 2. A radiação do Sol a Terra (constante solar).
- 3. A inclinação do eixo da Terra com a eclíptica.
- 4. A posição dos polos na superfície da Terra.
- 5. A forma da rotação da Terra, especialmente sua excentricidade (Croll).
- 6. A forma e extensão dos continentes e oceanos.
- 7. A cobertura da superfície da Terra (vegeta-
ção).
- 8. A direção das correntes oceânicas areais.
- 9. A posição dos equinoses.

De Marchi chega a conclusão que todas estas hipóteses devem ser rejeitadas (p. 207). Por outro lado, ele é da opinião que a mudança na transparência da atmosfera pode possivelmente produzir o efeito desejado. De acordo com seus cálculos, "uma diminuição desta transparência pode causar uma diminuição da temperatura da Terra como um todo, um pouco menos nas regiões equatoriais, e aumentando com a latitude em direção ao 70^{ésimo} paralelo, mais perto do polo novamente</sup> um pouco menos. Ademais, esta diminuição iria,

 $^{^{37}}$ Luigi De Marchi : Le cause dell' era glaciale, premiato dal R. Istituto Lombardo, Pavia, 1895.

em regiões não-tropicais, ser menos nos continentes que nos oceanos e iria diminuir a variação anual da temperatura. Esta diminuição da transparência do ar deve ser primariamente atribuída a uma maior quantidade de vapor de áqua no ar, que causaria não apenas o resfriamento direto mas também uma precipitação caudalosa de água e neve nos continentes. A origem desta grande quantidade de vapor de água não é fácil de explicar." De Marchi chegou a resultados totalmente diferentes dos meus, pois ele não considerou de maneira satisfatória a qualidade importante da absorção seletiva que é característica do vapor aquoso. E, além disso, ele esqueceu que se o vapor aquoso é fornecido a atmosfera, irá se condensar até que as condições precedentes sejam atingidas, se não houver nenhuma outra mudança. Como nós vimos, a umidade relativa média entre o 40^{ésimo} e 60^{ésimo} paralelo no hemisfério norte é 76 porcento. Se, então, a temperatura média cair do seu valor atual $+5.3 \text{ de } 4^{\circ} - 5^{\circ}\text{C}$, i.e. para +1.3 ou +0.3, e o vapor aquoso permanecer no ar, a umidade relativa iria aumentar de 101 ou 105 porcento. Isto é certamente impossível, pois a umidade relativa não pode exceder 100 porcento no ar livre. Com forte razão, é impossível assumir que a umidade absoluta pode ter sido maior que agora na era glacial.

Como a hipótese de Croll ainda parece gozar de certa simpatia entre os geólogos ingleses, talvez seja interessante citar a declaração de De Marchi sobre essa teoria, que ele, de acordo com sua importância, examinou mais detalhadamente do que as outras. Ele afirma, e eu concordo inteiramente com ele nesse ponto: "Agora, acho que posso concluir que, do ponto de vista da climatologia ou meteorologia, no estado atual dessas ciências, a hipótese de Croll parece ser totalmente insustentável, tanto em seus princípios quanto em suas consequências".³⁸

Parece que a grande vantagem que a hipótese de Croll prometia aos geólogos, isto é, a de lhes dar uma cronologia natural, os predispunha a favor da sua aceitação. Mas esta circunstância, que a princípio parecia vantajosa, parece, com o avanço da investigação, militar contra a teoria, porque se torna cada vez mais impossível conciliar a cronologia exigida pela hipótese de Croll com os fatos da observação.

Espero que, depois do que foi dito, a teoria proposta nas páginas anteriores se revele útil para explicar alguns pontos da climatologia geológica que até agora se revelaram muito difíceis de interpretar.

Adendo³⁹

Como a nebulosidade é muito diferente em diferentes latitudes, e também diferente sobre o mar e sobre os continentes, é evidente que a influência de uma variação no ácido carbônico do ar será um pouco diferente da calculada acima, onde se assume que a nebulosidade é a mesma em todo o globo. Assim, estimei a nebulosidade em diferentes latitudes com a ajuda da carta publicada por Teisserenc de Bort e calculei a tabela abaixo para o valor da variação da temperatura, se o ácido carbônico diminuir para 0.67 ou aumentar para 1.5 vezes a quantidade atual.

Na primeira coluna está impressa a latitude; na segunda e terceira a nebulosidade sobre o continente e sobre o oceano; na quarta a extensão do continente em centenas da área total. A seguir, na quinta e sexta colunas, o fator de redução com o qual os valores do quadro devem ser multiplicados para obter a verdadeira variação da temperatura sobre os continentes e sobre os oceanos e, na sétima coluna, a média destes dois factores de correção. Na oitava e nona colunas, são tabuladas as variações de temperatura para K = 0.67, e na décima e décima primeira, os valores correspondentes para K = 1.5.

O valor médio do fator de redução N do equador é para o continente (até 70°N. lat.) 1.098 e para o oceano 0.927, em média 0.996. Para o hemisfério sul (até 60°S. lat.) verifica-se que é para o continente 1.095, para o oceano 0.871, em média 0.907. A influência no hemisfério sul será, portanto, cerca de 9 porcento menor do que no norte. Em consequência do mínimo de nebulosidade entre 20° e 30° de latitude em ambos os hemisférios, o efeito máximo da variação do ácido carbônico é deslocado em direção ao equador, de modo que cai em cerca de 25° de latitude nos dois casos de K = 0.67 e K = 1.5.

 $^{^{38}{\}rm De}$ Marchi, l. c. p. 166.

³⁹Cf. p. 265

| ude | Nebulosidade | | tual iente | Fator | de Red | ucção | K = | 0.67 | K = 1.5 | | |
|-------|-----------------|--------|------------------|-----------------|--------|-------|-----------------|--------|-----------------|--------|--|
| Latit | Conti- nente | Oceano | Percen Contin | Conti- nente | Oceano | Média | Conti- nente | Oceano | Conti- nente | Oceano | |
| 70 | | | | | | | | | | | |
| | 58.1 | 66.7 | 72.1 | 0.899 | 0.775 | 0.864 | -2.8 | -2.4 | 3.1 | 2.7 | |
| 60 | 56.9 | 67.6 | FF 0 | 0.094 | 0.769 | 0.052 | 2.0 | 0.4 | 0.0 | 0.7 | |
| 50 | 50.5 | 07.0 | 55.8 | 0.924 | 0.703 | 0.803 | -3.0 | -2.4 | 5.5 | 2.1 | |
| 00 | 45.7 | 63.3 | 52.9 | 1.057 | 0.813 | 0.942 | -3.5 | -2.7 | 3.8 | 2.9 | |
| 40 | | | | | | | | | | | |
| | 36.5 | 52.5 | 429 | 1.177 | 0.939 | 1.041 | -3.9 | -3.1 | 4.1 | 3.3 | |
| 30 | | | | | | | | | | | |
| 20 | 28.5 | 47.2 | 38.8 | 1-296 | 1.009 | 1.120 | -4.1 | -3.2 | 4.5 | 3.5 | |
| 20 | 28.5 | 47.0 | 24.2 | 1.308 | 1.017 | 1.087 | -4.1 | -3.2 | 4.3 | 3.4 | |
| 10 | 50.1 | 56.7 | 23.3 | 1.031 | 0.903 | 0.933 | -3.1 | -2.7 | 3.3 | 2.9 | |
| 10 | 54.8 | 59.7 | 24.2 | 0.97 | 0.867 | 0.892 | -2.9 | -2.6 | 3.1 | 2.8 | |
| -10 | 47.8 | 54.0 | 22.5 | 1.056 | 0.932 | 0.96 | -3.3 | -2.9 | 3.4 | 3.0 | |
| -20 | 29.6 | 49.6 | 23.3 | 1.279 | 0.979 | 0.972 | -4.1 | -3.1 | 4.2 | 3.2 | |
| -30 | 38.9 | 51.0 | 12.5 | 1.152 | 0.958 | 0.982 | -3.8 | -3.2 | 4.0 | 3.4 | |
| -40 | 62.0 | 61.1 | 2.5 | 0.86 | 0.837 | 0.838 | -2.9 | -2.8 | 3.2 | 3.1 | |
| -50 | 71.0 | 71.5 | 0.9 | 0.749 | 0.719 | 0.719 | | | | | |