

Peneireiro, Júlio César (2015). Recifes de Corais como Arquivos Paleoambientais: Uso da Concentração de ^{14}C na Reconstrução da Atividade Solar e a Conexão Sol-Terra. *Millenium*, 48 (jan/jun). Pp. 7-29.

RECIFES DE CORAIS COMO ARQUIVOS PALEOAMBIENTAIS: USO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{14}C NA RECONSTRUÇÃO DA ATIVIDADE SOLAR E A CONEXÃO SOL-TERRA

CORALS REEFS AS PALEOENVIRONMENTAL ARCHIVES: THE USE OF ^{14}C CONCENTRATION IN THE RECONSTRUCTION OF SOLAR ACTIVITY AND THE SUN-EARTH CONNECTION

JÚLIO CÉSAR PENEREIRO ¹

¹ Docente e pesquisador titular do CEATEC – Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas),
Campinas, SP – Brasil. (e-mail: jcp@puc-campinas.edu.br)

Resumo

Os registros relativos às observações visuais do número de manchas solares caracterizam a atividade do Sol ao longo dos últimos 403 anos. Para estabelecer uma relação quantitativa da variabilidade solar é necessário estender os registros das alterações nas manchas solares para épocas remotas. Essa extensão da variabilidade solar pode ser averiguada pelo uso de radionuclídeos, tais como o ^{14}C , encontrado em anéis de árvores e de corais. Eles fornecem informações indiretas sobre a atividade solar com uma resolução temporal máxima de um ano, dependendo da meia-vida e da idade do arquivo investigado. Trabalhou-se com medições dos registros de ^{14}C usando a análise dendrocronológica dos anéis de crescimento em amostras de corais tropicais e subtropicais por meio das técnicas da espectroscopia de massa com aceleradores. Também foram utilizados os registros de ^{14}C em corais e manchas solares (usando o número de Wolf - R_z), presentes na literatura. Relacionando esses dados foi possível reconstruir os números de manchas solares e determinar as variações sobre a atividade solar ao longo dos últimos 26000 anos. Os resultados obtidos após aplicar os métodos de análise espectral possibilitaram determinar periodicidades próximas a 11, 22, 88, 208, 232 e 2241 anos, caracterizando-as como os principais ciclos de atividades do Sol. Uma análise entre a atividade solar

determinada por esses procedimentos e a interação Sol-Terra é abordada, implicando em explicações para algumas alterações no clima do planeta.

Palavras-chave: recifes de corais, simbiose, manchas solares, ^{14}C , atividade solar.

Abstract

The records concerning visual observations of sunspots numbers provide a direct way to characterize the activity of the Sun over the past 403 years. In order to establish a quantitative relationship of solar variability it is necessary to extend the records of changes in sunspots to remote epochs. This extension of solar variability can be achieved by using radionuclides such as ^{14}C , found in trees and coral rings. They provide indirect information about solar activity with a maximum temporal resolution of one year, depending on the half-life and the age of the investigated archive. We worked with measurements of ^{14}C records using dendrochronological analysis of growth rings in tropical and subtropical samples of coral reefs, using the accelerator mass spectrometry techniques. Records of ^{14}C in coral reefs and sunspots (using the Wolf number - R_z), present in the literature were also used. Relating these data, it was possible to reconstruct the numbers of sunspots and to determinate the variations of solar activity over the past 26,000 years. The results obtained after applying the methods of spectral analysis allowed to determine periodicities close to 11, 22, 88, 208, 232 and 2241 years, characterizing them as the main cycles of activity of the Sun. An analysis concerning solar activity determined by these procedures and the Sun-Earth interaction is approached, implying on some explanations for changes in the planetary climate.

Keywords: coral reefs, symbiosis, sunspot, ^{14}C , solar activity.

Introdução

Os recifes de corais são ecossistemas complexos e de importância primária para as diversas formas de vida marinha. São considerados os ecossistemas mais afetados pelas mudanças climáticas que vêm ocorrendo em nosso planeta nos últimos

anos. Ao mesmo tempo, eles constituem os mais importantes bioconstrutores de carbonato de cálcio (CaCO_3) do mundo, com uma taxa de calcificação de quase 2 a 6 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$) (Barnes & Devereux, 1984) e uma distribuição terrestre sobre quase 284.000 km^2 (Spalding et al., 2001). Os recifes de corais são também fundamentais pela sua enorme biodiversidade, considerada a mais elevada dos ecossistemas marinhos, além do interesse econômico que despertam, quer seja para a pesca de espécies de interesse comercial para a alimentação, quer seja para a captura de espécies de interesse para a aquariorfilia.

Atualmente, esses ecossistemas são considerados importantes recursos econômicos para a exploração do turismo, bem como por prover informações científicas para estudos biológicos, geológicos e climáticos (Barnes & Lough, 1996; Wilkinson, 2000). Também são estabelecidas várias aplicações dos recifes de corais voltadas para os seres humanos, destacando aquelas relacionadas ao uso como drogas isoladas (Fung & Ding, 1998), bem como aquelas que empregam os esqueletos de alguns tipos de corais como, por exemplo, em bioimplantes de cirurgias (Demers et al., 2002).

Entretanto, à luz das mudanças climáticas globais e devido ao impacto ambiental causado pela atividade antropogênica (Trenberth et al., 2007), um declínio considerável dos recifes de corais vem sendo testemunhado pela comunidade científica ao longo do tempo (Smith & Buddemeier, 1992; Chadwick-Furman, 1996; Pittock, 1999; de Moraes, 2004). Estudar e compreender os mecanismos que interferem na formação e desenvolvimento dos recifes de corais é de grande importância para a humanidade. Porém, apesar de os esforços realizados nos últimos anos, a compreensão sobre a formação e evolução dos recifes coralíneos permanece pouco conhecida. Neste sentido, é de interesse estratégico saber o como e o quanto as atividades naturais e humanas alteraram e podem seguir alterando esses ecossistemas tão delicados. Assim, parece imprescindível, por suas características político-sociais, levantar e discutir essas questões com estudantes do ensino médio e universitário.

Uma das principais influências sobre a vida na Terra está associada à nossa estrela, o Sol. No contexto de interesse do presente trabalho, as atividades solares sobre o meio ambiente terrestre ocorrem em vários níveis, incluindo os recifes de corais tropicais e subtropicais. Nesses ecossistemas, os processos de biomineralização e calcificação são acompanhados pela fotossíntese, que possui papel fundamental na atividade biológica dos corais. Conseqüentemente, quaisquer variações no Sol acarretam possíveis mudanças nesses processos.

No sentido de incrementar nosso conhecimento sobre as variações do clima e suas causas, tanto em nível de fenômenos naturais como a partir da influência por estresses antropogênicos, é importante estudar não apenas o que ocorre no presente, mas também saber o que ocorreu no passado, o que permite prever o futuro, graças à

aplicação de métodos estatísticos e modelagens numéricas. Os resultados desses estudos podem ajudar a minimizar possíveis impactos ambientais negativos sobre ecossistemas, tais como os recifes coralíneos, tão frágeis às variações climáticas.

É neste contexto que este trabalho se insere, isto é, verificar por meio de contagens da datação do carbono radioativo impregnado em corais tropicais e subtropicais a possibilidade de se reconstruir o passado da atividade solar e, com isso, ter a possibilidade de detectar alguns eventos climáticos extremos ocorridos no passado da Terra.

Áreas de estudo

Datação por meio do ^{14}C

O presente trabalho foi desenvolvido tomando como base a técnica de datação pelo isótopo do carbono 14 (^{14}C), que vem sendo utilizada com muito sucesso em outras áreas científicas, como na Geologia, Geofísica, Arqueologia, Paleobotânica e Paleoclimatologia, dentre outras, visando a determinação da idade aproximada dos mais diversos tipos de artefatos. A invenção desse método é datada de 1949 e creditada a W. F. Libby, que recebeu em 1960 o Prêmio Nobel em Química. O método tem por base a contínua produção do carbono radioativo (^{14}C) na alta atmosfera. De forma sucinta, basta considerar que a Terra recebe permanentemente fluxos de radiação cósmica oriundos de regiões distantes da galáxia e que, por sua vez, essa radiação é constituída principalmente por partículas de alta energia, como prótons, pósitrons e outros elementos em proporção bem menor. Ao colidir com as camadas superiores da atmosfera terrestre, essa radiação cósmica pode provocar reações nucleares cujos produtos são elementos mais leves do que os constituintes do ar, isto é, o nitrogênio (N_2), o oxigênio (O_2), o argônio (Ar), além de outras partículas secundárias como prótons e nêutrons. Quando um nêutron (n) choca contra um núcleo de nitrogênio (^{14}N) provoca a formação do carbono 14 (^{14}C) e um próton (p), que pode ser explicado por meio da reação: $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$

Ainda na atmosfera o ^{14}C oxida-se, possibilitando a constituição da molécula de $^{14}\text{CO}_2$. Posteriormente, essa entra no ciclo do carbono podendo ser absorvida pelo oceano e pela biosfera. Por intermédio das plantas esse carbono radioativo é incorporado pelos animais vegetarianos e, por meio desses, pelos animais carnívoros, terminando assim por ser assimilado pelos seres vivos de todos os níveis tróficos (Délibrias, 1985; Evin, 2002). A quantidade de ^{14}C dentro do organismo permanecerá em equilíbrio dinâmico com os reservatórios de carbono até ao momento no qual o organismo venha a morrer. A partir desse momento a quantidade de ^{14}C neste organismo não será mais reabastecida e, portanto, decrescerá sistematicamente ao longo

do tempo. O comportamento desse decréscimo pode ser estabelecido pela lei exponencial do decaimento radioativo, expresso por:

$$C = C_0 e^{-\lambda T} \quad (1)$$

Nesta equação, T representa o tempo, a ser determinado em anos, transcorrido desde a morte do organismo, λ é a constante de decaimento, C e C_0 são as concentrações das amostras de ^{14}C e ^{12}C , respectivamente. Como, para o carbono, uma meia-vida ($t_{1/2}$) equivale a um tempo de 5.568 anos, com erro da ordem de 3%, então:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{5568} \text{ (ano}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

É comum utilizar a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ que geralmente é obtida por meio da contagem proporcional de um composto produzido a partir do carbono da amostra. Desta maneira, é possível determinar o período de tempo entre a morte do organismo e o momento da medição experimental, quando se determina a quantidade de ^{14}C remanescente na amostra. A equação que descreve a atividade específica do radioisótopo em um material orgânico é:

$$A_{esp} = 15,3e^{-\left(\frac{0,693T}{5568}\right)} \quad (3)$$

em que A_{esp} é a atividade específica.

Por meio de medidas obtidas empregando métodos nucleares, além da espectrometria de massa em alta resolução, é possível encontrar a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ numa amostra de idade desconhecida, permitindo determinar a época da vida em que a amostra absorvia o CO_2 atmosférico.

Ao longo deste processo, o fator mais importante para o controle da produção do ^{14}C é a intensidade do campo magnético terrestre. Este atua como se fosse uma blindagem contra qualquer partícula carregada eletricamente, como os prótons da radiação cósmica na origem da produção do radioisótopo. Desta forma, quanto mais intenso for o campo magnético, menor será a quantidade de prótons cósmicos interagindo com as altas camadas da atmosfera e, conseqüentemente, menor será a produção de ^{14}C .

Partindo do princípio de que o ^{14}C está presente nos oceanos e na biosfera, na seqüência são descritos os métodos e os dados em amostras de recifes de corais a partir do processo de biomineralização e fotossíntese. Posteriormente, são apresentados os dados referentes às medições das contagens de manchas solares por meio de observações visuais realizadas nos últimos 403 anos. Essas informações foram usadas em conjunto para estimar a variabilidade solar e alguns períodos climatológicos da Terra ao longo de alguns milhares de anos.

Interação entre fotossíntese e calcificação na formação dos anéis de carbono em corais

O avanço nos estudos do *habitat*, da ecologia e da biologia dos recifes de corais possibilitou entender como ocorrem os crescimentos dos anéis contendo CaCO_3 . A precipitação de carbonatos é determinada pelas algas simbiotas que vivem associadas aos tecidos dos corais. Este processo é favorecido dentro de uma faixa de temperatura que está entre 23 e 29 °C. É nesta condição que as algas do grupo *zooxanthellae* (*Symbiodinium* sp.) conseguem manter uma relação de simbiose com seus hospedeiros (Schuhmacher & Zibrowius, 1985). Observações indicam que linhagens de algas pertencentes ao grupo dos dinoflagelados encontram o local ideal para se locomoverem, alimentarem e reproduzirem quando se hospedam em pólipos de antozoários coloniais, constituintes dos recifes de corais. É nesse meio, tendo como abrigo os pólipos, que as algas encontram CO_2 e nutrientes suficientes para produzirem a matéria viva por intermédio da fotossíntese.

No que concerne à composição dos corais, principalmente ao seu esqueleto feito de CaCO_3 , incluem-se duas frações de biominerais, sendo uma do mineral carbonato de cálcio e a outra orgânica, também denominada de matriz orgânica, cujas quantidades variam de espécie para espécie. Para desenvolver seu esqueleto, o coral tem um suprimento de cálcio e carbono inorgânico, existente no ambiente marinho, capaz de realizar a calcificação e, com isso, eliminar prótons resultantes do processo de mineralização. Esse procedimento pode ser entendido pela equação química: $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$.

Estudos sobre a calcificação em corais foram limitados por um longo tempo em função de problemas metodológicos associados com o uso de radioisótopos, particularmente pela absorção do cálcio (^{45}Ca) (Barnes & Crossland, 1977). No entanto, os estudos sobre as fontes e suprimentos de carbono inorgânico dissolvido são, por sua vez, mais complicados que aqueles sobre a absorção do cálcio. Isso ocorre porque estão associados às influências da água do mar, como é o caso do pH marinho, passando pelas questões da respiração e dos efeitos da fotossíntese. Na água do mar a concentração dos íons HCO_3^- e CO_3^{2-} pode ser elevada, chegando a ~2,0 mM para o HCO_3^- e ~0,4 mM para o CO_3^{2-} ; no entanto o seu equilíbrio depende do pH do meio (Gatusso, Allemand & Frankignoulle, 1999). Como o carbono inorgânico dissolvido é usado tanto para a calcificação como na fotossíntese, o ^{14}C é incorporado ao esqueleto do coral praticamente na mesma taxa do Ca^{2+} , o que também sugere que ambos os transportes são muito eficientes.

As algas do grupo *zooxanthellae*, em particular as da espécie *Symbiodinium microadriaticum*, são as responsáveis pela reprodução assexuada (por simples divisão celular) e sexuada (quando capturadas na água por corais que então colonizam seus

tecidos), além de serem responsáveis pela intensa precipitação de carbonatos no esqueleto dos corais escleractíneos, formados em ecossistemas como os recifes coralíneos. Sendo o pH do meio alto (~8,5) a maior parte do CO_2 dissolvido em água encontra-se na forma de íons bicarbonato (HCO_3^-). Nessas condições, estando os tecidos expostos à intensa radiação solar, devido às baixas latitudes, os invertebrados que possuem algas simbiotes absorvem os íons de cálcio presentes na água, que por sua vez reagem com os íons bicarbonato, formando o bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Na decomposição do $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ forma-se o CaCO_3 , precipitado na forma do esqueleto, além do ácido carbônico (H_2CO_3), que será utilizado no processo de fotossíntese. Esse processo é bastante eficiente e está diretamente relacionado com a concentração de CO_2 na atmosfera e, por conseguinte, de $^{14}\text{CO}_2$, que pode modificar-se ao longo do tempo devido às influências da radiação solar.

Tendo como foco esses ecossistemas, é possível verificar as eventuais variações dos fenômenos climáticos em baixas latitudes que ocorreram ao longo do tempo. Por meio de observações sistemáticas, percebeu-se na porção basal de certos corais, em particular os *Porites* e *Diploastrea*, que as espessuras anuais dos anéis concêntricos de concentração de CaCO_3 não era constante. No caso de um coral muito jovem a espessura da porção basal é pequena e, inicialmente, cresce lentamente. Com o tempo, cresce mais rápido devido ao aumento da superfície do esqueleto que permite um maior número de hospedeiros, as algas simbiotes. Contudo, para os corais mais antigos, a superfície continua crescendo, porém com um metabolismo mais reduzido. Como descrito antes, esta relação de crescimento está associada à concentração de ^{14}C e, por sua vez, à atividade solar que está diretamente associada aos processos de fotossíntese, temperatura, salinidade próxima a 36%, além do baixo número de partículas em suspensão.

Com intuito de esclarecer esta situação, a Figura 1a mostra uma imagem obtida em ambiente marinho subtropical localizado no canal de São Sebastião, Ilhabela, SP, Brasil, do coral da espécie *Mussismilia hispida*, um exemplar desenvolvidor em potencial de recifes de corais. Trata-se de um coral pétreo ainda vivo que pode ser coletado e utilizado em estudos de datação. A imagem da Figura 1b mostra três cortes desse coral submetido à incidência de raios-X, no equipamento de radiologia do Hospital das Clínicas da Universidade Estadual de Campinas (HC-UNICAMP), onde se empregou equipamento de marca Toshiba, a tensão de 40 KV e corrente elétrica de 11 mA uma radiação com 7 segundos de exposição. Na Figura 1c verificam-se as assinaturas de ^{14}C numa amostra depois de irradiada, que pode ser identificada por meio dos anéis concêntricos mais escuros. Ao analisar esta última figura, ressalta-se que o envelhecimento do material ocorre da esquerda (região mais externa do coral) para a direita, como comentado anteriormente.

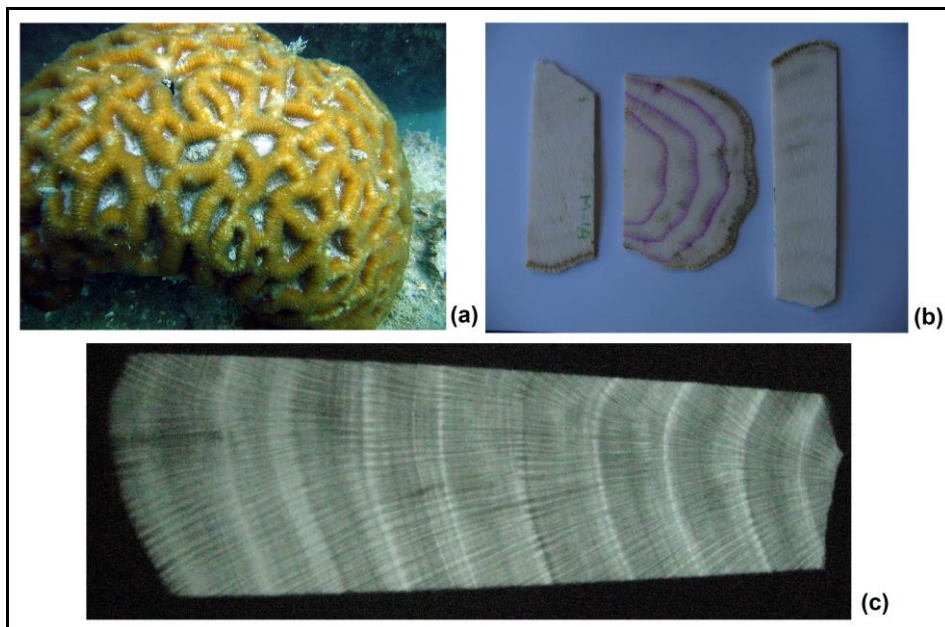


Figura 1 – (a) Imagem do coral hermatípico da espécie *Mussismilia hispida* em ambiente marinho. (b) Fotografia de três cortes na amostra para o preparo de imagens em raio-X. (c) Imagem sem distorção, em corte longitudinal, de uma amostra de coral submetida a raio-X no equipamento do HC-UNICAMP. (Fotos obtidas pelo autor).

Materiais e Métodos

Contagem do ^{14}C em corais

Uma das possibilidades de se medir a atividade do Sol é pela contagem visual do número de manchas solares que podem ser observadas com o emprego de telescópios munidos de filtros especiais. O aumento dessa atividade também é acompanhado por um aumento no “vento solar”, tendo como consequência a redução da produção de ^{14}C na atmosfera terrestre. Constata-se que a concentração desse radioisótopo é inversamente proporcional ao número de manchas solares. Por conseguinte, os registros de carbono no passado podem ser inferidos tomando como base as medidas da concentração de ^{14}C impregnado, por exemplo, em anéis concêntricos identificados em árvores e corais durante seus processos de crescimento. Por meio de medidas desse registro no interior de amostras dos mesmos, é possível datar os anéis neles existentes com boa precisão, como foi discutido anteriormente. Foi por intermédio desse método de datação aplicado em árvores coníferas, a partir da época atual, que se obteve a idade de cada um deles. Estudando minuciosamente a sucessão desses anéis nessas árvores

vivas ou em seus fósseis, a dendrocronologia conseguiu identificar as características que permitem relacionar um lenho e outro, possibilitando obter uma longa série cronológica de madeiras de idades conhecidas (Douglass, 1928; Eddy, 1976). Assim, a partir da medida da atividade ^{14}C de alguns anéis consecutivos, pôde-se determinar a atividade desse radioisótopo na atmosfera ao longo de uma série completa para um período de aproximadamente 12.000 anos (de Vries, 1958; Stuiver & Quay, 1980).

No âmbito dos corais, foi somente a partir do começo dos anos 1990 que se conseguiram medidas confiáveis nas variações relativas do carbono sobre amostras marinhas (Tric et al., 1992; Guyodo & Valet, 1996). Neste contexto, os corais tropicais e subtropicais puderam ser datados pelo ^{14}C tanto pelo método dos desequilíbrios na família do urânio, comumente denominado “Uranium-Thorium” (U/Th), como pelo uso da técnica da espectroscopia de massa com acelerador (“Accelerator Mass Spectrometry” - AMS). Por meio desses procedimentos foi possível reconstruir parcialmente as flutuações da relação atmosférica da razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ em até aproximadamente 45.000 anos atrás. Devido a detalhes técnicos e operacionais, este é o limite prático estabelecido pela utilização do cronômetro radiocarbono (Fontugne, 2004).

No entanto, existe um fator limitador no processo de realização da datação pelo método do carbono, pois há uma tendência ao “rejuvenescimento” das idades inferidas para os períodos antigos, provocada pela diminuição da intensidade do campo magnético terrestre ocorrido até 25.000 anos atrás (Fontugne, 2004). Dessa forma, as cronologias aqui discutidas podem ser estimadas com precisão para os últimos 26.000 anos. Os resultados obtidos por Bard et al. (1998) revelam que para as amostras de corais localizadas nas ilhas Barbados, Mururoa e Tahiti, com idades entre 30.000 e 20.000 anos atrás, a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ultrapassava o teor medido atualmente em 40% a 50%, respectivamente. Entretanto, mais do que as incertezas sobre as correções nas datações, as dificuldades em coletar corais do último período glacial, normalmente abaixo de 40 a 130 metros do nível da água do mar, constitui uma limitação desta técnica, mas que deverá em breve ser suprida com o uso de submersíveis.

Os dados tratados no presente trabalho foram, em parte, visando às medições do ^{14}C em 17 amostras de corais, sendo que um deles está mostrado nas imagens da Figura 1. Foram empregados contadores proporcionais gasosos, espectrômetros de cintilação líquida de baixo nível de radiação de fundo e a técnica de AMS no Keck-Carbon Cycle da Universidade da Califórnia, em Irvine, Estados Unidos, no período de 2010 a 2012. Complementando esses dados, também foram utilizadas as medidas desenvolvidas pelos grupos de pesquisadores da Queen’s University, em Belfast, Irlanda (Stuiver et al., 1998), e do Woods Hole Oceanographic Institute, Massachusetts, Estados Unidos (Hughen et al., 2004). Os dados desses dois últimos locais fazem parte

das calibrações do carbono nos projetos denominados *IntCal98*¹ e *Marine04*². Parte substancial das medidas aqui trabalhadas para os dados marítimos foram apresentadas e discutidas em detalhes por van der Plicht et al. (2004).

No desenvolvimento do trabalho, optou-se por utilizar os dados sobre a concentração do ^{14}C em corais tropicais e subtropicais em termos da percentagem de $\Delta^{14}\text{C}$. Isso equivale a trabalhar com as medidas da atividade radiocarbônica relativas à metade do século XIX, ou seja, antes do aumento considerável de combustíveis fósseis lançado na atmosfera pelas atividades humanas devido aos testes nucleares realizados nos anos 50 e 60.

Levando em consideração essas limitações, foi por intermédio dos dados acima expostos que se realizou a reconstrução das medidas de $\Delta^{14}\text{C}$ para os últimos 26.000 anos, como ilustra a Figura 2. Essa figura revela o comportamento dos registros de $\Delta^{14}\text{C}$ como medidas de 10 em 10 anos, nas quais as idades das amostras coralíneas foram detectadas pelas contagens dos anéis de crescimento usando os procedimentos descritos anteriormente.

Ressalta-se que as distribuições temporais dos registros de $\Delta^{14}\text{C}$ não apresentam barras de erro, mostrando apenas as flutuações relacionadas ao crescimento dos anéis existentes nos corais.

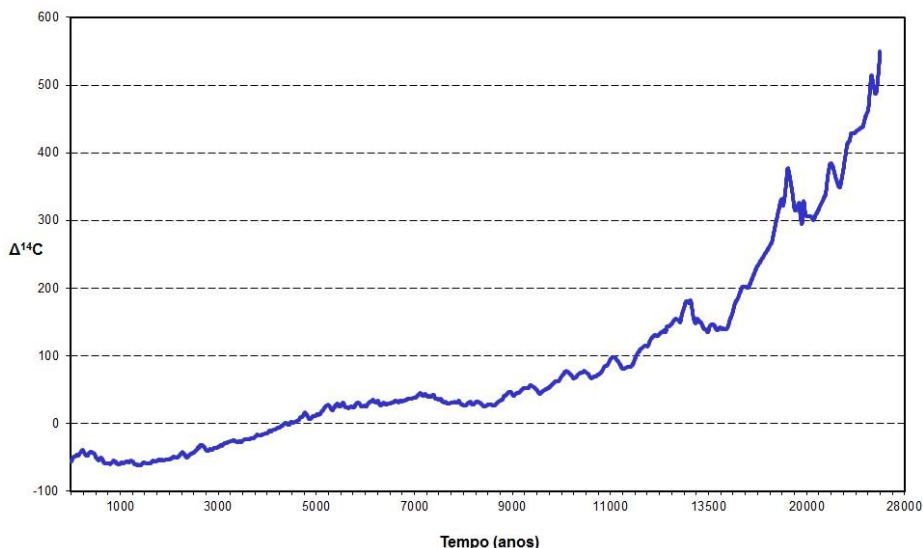


Figura 2 - Registros da produção da atividade radiocarbônica ($\Delta^{14}\text{C}$) medidas em amostras de corais na qual a idade de cada uma é conhecida pela contagem dos anéis para o período de 26.000 anos até o presente.

¹ Disponível em: <http://www.radiocarbon.org>.

² Disponível em: <http://www.calib.org>.

Contagem de manchas no Sol

As manchas solares são os aspectos mais fáceis de serem identificados numa observação visual da nossa estrela através do emprego de telescópios munidos de filtros apropriados. Elas são regiões frias, com uma temperatura de cerca de 2.000 K, e mais escuras, devido ao efeito de contraste, do que a fotosfera solar circunvizinha que está a aproximadamente 6.000 K. Em geral, essas regiões emitem menos energia do que a fotosfera porque possuem intensos campos magnéticos que bloqueiam a energia transmitida para cima pelas células de convecção na região logo abaixo da fotosfera (Gnevyshev, 1967). A explicação para a origem dessas manchas está no fato de que o arranjo de uma mancha no disco observado do Sol é influenciado diretamente pelo entrelaçamento interno do principal campo magnético existente na estrela. A cada 11 anos, em média, o Sol reverte a sua polaridade magnética geral, ou seja, o pólo magnético Norte se torna pólo magnético Sul, e vice-versa. Dessa maneira, um ciclo solar magnético completo, isto é, devolvendo ao Sol sua orientação magnética inicial, dura em média 22 anos e é denominado de “Ciclo de Hale”.

Portanto, uma mancha solar é um reflexo direto da atividade solar e, neste contexto, a primeira suspeita de uma variabilidade no Sol foi notificada por S. H. Schwabe, em 1843, quando percebeu que número de manchas e grupos de manchas solares se modificava com o tempo. Logo após, em 1848, R. Wolf logrou construir a primeira curva de atividade solar usando dados coletados desde os anos 1700, e assim pode determinar, e com boa exatidão, a duração dos ciclos de atividades solares, fixando-os em aproximadamente 11 anos (Hoyt & Schatten, 1997).

Posteriormente, Wolf reconheceu que era mais fácil identificar e analisar os grupos de manchas solares do que cada mancha individual. Assim, ele propôs o que passou a ser denominado de “número relativo de manchas solares” (R_z). Este índice é definido por meio de uma equação empírica, isto é, não possui nenhuma explicação teórica, mas que representa uma série temporal para as contagens de manchas solares, sendo dada por:

$$R_z = k(10G + M) \quad (4)$$

Nesta equação, R_z representa o índice de atividade solar; k é uma constante de normalização para um observador particular, sendo usada para compensar diferenças sistemáticas em observações causadas por variações nos tamanhos dos equipamentos empregados, condições atmosféricas e erros de medições; G é o número de grupos de manchas solares e M é o número de manchas individuais visíveis sobre o disco solar. A série temporal de R_z não apresenta barras de erro.

Mais recentemente, esta série foi corrigida pelo “número de manchas solares do grupo” (R_G), proposto por D. V. Hoyt e K. H. Schatten. Segundo estes

pesquisadores, para que os dados de vários observadores sejam mais consistentes e com baixo ruído, isto é, menos dependentes daquelas observações das manchas solares não detectáveis durante certo período, o valor de R_G deve ser determinado por meio da equação (Hoyt & Schatten, 1997):

$$R_G = \frac{12,08}{N} \sum_{i=1}^N k_i G_i \quad (5)$$

Neste caso, k_i é a constante de normalização para o i -ésimo observador, G_i é o número associado ao i -ésimo grupo de manchas solares e N é o número total de observadores utilizados para formar o valor diário. O valor numérico 12,08 é o fator de normalização escolhido para fazer a média de R_G idêntica à média de R_Z no período avaliado, isto é, a partir de 1610.

No presente trabalho utilizaram-se os dados numéricos de manchas e grupos de manchas solares do *Solar Influences Data Analysis (SIDC)*³, em Bruxelas, Bélgica, para o período de 1610-2013. Esta é a mais longa, completa e estatisticamente confiável base de dados que existe a respeito das observações visuais do Sol, pois envolve a colaboração de dezenas de observadores espalhados pelo mundo (Vanlommel et al., 2004).

A Figura 3 mostra a variação mensal das médias de R_G para o intervalo temporal acima citado, indicando as oscilações características de período com quase 11 anos, que são facilmente identificadas. Na figura percebem-se as variações nos valores das intensidades dos máximos dos ciclos de atividade solar. Também se destacam os números de cada ciclo solar, entre os anos 1749-2013 (Waldmeier, 1961), além do período entre 1645 e 1715, denominado “Mínimo de Maunder”; e entre 1790 e 1825, conhecido como “Mínimo de Dalton”, que, curiosamente, resultaram nos máximos menos intensos da variabilidade solar. Entretanto, os valores diários de R_G variam muito mais do que as médias de longo período. Perto do máximo da atividade solar esses valores podem ser maiores que 150 por muitos dias, e perto do mínimo da atividade do Sol registram-se vários dias sem qualquer mancha (Hathaway et al., 2002).

³ Disponível em: <http://www.sidc.oma.be>.

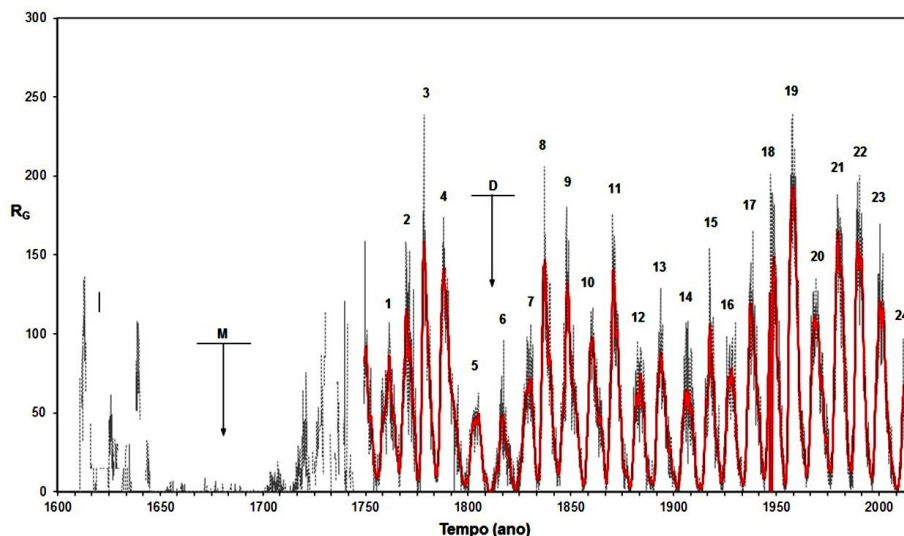


Figura 3 - Média mensal (curva pontilhada) e suavizada (curva em vermelho) do número internacional de manchas solares (R_G) durante os últimos 403 anos (1610 a 2013). O número de cada ciclo (Waldmeier, 1961) está indicado próximo ao topo de cada máximo solar. Os períodos relativos aos mínimos de Maunder (M) e Dalton (D) também estão indicados.

A importância da variabilidade solar sobre a biosfera é evidente e pode ser testemunhada quando se estuda o crescimento de anéis no interior das árvores e dos corais, pois ele revela os impactos naturais como os registros dos períodos de grandes secas, inundações, episódios glaciais, dentre outros. Além desses episódios, podem-se elencar aqueles relacionados com as atividades humanas sobre a Terra, tais como os efeitos ionosféricos sobre sistemas eletrônicos e de transmissão de eletricidade, satélite artificial, dentre outros. Tudo isso faz com que haja um interesse cada vez maior em entender como e porque as atividades solares ocorrem e de que maneira elas influenciam o nosso planeta. Apesar dos esforços realizados até o momento, esta variabilidade solar ainda não é perfeitamente compreendida, o que faz atizar ainda mais a curiosidade de muitos pesquisadores.

Resultados e Discussões

A relação entre contagens de anéis em corais e as manchas solares: a conexão Sol-Terra

Uma das preocupações que os ecologistas têm quando estudam os recifes de corais é a de entender e prever os efeitos das condições ambientais, tanto naturais como antropogênicas, sobre a integridade desses ecossistemas. Está bem estabelecido que mudanças em algum dos parâmetros ambientais, tais como a luminosidade, temperatura,

concentração de CO_2 , pressão, nutrientes, dentre outras, podem afetar diretamente a taxa de crescimento dos corais e, como consequência, a sua calcificação. Eventualmente, tais alterações podem causar doenças associadas nesses seres, inclusive modificando-os gradativamente do ponto de vista genético (Smith & Buddemeier, 1992).

Estudos revelam que os recifes de corais ao redor do mundo estão sofrendo uma pressão cada vez maior de agentes antropogênicos, como o impacto causado pelo turismo desordenado, poluição química, o propalado aquecimento global, além da desenfreada exploração pesqueira, dentre outros (Smith & Buddemeier, 1992; Chadwick-Furman, 1996; Pittock, 1999). Esses fatores estão acarretando um declínio na biodiversidade e nas áreas em que se manifestam esses ecossistemas.

De fato, os corais estão sujeitos ao estresse em escala local e regional, devido ao aumento da atividade humana e, em particular, à poluição do mar. No contexto global, os problemas são agravados pelos aumentos da temperatura e do nível da água do mar, além de pela intensificação da radiação ultravioleta proveniente do Sol e das descargas de sedimentos no mar. Assim, maiores e mais imediatas ações devem ser tomadas para melhor compreender os efeitos de uma mudança nos principais parâmetros ambientais dos recifes de corais.

Algumas pesquisas têm demonstrado que os registros isotópicos de todas as séries de proxies naturais, como: ^{14}C , para árvores (Eddy, 1976); ^{10}Be , para o gelo na Groelândia (Stuiver & Quay, 1980; Beer et al., 1988); ^{18}O , para circulação dos oceanos (Broecker, 1997); além do ^{26}Al e ^{36}Cl , para os sedimentos e o gelo nos polos (Bard & Frank, 2006). Essas informações revelam significativas modificações ambientais, além das conexões Sol-Terra ocorridas num passado remoto.

Tomando como base as medidas para o ^{14}C , percebe-se que elas apresentam flutuações em escalas de décadas e séculos, que se correlacionam, respectivamente, com o ciclo solar de 11 anos e outro ciclo maior de quase 200 anos. Algumas dessas características podem ser verificadas na Figura 4. Nessa figura apresentam-se os registros de manchas solares (R_G) entre 1610-2013, com a superposição da reconstrução do $\Delta^{14}\text{C}$ nos últimos 1.000 anos detectados em anéis de árvores (Stuiver *et al.*, 1998) e de corais, trabalhados segundo a metodologia descrita anteriormente. Para que se possam comparar os dados das atividades solares com os das radiocarbônicas, a escala de $\Delta^{14}\text{C}$ foi invertida quando comparada à mesma escala da Figura 2. Dessa forma, como pode ser identificado na Figura 4, um máximo da assinatura do carbono corresponde a um mínimo no número de manchas solares.

É notável a relação inversa entre as atividades solares e as radiocarbônicas detectadas nas árvores e corais. Percebe-se que para um aumento da amplitude das contagens de manchas solares existe uma diminuição na concentração registrada do ^{14}C nesses organismos. Tomando-se como base esta relação, acredita-se que no último

milênio a nossa estrela apresentou algumas épocas em que estava pouco ativa e outras em que sua atividade era elevada. Não obstante, é possível identificar as épocas das ocorrências dos grandes mínimos e máximos das atividades solares na Figura 4 (Damon *et. al.*, 1978). Na mesma figura, é possível inferir cinco mínimos de atividade solar. Os Mínimos de Oort, Wolf, Spörer, Maunder e Dalton. Além desses, percebe-se a presença de dois grandes máximos identificados como o Máximo Medieval e Máximo Moderno. Todos os principais ciclos solares e seus respectivos comprimentos estão resumidos na Tabela 1.

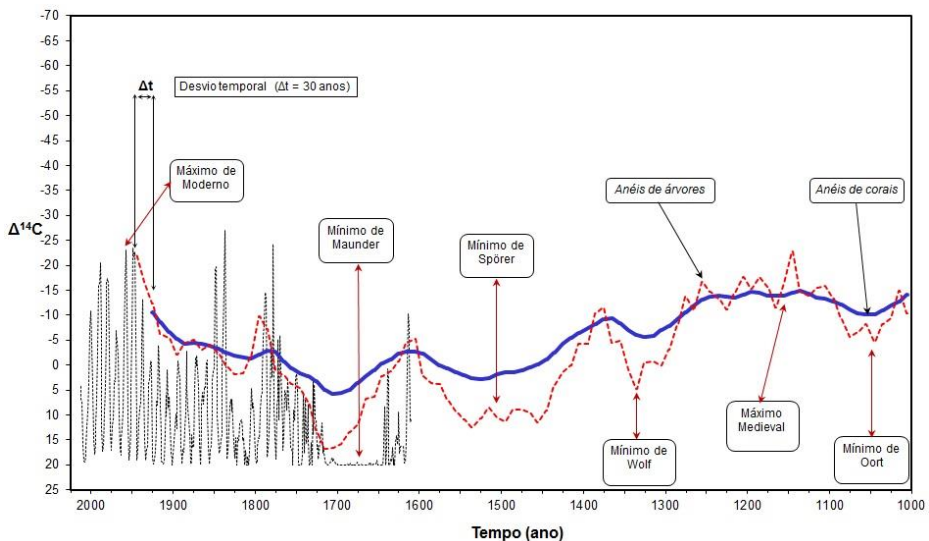


Figura 4 - Detalhes dos registros de $\Delta^{14}\text{C}$ em corais (linha contínua) e em árvores (linha tracejada) para os últimos 1000 anos. As flutuações de grande amplitude em pontilhado, entre 1610 até 2013, referem-se aos dados dos registros de manchas solares R_G . Os dados foram normalizados para a escala adotada,

observando-se, assim, que o máximo em $\Delta^{14}\text{C}$ situa-se no mínimo de R_G .

Análise mais atenta da Figura 4 e da Tabela 1 revela que os mínimos de Dalton e Oort foram menos intensos que os Mínimos de Wolf, Spörer e Maunder, onde se observa que as atividades no Sol diminuíram, mas nem tanto. Todavia, o Máximo Medieval e o Mínimo de Maunder chamam a atenção, pois coincidem com os períodos registrados de anomalias climáticas no planeta, em particular nos momentos em que as temperaturas mais altas e mais baixas foram registradas, respectivamente. Essas constatações históricas podem ser interpretadas como indicadoras da conexão Sol-Terra e da possível relação entre a atividade solar e o clima do planeta.

TABELA 1 - Principais eventos solares com suas datas aproximadas.

Evento	Início (ano)	Fim (ano)	Intervalo (anos)
<i>Mínimo de Oort</i>	1040	1080	40
<i>Máximo Medieval</i>	1100	1250	150
<i>Mínimo de Wolf</i>	1280	1350	70
<i>Mínimo de Spörer</i>	1450	1550	100
<i>Mínimo de Maunder</i>	1645	1715	70
<i>Mínimo de Dalton</i>	1790	1820	30
<i>Máximo Moderno</i>	1950	Até o momento	---

Prosseguindo na análise da Figura 4, percebe-se um desvio sistemático de aproximadamente 30 anos entre as medidas do ^{14}C de árvores e de corais ($\Delta t = 30$). Essa discrepância pode ser justificada devido à diferença temporal entre a absorção do carbono pelas árvores, pois estão em contato direto com a atmosfera, em relação aos corais que necessitam de caminhos mais complexos envolvendo as interações da interface atmosfera e oceano, a composição química deste, além dos processos de assimilação de carbono e biodeposição de carbonatos.

No trabalho desenvolvido por Rigozo et al. (2001) foram levantadas as seguintes hipóteses: 1) Se as contagens de R_G no mínimo de Oort correspondem ao nível no Mínimo de Dalton e ambos foram seguidos pelos Máximos Medieval e Moderno, então seria possível que este padrão pudesse ser reproduzido no futuro? 2) É possível esperar que o atual Máximo Moderno possa ser seguido por três mínimos significativos, tais como foram os mínimos de Wolf, Spörer e Maunder? Essas questões não deixam de ser relevantes, pois se isso ocorrer o clima terrestre poderá ser afetado da mesma forma que foi no passado, com uma tendência de resfriamento para o futuro, o que, em princípio, contradiz as perspectivas climáticas atuais de um aquecimento global (Trenberth et al., 2007; Toledo, 2013).

Com o intuito de inferir uma resposta a esta e outras questões, além de verificar eventuais periodicidades, é relevante interpretar os dados do ^{14}C para épocas ainda mais remotas. Na reconstrução da atividade solar apresentada na Figura 2, tomando como base as medidas de $\Delta^{14}\text{C}$ em recifes de corais, identificou-se que a produção desse radioisótopo foi maior durante 26.000 a 14.000 anos (período correspondente ao Pleistoceno superior, entre 11.500 a 126.000 anos) e veio diminuindo gradativamente até o meio-Holoceno (cerca de 7.000 anos atrás) e foi decrescendo, cada vez mais, até cerca de 1.500 anos atrás. No entanto, uma análise mais cuidadosa da Figura 4 nos revela que o índice de $\Delta^{14}\text{C}$ sofreu flutuações de menor amplitude e com periodicidade menos sensível de quase 200 anos, conhecidas como os “Ciclos de Suess” (Damon &

Sonnett, 1991). Essa mesma característica pode ser verificada na Figura 2, onde podem ser identificados picos menores que ocorreram ao longo de todos os registros históricos do $\Delta^{14}\text{C}$.

A Tabela 2 sintetiza os principais fenômenos relacionados à atividade solar e à conexão Sol-Terra. Todas essas informações deixam evidentes o quanto é difícil explicar, tomando apenas como base os registros do ^{14}C em corais, as causas para todos os fenômenos ocorridos no passado da Terra, mas não deixa de ser um caminho interessante para compreendê-lo e discuti-lo com estudantes e cientistas que atuam na área da climatologia.

TABELA 2 - Fenômenos relacionados à conexão Sol-Terra e a atividade solar *.

Local	Característica	Fraca atividade solar	Forte atividade solar	Diferença
<i>Atmosfera</i>	Clima global	Mais frio	Mais calor	Pequena e sensível
<i>Alta atmosfera</i>	Radiação cósmica galáctica	Maior	Menor	Detectável
	Produção de Carbono	Maior	Menor	Detectável
<i>Magnetosfera</i>	Campo magnético	Menor	Maior	Detectável
<i>Percurso Terra – Sol</i>	Vento solar	Menos partículas	Mais partículas	Grande
<i>Sol</i>	Emissão de energia luminosa	Menor	Maior	Muito pouca
	Emissão de partículas	Menor	Maior	Grande

(*) Adaptado de Nordemann & Rigozo (2003).

É possível questionar ainda que: Se o Mínimo de Maunder ocorreu durante a fase mais fria da Pequena Idade do Gelo, o que se pode dizer sobre a temperatura global durante outros mínimos de manchas solares? Na mesma linha desse questionamento emerge outra pergunta: Durante os máximos das manchas solares nesse período remoto, como se comportou a temperatura global do planeta?

Para essas e outras questões, ainda não existem respostas definitivas, porém não deixam de ser intrigantes. Daí a importância de estudos em isótopos cosmogênicos, em diversas localidades da Terra, para que se possam inferir as variações ocorridas na atmosfera e biosfera devido ao comportamento do Sol ao longo do tempo.

Método da Máxima Entropia e análise espectral

Para a determinação de frequências em séries temporais com poucos dados o Método da Máxima Entropia (MME) é um procedimento que oferece excelente precisão (Wu, 1997). Realizando as análises espectrais dos anéis de crescimento de corais sobre as medidas dos registros de $\Delta^{14}\text{C}$ e aplicando esse método, puderam-se obter os espectros da densidade de potência, como mostrado na Figura 5. A figura revela a ocorrência de vários picos proeminentes entre 2.400 e 80 anos. O pico de 88 anos é justificado devido aos denominados Ciclos de Gleissberg (70-100 anos) e aparece como resultado da modulação da amplitude dos Ciclos de Schwabe de 11 anos. A periodicidade de 22 anos (Ciclos de Hale) não aparece evidente na Figura 5, mas, como justificado anteriormente, é causada pela inversão dos polos magnéticos existentes nas manchas solares. Presume-se que seja o resultado da modulação da amplitude dos Ciclos de Schwabe. Em contrapartida, os dois proeminentes ciclos de 208 e 232 anos podem ser o resultado da modulação dos Ciclos de Hallstatt de quase 2.240 anos.

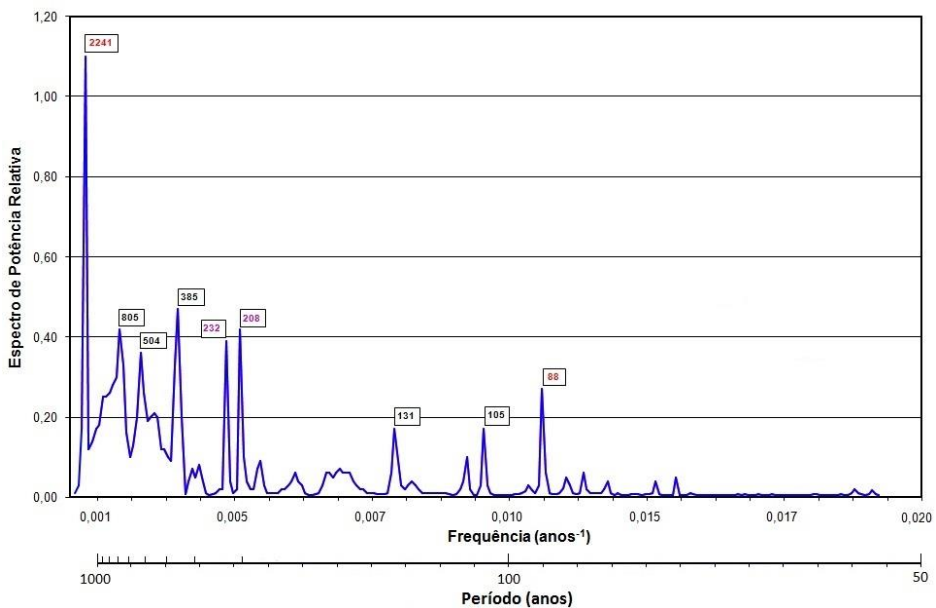


Figura 5 - Espectro de potência obtido pelo Método de Máxima Entropia (MME) calibrado para os registros de $\Delta^{14}\text{C}$ em anéis de corais.

Todos os principais ciclos solares encontrados como resultados da aplicação do MME, mostrados na forma de picos na Figura 5, estão com suas informações resumidas na Tabelas 3.

TABELA 3 - Características dos principais ciclos solares inferidos pelos registros de $\Delta^{14}\text{C}$.

Comprimento do ciclo	Nome do ciclo	Última anomalia do ^{14}C
2.241	<i>Hallstatt</i>	2000 (a.C.)
232	-- ? --	1922
208	<i>Suess</i>	1898
88	<i>Gleisberg</i>	1986
22	<i>Hale</i>	???
11	<i>Schwabe</i>	???

As informações contidas na Figura 5 e na Tabela 3 revelam o quanto é difícil, tomando como base apenas os registros do ^{14}C em corais, explicar as causas para todos os fenômenos ocorridos no passado da Terra. No entanto, os estudos em radioisótopos, e não apenas para ^{14}C , como também para ^{10}Be , ^{18}O e ^{36}Cl , são procedimentos eficientes para inferir as variações ocorridas na atmosfera e na biosfera terrestre em escala milenar, além de representarem uma das maneiras para se verificar a influência solar sobre nosso planeta.

Considerações a respeito das incertezas nas medidas do ^{14}C

Uma vez que a calibração das idades pelo método do carbono para o calendário convencional se tornou mais confiável para um período menor que cerca de 40.000 anos atrás, as idades obtidas pela técnica do ^{14}C são capazes de esclarecer, cronologicamente, eventos deste importante e pouco conhecido período da história da atividade solar. Com isso, torna-se possível verificar, com melhor precisão, os acontecimentos ocorridos na história da Terra, tanto do ponto de vista da geofísica planetária quanto da evolução da biosfera e dos oceanos.

A técnica de datação pelo ^{14}C é, em última análise, limitada pela incapacidade de medir reduzidíssimas quantidades de ^{14}C . Isto se torna ainda mais difícil após sete meias-vidas (cerca de 38.900 anos) se terem passado, pois somente cerca de 1% do ^{14}C original ainda se encontra presente na amostra.

Este cenário, aparentemente simples, complica-se por mais dois fatores fundamentais: O primeiro refere-se ao fato de que, enquanto organismos vivos se valem da fotossíntese para crescer, tais como os corais, que apresentam atividade ^{14}C em equilíbrio dinâmico com o reservatório atmosférico, outros organismos assimilam “carbono velho”, isto é, aquele carbono que já se encontra em decaimento ou impossibilitado de entrar em equilíbrio com a atmosfera. Dessa forma, as fontes de carbono apresentam uma atividade de ^{14}C comparativamente menor no momento em que é incorporado à cadeia alimentar. Na maior parte desses casos, esse efeito é

pequeno na biosfera terrestre e pode ser desprezado para o propósito de datação de amostras antigas. O segundo fator se deve à atividade de ^{14}C na atmosfera, que não se manteve constante através do tempo. Isso se deve ao fluxo de raios cósmicos que, alcançando o topo da atmosfera, não é constante como inicialmente se previra. Consequentemente, a produção de ^{14}C na atmosfera terrestre varia com o passar do tempo. Essa quantidade de ^{14}C no ar atmosférico, assim também como nos oceanos, modificou-se no passado de acordo com as mudanças nos padrões das dinâmicas desses meios.

Assim, o que denominamos como “idade convencional de ^{14}C ”, em anos passados, não equivale diretamente aos anos do calendário convencional ao qual estamos acostumados. De fato, um ano ^{14}C pode ser equivalente a mais do que um período de anos no calendário convencional. Para que a datação por ^{14}C apresente resultados confiáveis, o carbono remanescente no “organismo morto” deve ter permanecido isolado de posteriores adições de carbono, uma vez que essas adições alterariam a idade ^{14}C calculada. Na maioria dos casos, essa situação ideal não ocorre, e tal contaminação pode ser difícil de ser detectada e removida.

Mesmo cientes dessas dificuldades, o presente trabalho mostra, por meio de medidas do ^{14}C em anéis de corais, que é possível inferir os principais ciclos que ocorreram no Sol ao longo dos últimos milênios. A determinação exata desses ciclos requer uma análise matemática dos erros envolvidos, o que ainda está longe de ser uma tarefa trivial.

Conclusões e Perspectivas

O trabalho aqui exposto apresenta alguns resultados das periodicidades existentes na atividade solar, por meio de contagens dos registros de manchas solares medidas de forma direta para os últimos 403 anos e das cronologias dos índices da concentração relativa de carbono ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$) em amostras de corais para até cerca de 26.000 anos atrás. Nos períodos pertinentes a essas análises evidenciou-se uma boa correlação entre as periodicidades nas atividades radiocarbônica e solar. Estendendo essas análises no tempo, foi possível verificar como o antepassado da atividade solar se comportou e associar este comportamento com os registros históricos do clima terrestre.

Neste sentido, ao investigar o comportamento das curvas de ^{14}C em função do tempo foi possível encontrar não só a correlação entre os ciclos solares, mas também períodos de baixas e altas temperaturas na Terra associados às épocas de ocorrências dos grandes mínimos e máximos das atividades solares. Desta maneira, pode-se concluir que os ciclos solares, como os registrados nas variações de ^{14}C , servem como indicadores empíricos do clima terrestre.

Com as informações aqui apresentadas não se pode prever o que acontecerá

com a biodiversidade como um todo, mas especulações sobre os efeitos mais evidentes podem ser inferidas. Locais na Terra contendo recifes de corais, como as Maldivas, Barreira de Corais na Austrália, parte do Caribe, litoral do nordeste brasileiro, dentre outros, passaram por um desenvolvimento geofísico e ambiental extraordinário, visto que, durante a última Era Glacial (cerca de 12.000 anos atrás), o recuo do mar fez com que várias áreas contendo recifes coralíneos se elevassem para mais de 100 metros acima da superfície da água. Atualmente, os pontos culminantes dessas elevações encontram-se apenas a alguns metros (1 a 3) acima da linha d'água do mar, o que acarreta uma preocupação para muitos países, pois há uma expectativa de eventuais perdas territoriais e da biodiversidade, caso se concretize a elevação dos oceanos, em decorrência do propalado aquecimento global.

Apesar da existência de muitas controvérsias a respeito da influência humana sobre o clima terrestre, o Quarto e Quinto Relatório Científico do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (na sigla em inglês: IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) (Trenberth et al., 2007; Toledo, 2013), apresentam evidências de variações dos parâmetros climáticos, desde meados da década de 1970, sendo possível afirmar, inequivocamente, que uma parte da variabilidade do clima seja uma consequência do atual aquecimento global observado.

Portanto, reitera-se a importância da divulgação e debate, principalmente no meio acadêmico, sobre questões como as que aqui se abordaram, pois há fortes evidências de que haverá, caso não ocorra uma conscientização e mobilização rápida das pessoas sobre as questões ambientais, um colapso no sistema marinho afetando drasticamente a vida aquática e, talvez, outras formas de vida.

Além de trabalhos de conscientização, constata-se também a necessidade de ampliar os estudos na linha aqui apresentada, que tomou como referência as medidas e as bases de dados obtidas com recifes coralíneos. Estudos com essa perspectiva possibilitam fazer um prognóstico consistente das alterações geradas pelos impactos das mudanças climáticas globais nesses ecossistemas, que são comuns em alguns pontos das costas marítimas do Brasil, e podem ser somados aos estudos climáticos desencadeados por muitos pesquisadores que exploram as evidências de mudanças nos regimes das temperaturas do ar, precipitações pluviométricas, vazões de rios, emissões de gases do efeito estufa, uso indevido do solo, dentre outros.

Agradecimentos

O autor agradece à equipe de radiologia do Hospital das Clínicas da UNICAMP, em particular a Osias Moreira da Silva, técnico responsável pela operação da máquina de raio-X, a hospitalidade da equipe do Keck-Carbon Cycle (MAS) da Universidade da Califórnia, em Irvine, Estados Unidos, além da PUC-Campinas, pelos recursos disponibilizados para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bard, E.; Arnold, M.; Mangerud, J.; Paterne, M.; Labeyrie, L.; Duprat, J.; Melieres, M.-A.; Sonstegaard, E. & Duplessy, J.-C. (1998). The north atlantic atmosphere-sea surface ^{14}C gradient during the younger dryas climatic event. *Earth and Planetary Science Letters, 126*(4), 275-287.
- Bard, E.; Frank, M. (2006). Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters, 248*(1), 1-14.
- Barnes, D. J.; Crossland, C. J. (1977). Coral calcification: sources of error in radioisotope techniques. *Mar. Biol., 42*, 119-129.
- Barnes, D. J. & Devereux, M. J. (1984). Productivity and calcification on a coral reef: a survey using pH and oxygen electrode techniques. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 9*, 213-231.
- Barnes, D. J.; Lough, J. M. (1996). Coral skeletons: storage and recovery of environmental information. *Glob. Change Biol., 2*, 569-582.
- Beer, J.; Siegenthaler, U.; Bonani, G.; Finkel, R. C.; Oeschger, H.; Suter, M. & Wölfli, W. (1988). Information on past solar activity and geomagnetism from ^{10}Be in the Camp Century ice core. *Nature, 331*, 675-679.
- Broecker, W. S. (1997). Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO_2 upset the current balance? *Science, 278*, 1582-1588.
- Chadwick-Furman, N. E. (1996). Reef coral diversity and global change. *Glob. Change Biol., 2*, 559-568.
- Damon, P. E.; Lerman, J. C. & Long, A. (1978). Temporal fluctuations of atmospheric ^{14}C : Causal factors and implications. *Annual Review of Earth Planetary Science, 6*, 457-494.
- Damon, P. E. & Sonnett, C. P. (1991). Solar and terrestrial components of the atmospheric ^{14}C variation spectrum. In: Sonnett, C. P., Giampapa, M. S. and Matthews, M. S. (Eds). *The sun in time*. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press, pp.360-388.
- Délibrias, G. (1985). Le carbone 14. In: *Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels: applications*. Eds: Roth E. & Poty B., Collection CEA, Masson (Paris), pp.421-458.
- Demers, C.; Reggie Hamdy, C.; Corsi, K.; Chellat, F.; Tabrizian, L. & Yahia, L. (2002). Natural coral exoskeleton as a bone graft substitute: a review. *Biomed. Mater. Eng., 12*, 15-35.
- de Moraes, O. C. C. (2004). Ameaça na Floresta Submersa: mudanças climáticas põem em risco simbiose que sustenta recifes de coral. *Scientific American - Brasil, 24*, 23-27.
- de Vries, H. (1958). Variations in concentration of radiocarbon with time and location on earth. In: *Proc. Kononkl. Ned. Akad. Wetenschap Ser., B61*, 94-102.
- Douglass, A. E. (1928). *Climatic cycles and tree growth. vol. II*. Washington, D.C: Carnegie Institute of Washington Publications.
- Eddy J. A. (1976). The Maunder Minimum. *Science, 192*, 1189-1202.
- Evin, J. (2002). Le radiocarbone. In: Miskowski, J. C. (Ed.). *Géologie de la Préhistoire*. Perpignan: GEOPRE, 1181-1197.
- Fontugne, M. (2004). Os últimos avanços na calibragem das idades radiocarbono permitem uma revisão das cronologias entre 25 e 50.000 anos BP? In: *1º. Encontro da Física e Arqueologia na Região do Parque Nacional Serra da Capivara: descobertas e datações*. FUMDHAM Consultado em: 22/10/2013 Disponível em: <www.fumdam.org.br/fumdhamentos/artigos.html>.
- Fung, F. M. Y. & Ding, J. L. (1998). A novel antitumour compound from the mucus of a coral, *Galaxea fascicularis*, inhibits topoisomerase I and II. *Toxicol., 36*, 1053-1058.
- Gattuso, J.-P.; Allemand, D. & Frankignoulle, M. (1999). Photosynthesis and calcification at cellular, organismal, and community levels in coral reefs: a review on interactions and control by carbonate chemistry. *Am. Zool., 39*: 160-183.
- Gnevyshev, M. N. (1967). On the 11-years cycle of solar activity. *Solar Physics, 1*(1), 107-120.
- Guyodo Y. & Valet J.-P. (1996). Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years. *Earth and Planetary Science Letters, 143*, 23-36.
- Hathaway, D. H.; Wilson, R. M. & Reichmann, E. J. (2002). Group sunspot numbers: sunspot cycle characteristics. *Solar Physics, 211*, 357-370.
- Hoyt, D. V. & Schatten, K. H. (1997). *The Role of the Sun in Climate Change*, New York, Oxford: University Press.
- Hughen, K. A.; Baillie, M. G. L.; Bard, E.; Beck, J. W.; Bertrand, C. J. H.; Blackwell, P. G.; Buck, C. E.; Burr, G. S.; Cutler, K. B.; Damon, P. E.; Edwards, R. L.; Fairbanks, R. G.; Friedrich, M.; Guilderson, T. P.;

- Kromer, B.; McCormac, G.; Manning, S.; Ramsey, C. B.; Reimer, P. J.; Reimer, R. W.; Remmele, S.; Southon, J. R.; Stuiver, M.; Talamo, S.; Taylor, F. W.; van der Plicht, J. & Weyhenmeyer, C. E. (2004). Marine10 marine radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon, 46*(3), 1056-1086.
- Nordemann, D. J. R. & Rigozo, N. R. (2003). Árvores contam uma história do Sol. *Scientific American Brasil, 14*, 31-37.
 - Pittock, A. B. (1999). Coral reefs and environmental change: Adaptation to what? *Am. Zool., 39*, 10-29.
 - Rigozo, N. R.; Echer, E.; Vieira, L. E. A. & Nordemann, D. J. R. (2001). Reconstruction of Wolf sunspot numbers on the basis of spectral characteristics and estimates of associated radio flux and solar wind parameters for the last millennium. *Solar Physics, 203*, 179-191.
 - Schuhmacher, H. & Zibrowius, H. (1985). What is hermatypic? A redefinition of ecological groups in corals and other organisms. *Coral Reefs, 4*, 1-9.
 - Smith, S. V. & Buddemeier, R. W. (1992). Global change and coral-reef ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Syst., 23*, 89-118.
 - Spalding, M. D.; Ravilious, C. & Green, E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. Berkeley. University of California Press.
 - Stuiver, M.; Reimer, P. J. & Braziunas, T. F. (1998). High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon, 40*, 1127-1151.
 - Stuiver, M. & Quay, P. (1980). Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Science, 207*, 11-19.
 - Toledo, K. (2013). Quinto relatório do IPCC mostra intensificação das mudanças climáticas. Agência FAPESP. Consultado em 30/09/2013. Disponível em:> www.agencia.fapesp.br/17944.
 - Trenberth, K.E.; Jones, P.D.; Ambenje, P.; Bojariu, R.; Easterling, D.; Klein O.; et al. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; et al. (eds.) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 237-336.
 - Tric E.; Valet J. P.; Tucholka P.; Paterne M.; Labeyrie L.; Guichard F.; Tauxe L. & Fontugne M. (1992). Paleointensity of the geomagnetic field during the last 80 thousand years. *Journal Geophysical Research, 97*(B6), 9337-9351.
 - van der Plicht, J.; Bard, E.; Beck, J. W.; Baillie, M. G. L.; Blackwell, P. G.; Buck, C. E.; Friedrich, M.; Guilderson, T. P.; Hughen, K. A.; Kromer, B.; McCormac, F. G.; Bronk Ramsey, C.; Reimer, P. J.; Reimer, R. W.; Remmele, S.; Richards, D. A.; Southon, J. R.; Stuiver, W. & Weyhenmeyer, C. E. (2004). NotCal04 – Comparison/Calibration ^{14}C records 26–50 cal kyr BP. *Radiocarbon, 46*(3), 1225-1238.
 - Vanlommel, P.; Cugnon P.; Van Der Linden R. A. M.; Berghmans D.; Clette F. (2004). The SIDC: world data center for the sunspot index. *Solar Physics, 224*, 113-120.
 - Waldmeier, M. (1961). *The sunspot activity in the years 1610-1960*. Zürich, Switzerland: Schulthess and Company AG.
 - Wilkinson, C. R. (2000). Worldwide coral reef bleaching and mortality during 1998: A global climate change warning for the new millennium? In: C. Sheppard (Ed.). *Seas at the Millennium, an environmental evaluation, vol. 3*, 43-57. Amsterdam: Elsevier.
 - Wu, N (1997). *The Maximum Entropy Method*. Springer Series in Information Sciences. Thomas S. Huang (Ed.). Berlin. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.

Recebido: 15 de março de 2014.

Aceite: 28 de julho de 2014.