

CAPÍTULO 8

GEOCRONOLOGIA E DATAÇÃO POR RADIONUCLÍDEOS, UM ESTUDO DE CASO: REPRESA PAIVA CASTRO (SISTEMA CANTAREIRA- MAIRIPORÃ- SÃO PAULO)

Paulo Alves de Lima Ferreira¹, Sheila Cardoso-Silva², Marcelo Pompêo³ & Rubens Cesar Lopes Figueira¹

1 - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 2 - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Sorocaba, Sorocaba, Brasil. 3 - Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
E-mail: paulo.alves.ferreira@hotmail.com

RESUMO

Análises em perfil dos sedimentos de lagos e represas são capazes de prever as condições pretéritas destes ecossistemas e determinar como o ambiente mudou como resultado das atividades antrópicas. Desta forma podem ser utilizados como importantes ferramentas na gestão dos recursos hídricos. Diversas etapas são necessárias para que estes estudos sejam bem sucedidos como a definição do local de amostragem e dos indicadores ecológicos a serem analisados, o uso de equipamentos apropriados e o método de datação aplicado, este último de fundamental importância. Este trabalho detalha o processo da datação por meio do ^{210}Pb e o modelo CIC e em seguida descreve o processo de datação em um testemunho coletado na represa Paiva Castro, um dos cinco reservatórios formadores do sistema Cantareira (São Paulo-Brasil). O processo de datação mostrou-se adequado e permitiu evidenciar dois períodos com taxa de sedimentação distinta, uma fase anterior, com menores taxas de sedimentação e outra posterior à operação da represa. O testemunho coletado abrangeu um período aproximado de cem anos.

1 INTRODUÇÃO

1.1 SEDIMENTOS AQUÁTICOS: UM REGISTRO DOS ACONTECIMENTOS PASSADOS

Os sedimentos de lagos e reservatórios funcionam como um arquivo de diversos acontecimentos autóctones e alóctones ao longo do tempo (XUE et al., 2007). Análises em perfil deste compartimento são capazes de prever as condições pretéritas do ecossistema, identificando períodos de impacto antrópico e fornecendo subsídios para a melhor compreensão do presente.

A reconstituição ambiental a partir dos sedimentos pode se dar em diferentes escalas de tempo, desde algumas décadas a centenas de milhares de anos. Em escalas de tempo mais largas os estudos de reconstituição ambiental nos ecossistemas aquáticos continentais, ou estudos paleolimnológicos, podem ser usados para prover arquivos extremamente detalhados das alterações climáticas, tectônicas e evolução biológica na superfície da terra (COHEN, 2003).

Numa escala de tempo curta, em sedimentos muitos recentes - de algumas décadas até 100 ou 200 anos, período em que os impactos antrópicos são geralmente mínimos, dependendo da região a ser analisada - a reconstituição do histórico ecossistêmico pode fornecer informações valiosas para gerenciadores (COHEN, 2003). As informações obtidas nestes estudos são particularmente importantes em áreas onde há carência de dados históricos, isto porque permite estabelecer o quão alterado está um ambiente em relação a uma condição prístina e assim associar essas mudanças à atividade humana (Figura 1). Podem também suprir deficiências da análise de dados acumulados em diferentes trabalhos numa dada região, como, por exemplo, mudanças nos pontos de amostragem, utilização de diferentes métodos analíticos com diferentes limites de detecção, além da ausência de valores em alguns períodos (BENNION; BATTARBEE, 2007).

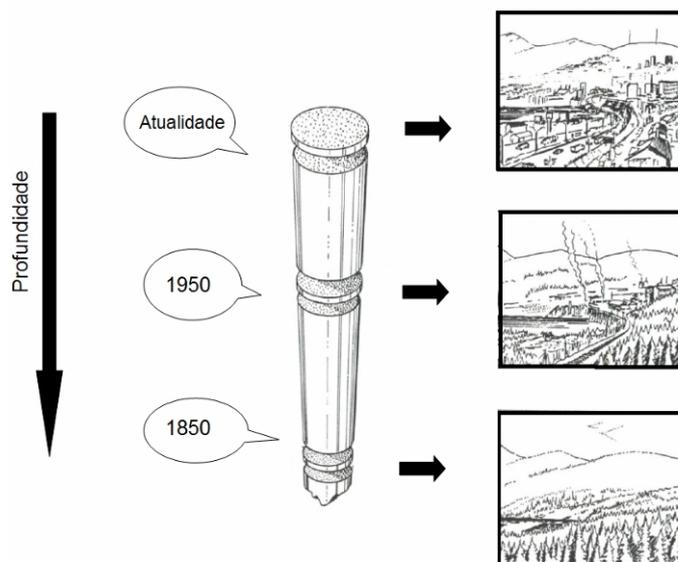


Figura 1: Testemunho sedimentar mostrando mudanças antrópicas ao longo do tempo (modificado de SMOL, 2008).

Atualmente, o uso da reconstituição ambiental como ferramenta auxiliar na gestão dos recursos hídricos vem sendo bastante difundido, principalmente pela União Europeia (UE), após a implementação da DQA (Diretiva Quadro da Água), o sistema de gerenciamento de recursos hídricos europeu (RÄNASEN et al., 2006; KELLY, 2008). A DQA tem como meta o alcance do estado ecológico bom, ou seja, um estado em que os impactos antrópicos sobre o corpo hídrico sejam mínimos. Para se estabelecer o bom estado ecológico é necessário estabelecer as condições prístinas e, para isto, uma das recomendações da DQA é utilizar estudos que adotem abordagem paleolimnológica. Relativo à aplicação da DQA no Brasil, uma revisão pode ser observada em Cardoso-Silva et al. (2013).

Quanto maior o número de indicadores ecológicos analisados (abordagem multi-proxy) melhor será a reconstituição ambiental. Normalmente são analisados os seguintes materiais nos sedimentos: pólen, frústulas de diatomáceas, restos de quitina de zooplâncton, quironomídeos, escamas e vértebras de peixes, espículas de esponjas, restos de vegetação e carvão, substâncias orgânicas como pigmentos, além de nitrogênio, fósforo, carbono e metais (TUNDISI, 2008).

A abordagem paleolimnológica é bastante difundida em lagos (ANDERSEN et al., 2004) podendo ser aplicada também em represas (FÁVARO, 2007). Apesar de sua importância, no Brasil, são poucos os estudos que adotam essa abordagem, podendo ser citados: Pessenda et al., (2010) que trabalhou na Lagoa Grande, localizada no Parque Estadual do Alto do Ribeira em São Paulo; Jesus (2008) e Costa-Böddeker et al., (2012) no Lago das Garças, localizado na região Metropolitana do Estado de São Paulo e mais recentemente Silva (2013) na represa Guarapiranga e Cardoso-Silva na represa Paiva Castro. Pessenda et al., (2010) analisaram grãos de pólen e a composição isotópica da matéria orgânica em um período de pouco mais de mil anos. Jesus (2008) focou a análise, de metais traço e compostos orgânicos, nos últimos cem anos, enquanto Costa-Böddeker et al., (2012) e Silva (2013) focaram a análise de diatomáceas e nutrientes, inferindo sobre o histórico trófico das represas. Já Cardoso-Silva (2013) analisou o histórico da contaminação por metais na represa Paiva Castro (Mairiporã, São Paulo). Portanto, são ainda muito poucos os estudos que adotam essa abordagem no Brasil.

Na maioria das vezes, estes estudos focam apenas a análise de um ou poucos testemunhos, isto porque as análises de reconstituição ambiental consomem grande tempo. Há diversas etapas que devem ser cumpridas num estudo que adote uma abordagem paleolimnológica, sendo importante considerar (COHEN, 2003; SMOL, 2008):

1. A escolha do local de estudo para responder uma determinada questão e do ponto de amostragem. Em geral, dependendo do objetivo do estudo, é amostrada a região mais profunda de lagos e a região limnética de reservatórios, ambas áreas de sedimentação;
2. O tipo de equipamento para efetuar a amostragem e como seccionar a coluna de sedimento;
3. Como efetuar a datação;
4. Quais proxies (indicadores ecológicos) serão analisados.

A datação, que é o conjunto de datas de deposição das diferentes camadas sedimentares de uma dada coluna sedimentar ou testemunho, é uma das primeiras e mais importantes etapas em estudos de reconstituição ambiental a partir dos sedimentos. Sem uma datação confiável, o tempo correto dos eventos ocorridos não pode ser estabelecido. Existe uma variedade de técnicas para se determinar idades absolutas, incluindo métodos de datação radiométricos e métodos químicos (COHEN, 2003). Cada técnica é adotada dependendo dos objetivos a serem atingidos, da precisão requerida, da litologia e do custo disponível para as análises. Técnicas radiométricas, baseadas no decaimento de isótopos radiativos são as formas amplamente utilizadas nos estudos paleolimnológicos. Para o período do Quaternário, os estudos focam o uso de datações com ^{14}C ; para sedimentos recentes, as datações com ^{210}Pb são as mais utilizadas.

Devido à sua importância e ampla aplicação, neste artigo, será abordado o processo de datação a partir do radionuclídeo ^{210}Pb e será utilizado como estudo de caso a datação efetuada em um testemunho coletado no reservatório Paiva Castro (Mairiporã, SP, Brasil).

1.2 DATAÇÃO COM ^{210}Pb

1.2.1 O radionuclídeo ^{210}Pb

O ^{210}Pb é um isótopo radioativo de chumbo. Ele é um radionuclídeo natural e tem como características meia-vida de aproximadamente 22,3 anos, que pode ser considerada curta se comparada com outros nuclídeos naturais como ^{238}U e ^{232}Th , e decaimento para ^{210}Bi por emissão α (TYLMANN, 2004).

Este isótopo é um dos elementos da série de decaimento do ^{238}U . ^{226}Ra , elemento da série do ^{238}U , decai para ^{222}Rn , um gás que escapa dos sedimentos para a atmosfera e retorna para os solos, sedimentos e água ao decair para ^{210}Pb e sofrer precipitação (Figura 2).

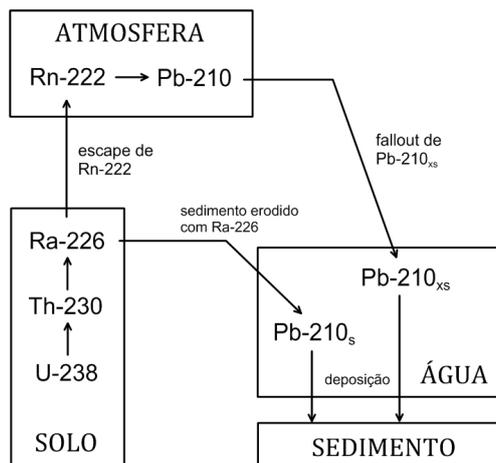


Figura 2: Ciclo hidroequímico do ^{210}Pb . $\text{Pb-210}_{\text{xs}}$ é o ^{210}Pb não-suportado, enquanto que Pb-210_{s} é o ^{210}Pb suportado.

Assim, o ^{210}Pb em uma coluna de sedimento é resultante de dois sinais diferentes: o proveniente da atmosfera, que é chamado de não-suportado (unsupported) ou alóctone e está estritamente conectado aos processos sedimentares; e o produzido na própria matriz sedimentar pelo decaimento de ^{226}Ra sem o escape de ^{222}Rn , que é o dito suportado (supported).

Dessa forma, o ^{210}Pb não-suportado ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) pode ser mensurado pela diferença entre ^{210}Pb total na amostra e ^{210}Pb suportado, que, por estar em equilíbrio radioativo com seus precursores na série do ^{238}U , pode ser mensurado por algum dos nuclídeos-pai, como o próprio ^{226}Ra (NOLLER, 2000; LUBIS, 2006).

1.2.2 Medição do ^{210}Pb

A detecção e mensuração do ^{210}Pb pode ser realizada pela detecção de partículas radioativas emitidas pelos radionuclídeos da série do ^{238}U . Por espectrometria α , a espécie radioativa medida é o ^{210}Po (meia-vida de 138,3 dias), radionuclídeo filho de ^{210}Bi , que é produto do decaimento radioativo do ^{210}Pb . Já por espectrometria β , o nuclídeo analisado é ^{210}Bi (meia-vida de 5,0 dias). Ambas só realizadas quando alcançado equilíbrio radioativo entre os pais e filhos de interesse.

As grandes desvantagens de ambos estes métodos analíticos é a baixa resolução dos detectores e a necessidade de separação radioquímica das amostras, devido à presença de outros radionuclídeos emissores de partículas α e β em matrizes ambientais como sedimentos.

Com o advento dos detectores de Ge-Li (germânio-lítio) e, posteriormente, de Ge hiperpuro, que são detectores de alta resolução capazes de detectar partículas α , houve um salto de melhoria nas medidas de radionuclídeos, e isso não foi diferente para os nuclídeos da série do ^{238}U , com grande número de elementos emissores α . O próprio ^{210}Pb é um emissor β , e é por esta técnica analítica que, atualmente, ele é mais medido.

A espectrometria β tem como vantagens a sua alta resolução, ser uma técnica sensível e possibilitar a medição em amostras sem nenhum tratamento químico ou radioquímico. Amostras de sedimento em estado bruto podem ser diretamente analisadas após a uniformização de sua granulometria, que pode ser feito por maceração em um moinho de porcelana ou de ágar. Entretanto, a grande desvantagem desta técnica é o tempo, pois cada amostra deve ser analisada no detector de partículas β por cerca de 50.000 s (equivalente a cerca de 14 h) para que o limite de detecção do método (dependente do tempo de contagem) passe a ser aceitável.

Quanto à resolução temporal de modelos de datação com ^{210}Pb , tendo em vista que a meia-vida do ^{210}Pb é de 22,3 anos, a resolução temporal é de cerca de 150 anos, já que o limite de

detecção do ^{210}Pb não-suportado é alcançado nas amostras com essa idade. Isso se dá pois, após a sedimentação de uma dada camada sedimentar cessa o aporte de ^{210}Pb não-suportado, e com o tempo esse radionuclídeo passa a decair para, eventualmente, após cerca de 7 meias-vidas (no caso, cerca de 150 anos), o sinal da atividade deste radionuclídeo torna-se inferior ao limite de detecção da espectrometria .

1.2.3 Modelos para datação com ^{210}Pb

A variação temporal na atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, que se dá na forma de um decaimento exponencial em função do tempo, tem como fator de decaimento um valor resultante de uma relação entre a meia-vida deste radionuclídeo e da taxa de sedimentação local. É com base nessa relação que modelos matemáticos buscam determinar taxas de sedimentação e estabelecer datação para colunas sedimentares.

A maior parte destes modelos foi desenvolvida para a determinação de taxas de sedimentação locais em corpos de água. Entretanto, dos valores de taxa de sedimentação, se assumidos constantes ou lineares, a datação de sedimentos pode ser facilmente extraída.

Existem diversos modelos que relacionam a atividade de ^{210}Pb não-suportado com taxas de sedimentação recente e desenvolvem cálculos para datação. Destacam-se os modelos CIC (Constant Initial Concentration) (ROBBINS; EDGINGTON, 1975), CRS (Constant Rate of Supply) (APPLEBY; OLDFIELD, 1978) e CFCS (Constant Flux, Constant Sedimentation) (APPLEBY; OLDFIELD, 1992).

Os modelos CIC e CRS são os mais utilizados em estudos paleolimnológicos (SMOL, 2008). O modelo CIC é de fácil aplicação e não necessita da informação referente ao inventário total de ^{210}Pb não-suportado e da porosidade do sedimento, informações necessárias para a aplicação do modelo CRS (SHUKLA; JOSHI, 1989). A grande vantagem do modelo CRS é a possibilidade de cálculo de variações na taxa de sedimentação de um ambiente aquático, entretanto o modelo CIC pode ser aplicado por secções de testemunhos, calculando um valor médio de taxa de sedimentação para cada um dos intervalos separados, o que simplifica os cálculos envolvidos em relação ao CRS. O estudo de caso mostra uma aplicação do modelo CIC para um caso em que houve variação na taxa de sedimentação local de um reservatório de água.

1.2.4 Modelo CIC

O modelo CIC (Constant Initial Concentration) (ROBBINS; EDGINGTON, 1975) baseia-se nos princípios de que existe uma atividade inicial constante de ^{210}Pb não-suportado na amostra de sedimento e que há um aporte constante de sedimentos para o local. Assim, este modelo resulta em um valor médio de taxa de sedimentação para o período amostrado no testemunho, sem dados acerca de variações temporais na taxa de sedimentação. Essas premissas são próprias para a determinação de datação de sedimentos em reservatórios, por estes serem corpos estáveis cujas variações temporais na taxa de sedimentação são insignificantes perante o intervalo de tempo estudado através do radionuclídeo ^{210}Pb (cerca de 150 anos).

Por este modelo, a taxa de sedimentação pode ser calculada por meio da Equação 1:

$$v = \frac{Z}{\ln \left[\frac{(A_{\text{Pb}_{\text{xs}}})}{(A_{\text{Pb}_{\text{xs}}})_0} \right]} = \frac{Z}{-a} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

v = taxa de sedimentação (em cm ano^{-1});

$A_{\text{Pb}_{\text{xs}}}$ = atividade de ^{210}Pb não-suportado na base do testemunho (em Bq kg^{-1});

$(A_{\text{Pb}_{\text{xs}}})_0$ = atividade de ^{210}Pb não-suportado no topo do testemunho (em Bq kg^{-1});

= constante de decaimento radioativo de ^{210}Pb (que equivale a $3,11 \times 10^{-2} \text{ ano}^{-1}$) e

Z = tamanho da coluna sedimentar (em cm).

Outra forma de acessar o valor da taxa de sedimentação é através do coeficiente angular (a) da reta de regressão: $z = a \cdot \ln(^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}) + b$, em que z são os valores de profundidade (em cm).

Para determinar o valor da atividade de ^{210}Pb não-suportado ($A_{\text{Pb}_{\text{xs}}}$), esta é a diferença entre a atividade total de ^{210}Pb ($A_{\text{Pb}_{\text{total}}}$) e a atividade média de ^{226}Ra ($A_{^{226}\text{Ra}}$), que equivale ao ^{210}Pb suportado na coluna sedimentar, conforme a Equação 2.

$$A_{\text{Pb}_{\text{xs}}} = A_{\text{Pb}_{\text{total}}} - A_{^{226}\text{Ra}} \quad (\text{Equação 2})$$

Tendo em vista que o modelo CIC assume que o valor de taxa de sedimentação é constante, deste valor pode-se extrair a datação do testemunho, através da Equação 3:

$$D = D_0 - \frac{z}{v} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

D = ano de deposição da amostra (em ano);

D_0 = ano de coleta da amostra (em ano);

z = profundidade da amostra na coluna sedimentar (em cm) e

v = taxa de sedimentação (em cm ano^{-1}).

2 ESTUDO DE CASO: RESERVATÓRIO PAIVA CASTRO (MAIRIPORÃ, SP, BRASIL)

Localizado ao norte da Grande São Paulo, no sistema do Alto Tietê e na sub-bacia do Rio Juquery, o reservatório Paiva Castro (Figura 3) faz parte do Sistema Cantareira, atualmente o maior sistema de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com capacidade de produção de 33 mil litros de água por segundo para um total de cerca de 8,8 milhões de pessoas (46% da população da RMSP) (WHATELY; CUNHA, 2007).

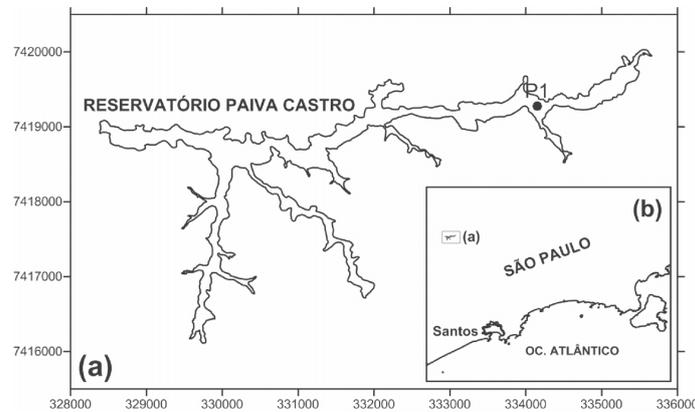


Figura 3: Reservatório Paiva Castro (a), localizado no Estado de São Paulo, Brasil (b). Ponto preto corresponde ao local de coleta do testemunho P1.

O sistema de derivações por gravidade Cantareira é composto por cinco reservatórios: Jaguari, Jacaré, Atibainha, Cachoeirinha e Paiva Castro (SABESP, 2013), interligados por túneis artificiais subterrâneos, canais e bombas, com extensão total de aproximadamente 48 km (SABESP, 2013).

As obras para implantação do sistema Cantareira iniciadas na década de 1960 compreenderam duas etapas. A primeira fase em 1965, culminou com a construção do reservatório Paiva Castro em 1973 e dos reservatórios Atibainha e Cachoeira em 1974. A segunda, iniciada em 1975 e finalizada em 1981, criou os reservatórios integrados dos rios Jaguari e Jacaré (WHATELY; CUNHA, 2007).

A represa Paiva Castro ou Juquery contribui com $4,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ da vazão total do Sistema Cantareira e possui uma área de drenagem de 369 km^2 (PACILÉO-NETTO; BARROS, 2010). É formada por um barramento no rio Juquery no município de Franco da Rocha (SP), estando à jusante da área urbanizada do município de Mairiporã. Por ser o último dentre os receptores de água

do Sistema, ele pode refletir a qualidade final da água enviada à ETA (estação de tratamento de água) do Guaraú, inclusive em relação aos poluentes inseridos no Sistema, provenientes do município de Mairiporã (SP, Brasil) (GIATTI, 2000).

As atividades de ^{210}Pb e ^{226}Ra foram determinadas com o uso de um espectrômetro constituído de um detector de Ge hiperpuro (EG&G ORTEC, modelo GMX50P) (Figura 4), com resolução média de 1,9 keV para o pico de 1332,3 keV de ^{60}Co e eletrônica acoplada. A Tabela 1 apresenta os valores de atividade de ^{210}Pb e ^{226}Ra .

Tabela 1: Valores de atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ e ^{226}Ra (em Bq kg^{-1}) para o testemunho P1

Amostra (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ (Bq kg^{-1})	^{226}Ra (Bq kg^{-1})
0	84,87 ± 5,03	31,82 ± 2,30
4	78,25 ± 4,93	33,91 ± 2,51
6	71,39 ± 4,77	35,17 ± 2,47
8	69,07 ± 4,48	35,39 ± 2,21
12	35,33 ± 3,64	38,36 ± 2,34
14	35,96 ± 3,63	30,91 ± 2,23
16	75,58 ± 4,97	41,22 ± 2,50
20	79,42 ± 4,92	27,54 ± 2,17
26	56,44 ± 4,49	38,22 ± 2,50
30	34,88 ± 3,45	40,18 ± 2,22
32	41,14 ± 3,60	33,86 ± 2,26
34	30,13 ± 3,01	33,68 ± 2,06
36	41,51 ± 3,97	33,76 ± 2,24

O testemunho P1 foi coletado com um coletor cilíndrico do tipo Ambühl e Bühler (AMBÜHL; BÜHRER, 1975) em março de 2010 (CARDOSO-SILVA, 2013) (Figuras 5). As sub-amostras de 2 cm de espessura foram secas em estufa à 45 °C e então maceradas com auxílio de almofariz e pistilo. Para a análise por espectrometria, foi utilizada a metodologia descrita em Figueira (2000), que consiste na utilização de 10 a 20 g de sedimento previamente seco, acondicionado em recipientes de polietileno próprios para espectrometria e analisados por 50.000 s no espectrômetro (Figura 6).

O comportamento vertical dos dois núclídeos pode ser observado na Figura 7a. Percebe-se que o valor de ^{226}Ra varia pouco ao longo do testemunho. Isso é o esperado, tendo em vista que ^{226}Ra corresponde ao ^{210}Pb suportado, que é constantemente produzido no sedimento pelo decaimento dos núclídeos da série do ^{238}U (NOLLER, 2000). O valor médio observado de ^{226}Ra para este testemunho foi de $34,92 \pm 2,41 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Enquanto isso, $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ sofre decaimento exponencial ao longo do testemunho, que se dá pelo seu decaimento radioativo, estabilizando-se ao redor do valor de ^{210}Pb suportado. Entretanto, como foi discutido anteriormente acerca da criação do reservatório, observam-se duas curvas diferentes de ^{210}Pb : uma mais recente (entre 0 e 14 cm de profundidade), que provavelmente corresponde ao período em que o reservatório Paiva Castro já estava em funcionamento, que será chamada de “fase reservatório” e uma mais antiga (entre 14 e 36 cm), que corresponderia à “fase rio” para a região. Tendo em vista que as condições sedimentares na região foram alteradas com o afogamento da área para a implantação do reservatório, já eram esperadas duas curvas diferenciadas de ^{210}Pb .

Como o testemunho apresentou duas curvas diferenciadas para $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$, este sistema apresentou dois períodos com taxas de sedimentação distintas. Aplicando a Equação 2, obtém-se o valor da atividade de ^{210}Pb não-suportado (Tabela 2). Para o cálculo da taxa de sedimentação local para ambas as fases, utiliza-se a Equação 1. Para o seu cálculo, há a necessidade de calcular o logaritmo natural (ln) dos dados de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, conforme feito na Tabela 2. Então, calcula-se as retas de regressão para as curvas dos perfis verticais de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ de ambas as fases do testemunho. A Figura 7b apresenta o gráfico com as retas de regressão de ln ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$). Agora, tendo em mãos os valores de a, pode-se calcular as correspondentes taxas de sedimentação para ambas as fases do testemunho pela Equação 1 (Tabela 3).

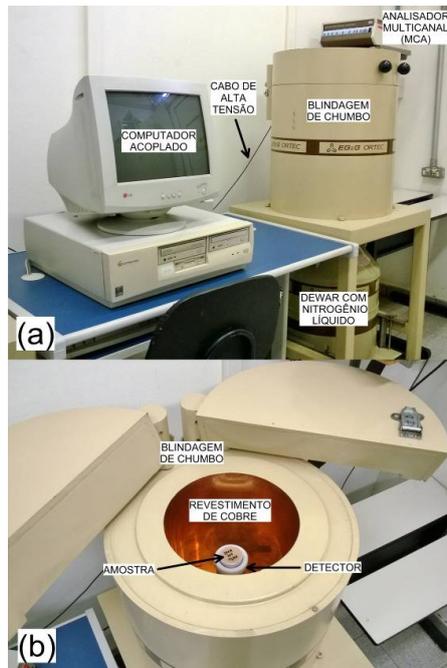


Figura 4: Espectrômetro com detector de Ge hiperpuro EG&G ORTEC, modelo GMX25190P. (a) Partes componentes. (b) Interior da blindagem de chumbo.



Figura 5: Testemunho da represa Paiva Castro e o fatiamento e armazenamento em saco hermeticamente fechado.

A última etapa restante é a realização da datação do testemunho, através da Equação 3. Com os valores de taxa de sedimentação da Tabela 3, pode-se calcular os anos de deposição para cada camada sedimentar (Tabela 4). Pela datação (Tabela 4), percebe-se que as camadas entre 16 e 20 cm depositaram-se dentro da década de 1970, correspondendo à época de finalização da implementação do reservatório Paiva Castro. Além disso, a taxa de sedimentação da fase reservatório para o testemunho P1 é maior que para a fase rio (Tabela 3), o que é o esperado, tendo em vista que sistemas como lagos e reservatórios são propícios para processos de deposição de carga sedimentar.



Figura 6: Subamostras de testemunhos, materiais de referência e branco em recipientes para contagem .

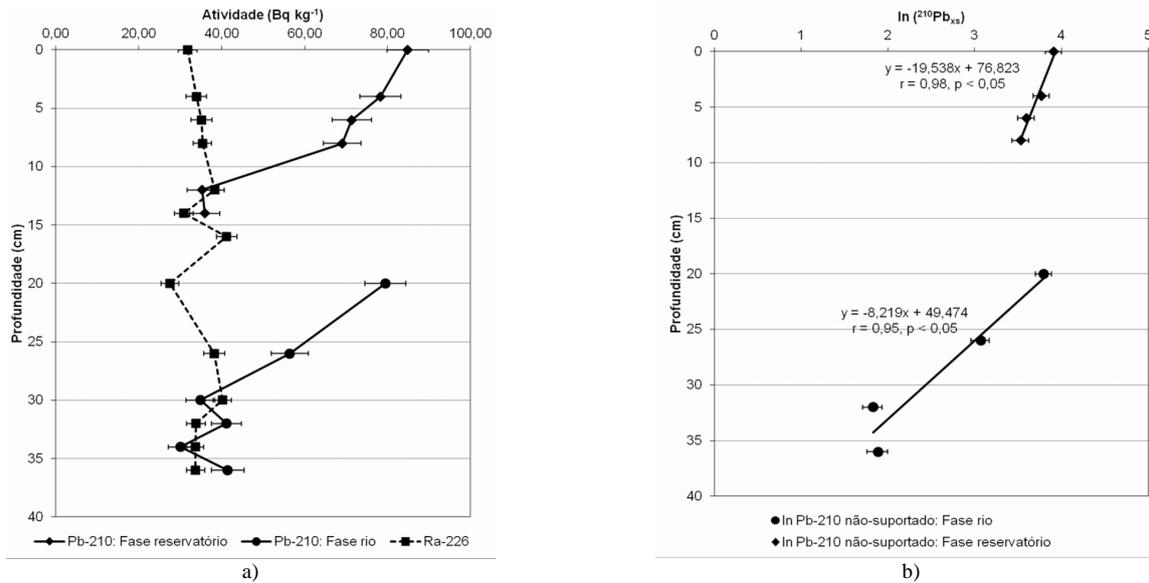


Figura 7: Perfis verticais de ^{210}Pb e ^{226}Ra (em Bq kg^{-1}) no testemunho P1 (a) e perfil vertical de $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{xs}})$ (não-suportado) no testemunho P1 (b). Em b) linhas pretas correspondem às retas de regressão, com equações da reta e valor de r de Pearson entre os dados.

Tabela 2: Valores de atividade de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (^{210}Pb não-suportado) (em Bq kg^{-1}) para o testemunho P1

Amostra (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (Bq kg^{-1})	$\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{xs}})$
0	$49,95 \pm 4,55$	3,91
4	$43,32 \pm 4,05$	3,77
6	$36,46 \pm 3,51$	3,60
8	$34,15 \pm 3,24$	3,53
12	< LDM	< LDM
14	< LDM	< LDM
20	$44,50 \pm 4,13$	3,80
26	$21,51 \pm 2,27$	3,07
30	< LDM	< LDM
32	$6,21 \pm 0,69$	1,83
34	< LDM	< LDM
36	$6,58 \pm 0,78$	1,88

<LDM: valor de atividade inferior ao limite de detecção do método de $1,48 \text{ Bq kg}^{-1}$ para $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$.

Tabela 3: Valores de a (coeficiente angular da relação $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{xs}})$ versus z) (em cm^{-1}) e de taxa de sedimentação () (em cm ano^{-1}) para o testemunho P1

Fase do testemunho P1	a (cm^{-1})	(cm ano^{-1})
Fase reservatório (0 – 14 cm)	-8,219	$0,63 \pm 0,11$
Fase rio (16 – 36 cm)	-19,538	$0,28 \pm 0,05$

Tabela 4: Datação (valores em ano) do testemunho P1

Fase do testemunho P1	Profundidade (cm)	Ano de deposição
Fase reservatório	0	2010
	4	2004 ± 1
	6	2000 ± 1
	8	1997 ± 1
	12	1991 ± 2
	14	1988 ± 3
	16	1981 ± 3
Fase rio	20	1967 ± 4
	26	1945 ± 7
	30	1931 ± 10
	32	1924 ± 10
	34	1917 ± 11
	36	1910 ± 12

AGRADECIMENTOS

À Fapesp (processos 2009/16652-1 e 2012/11890-40, ao CNPq (processo 470443/2008-1), e à Capes e CNPq, pela concessão de bolsa de doutoramento.

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, J. H.; CONLEY, D. J.; HEDAL, S. Palaeoecology, reference conditions and classification of ecological status: the EU Water Framework Directive in practice. **Marine Pollution Bulletin**, v.49, p. 283–290, 2004.
- APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. The calculation of Lead-210 dates assuming constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. **Catena**, v. 5, p.1-8, 1978.
- APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. Application of Lead-210 to sedimentation studies. In: IVANOVICH, M.; HARMON, R. S. (Eds.). **Uranium-Series Disequilibrium**. Nova Iorque: Oxford Science, 1992. p 731-778.
- BENNION, H.; BATTARBEE, R. The European Union Water Framework Directive: opportunities for palaeolimnology. **Journal of. Paleolimnology** v.38, p.285–295. 2007.
- CARDOSO-SILVA, S. **Metais-traço em sedimentos do reservatório Paiva Castro (Mairiporã- São Paulo): histórico por meio da geocronologia do ^{210}Pb , biodisponibilidade e uma proposta para a gestão dos recursos hídricos**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, São Paulo, Brasil, 166p. 2013.
- CARDOSO-SILVA, S., FERREIRA, T., POMPÊO, M. L. M. Diretiva quadro da água: uma revisão crítica e a possibilidade de aplicação ao Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n.1, p. 39-58, 2013.
- COHEN, A. S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. New York: Oxford University Press, 2003. 500p.
- COSTA-BÖDDEKER, S.; BENNION, H.; JESUS, T. A.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; FIGUEIRA, R. C. L.; BICUDO, D. C. Paleolimnologically inferred eutrophication of a shallow, tropical, urban reservoir in southeast Brazil. **Journal of. Paleolimnology**, v.48, p.751–766, 2012.
- FÁVARO, D. I. T.; DAMATTO, S. R.; MOREIRA, E. G.; MAZZILLI, B. P.; CAMPAGNOLI, F. Chemical characterization and recent sedimentation rates in sediment cores from Rio Grande reservoir, SP, Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.273, n.2, p.451–463, 2007.
- FIGUEIRA, R. C. L. **Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil**. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 2000.
- GIATTI, L. L. **Reservatório Paiva Castro – Mairiporã – SP: avaliação da qualidade da água sobre alguns parâmetros físicos químicos e biológicos (1987/1998)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000.
- JESUS, T. A. **Avaliação do histórico de impactos antrópicos na bacia de drenagem do Lago das Garças (São Paulo-SP), durante o século XX, com base nos estoques de nutrientes, metais pesados e compostos orgânicos em sedimento lacustre**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2009.
- KELLY, M.; JUGGINS, S.; GUTHRIE, R.; PRITCHARD, S.; JAMIESON, J.; RIPPEY, B.; HIRST, H.; YALLOP, M. Assessment of ecological status in U.K. rivers using diatoms. **Freshwater Biology**, v.53, p. 403–422, 2008.
- LUBIS, A. A. Constant rate of supply (CRS) model for determining the sediment accumulation rates in the coastal area using ^{210}Pb . **Journal of Coastal Development**, v.10, n.1, p.9-18, 2006.
- NOLLER, J. S. Lead-210 geochronology. In: **AGU Reference Shelf**. São Francisco: American Geosciences Union, v.4, p. 115-120. 2000.
- PACILÉO-NETTO, N.; BARROS, L. A. A. **Uma história visual da construção do Sistema Cantareira**. São Paulo: Ed. Autor, 2010. 222 p.

- PESSENDA, L. C. R.; SAIA, S. E. M. G.; GOUVEIA, S. E. M.; LEDRU, M. P.; SIFEDDINE, A.; AMARAL, P. G. C.; BENDASSOLLI, J. A. Last millennium environmental changes and climate inferences in the Southeastern Atlantic forest, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.82, n.3, p. 717-729, 2010.
- RÄSÄNEN, J.; KAUPPILA, T.; SALONEN, V. P. Sediment-based investigation of naturally or historically eutrophic lakes: implications for lake management. **Journal of Environmental Management**, v.79, p.253–265, 2006.
- ROBBINS, J. A.; EDGINGTON, D. N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.39, p.285-304, 1975.
- SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Dossiê Cantareira**. 2008. 14p.
- SILVA, L.F **Reconstrução paleolimnológica da eutrofização na represa Guarapuranga com base em abordagem multi proxy**. Tese (Doutorado), Unesp, Rio Claro, Brasil, 2013.
- SHUKLA, B. S.; JOSHI, S. R. An evaluation of the CIC model of ^{210}Pb dating of sediments. **Environmental Geological Water Science**, v.14, n.1, p.73-76, 1989.
- SMOL, J. P. **Pollution of lakes and rivers- a paleoenvironmental perspective**. Oxford: Blackwell, 2008. 382p.
- TYLMANN, W. Estimating recent sedimentation rates using ^{210}Pb on the example of morphologically complex lake (Upper Lake Radu skie, N Poland). **Journal of Methods and Applications of Absolute Chronology**, v. 23, p. 21-26, 2004.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 632p.
- XUE, B.; YAO, S.; XIA, W. Environmental changes in Lake Taihu during the past century as recorded in sediment cores. **Hydrobiologia**, v.581, n.1, p.117–123, 2007.