

## Artigo

## Datação de Sedimentos com $^{210}\text{Pb}$ : Resgate do Histórico da Poluição Ambiental no Antropoceno

Godoy, J. M.\*

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (6), 1733-1757. Data de publicação na Web: 18 de dezembro de 2018

<http://rvq.sbq.org.br>

### $^{210}\text{Pb}$ Sediment Dating: Redeeming the History of Environmental Pollution in the Anthropocene

**Abstract:** Considering that environmental awareness only developed since 1950, when the period of great acceleration of anthropogenic environmental changes occurred, reference levels in environments heavily subject to the most diverse environmental impacts, such as bays and estuaries, are unknown. In the absence of an environment that can be taken as a reference, the use of sedimentary records is quite useful. Due to the burial process, layer by layer, sediments are considered a historical record of pollution in this type of environment. But to be able to perform this historical reconstruction, there is a need to convert the depth axis, the sedimentary layers, into a time scale. Taking into account the half-life, the best known tools, such as the  $^{14}\text{C}$  dating ( $t_{1/2} = 5730$  years), are of little application, for this time scale of about 100 years, requiring another natural radionuclide with a more compatible half-life. In this sense,  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22.2$  years) appears as an ideal alternative. The present work presents the scientific bases that guide this application, techniques of measurement of  $^{210}\text{Pb}$  and models of interpretation of data. Finally, case studies involving different Brazilian ecosystems are presented.

**Keywords:** Dating; sediments;  $^{210}\text{Pb}$ ; Anthropocene.

### Resumo

Considerando que uma consciência ambiental só se desenvolveu a partir de 1950, quando se deu o período da grande aceleração das mudanças ambientais antropogênicas, os níveis de referência em ambientes fortemente sujeitos aos mais diversos impactos ambientais, como baías e estuários, são desconhecidos. Na ausência de um ambiente que possa ser tomado como referência, o uso de registros sedimentares é bastante útil. Devido ao processo de soterramento, camada por camada, os sedimentos são considerados um registro histórico da poluição neste tipo de ambiente. Contudo, para poder realizar esta reconstrução histórica, há uma necessidade de converter o eixo de profundidade das camadas sedimentares em uma escala de tempo. Levando-se em consideração o tempo de meia-vida, as ferramentas mais conhecidas, como a datação  $^{14}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 5730$  anos), são de pouca aplicação para esta faixa de tempo de cerca de 100 anos, necessitando de outro radionuclídeo natural com meia-vida mais compatível. Nesse sentido,  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22,2$  anos) aparece como uma alternativa ideal. O presente trabalho apresenta as bases científicas que norteiam esta aplicação, técnicas de medição de  $^{210}\text{Pb}$  e modelos de interpretação de dados. Por fim, são apresentados estudos de casos envolvendo diferentes ecossistemas brasileiros.

**Palavras-chave:** Datação; sedimentos;  $^{210}\text{Pb}$ ; Antropoceno.

\* Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Química, CEP 22453-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ [jmgodoy@puc-rio.br](mailto:jmgodoy@puc-rio.br)

DOI: [10.21577/1984-6835.20180116](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180116)

## **Datação de Sedimentos com $^{210}\text{Pb}$ : Resgate do Histórico da Poluição Ambiental no Antropoceno**

**José Marcus Godoy\***

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Química, CEP 22453-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

\* [jmgodoy@puc-rio.br](mailto:jmgodoy@puc-rio.br)

*Recebido em 13 de dezembro de 2018. Aceito para publicação em 13 de dezembro de 2018*

- 1. Introdução**
- 2. Datação de Sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$**
- 3. Amostragem**
- 4. Medição do  $^{210}\text{Pb}$**
- 5. Modelos Matemáticos**
  - 5.1.** Método da Velocidade e do Fluxo Constantes (CR-CS)
  - 5.2.** Método do Fluxo Constante (CRS)
- 6. Alguns Exemplos de Aplicações no Brasil**
  - 6.1.** Baía de Todos os Santos
  - 6.2.** Baía de Guanabara
  - 6.3.** Baía de Sepetiba
  - 6.4.** Sistema Lagunar Cananéia-Iguape
  - 6.5.** Pantanal mato-grossense
- 7. Conclusões**

### **1. Introdução**

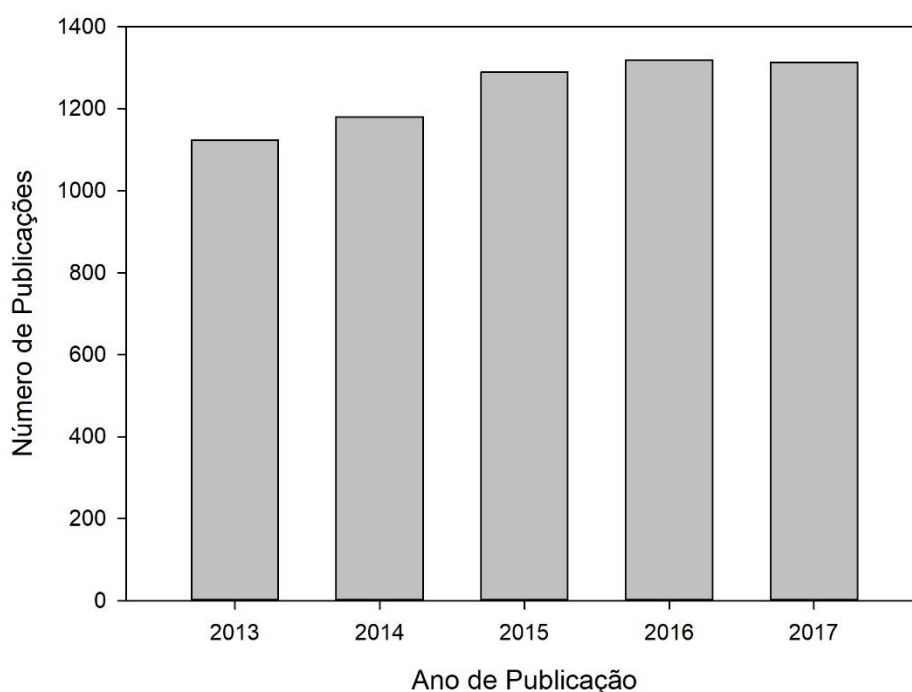
Embora, ainda, não reconhecido como uma época geológica, o conceito de uma “Época dos Humanos”, o Antropoceno, foi formalizado por Stoermer e Crutzen no ano de 2000.<sup>1</sup> Crutzen e Steffen colocam que podem haver mais de um incremento no “Antropoceno”,<sup>2</sup> um inicial que teria começado há alguns milhares de anos atrás, seguido de uma primeira aceleração,

motivada pela invenção da máquina a vapor no século 18, e a grande aceleração ocorrida após 1950. Segundo estes autores, o período após a grande aceleração significa, também, o início do período no qual as atividades humanas deixam de apenas influenciar o ambiente global para se tornar a sua força dominante em muitos aspectos. Desta forma, ressaltando não ser uma época formalmente aceita, será empregado, no presente trabalho, o termo Antropoceno para designar o período de tempo iniciado em 1950.<sup>2,3</sup>

Assim, considerando o Antropoceno como o período da grande aceleração em termos de mudanças ambientais e considerando,<sup>2,3</sup> também, que uma consciência ambiental era pouco desenvolvida nos anos 1950-1960, pouco se dispõe de registros fidedignos sobre o histórico da poluição ambiental em muitos locais de interesse ambiental como as grandes baías cosmopolitas, por exemplo: as baías de Guanabara e de Todos os Santos. Consequentemente, torna-se difícil avaliar a sua evolução temporal, bem como de se ter um valor de base para estes ambientes. Desta forma, deve-se procurar um compartimento

ambiental que mantenha este registro e esteja disponível neste tipo de ecossistema.

Os sedimentos de fundo, pelo seu processo de formação contínuo, acumulando camada sobre camada, tem se mostrado, particularmente, útil neste sentido, com uma tendência crescente das publicações científicas nos últimos anos envolvendo a datação de testemunhos sedimentares (Figura 1). Mas, como estabelecer uma escala temporal numa coluna de sedimentos (testemunho)? Como ter certeza que se atingiu uma camada que possa ser considerada como sendo a linha de base?



**Figura 1.** Número de publicações, anuais, em revistas internacionais indexadas envolvendo datação de sedimentos, período 2013-2017 (fonte: Web of Science, acessado em 20/11/2018)

Quando se fala em datações, imediatamente, pensa-se na datação com  $^{14}\text{C}$ . No entanto, considerando a proposta do início do Antropoceno em 1950 e o tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) do  $^{14}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 5730$  anos),<sup>3</sup> aplicando-se

a lei do decaimento radioativo (Equação 1), tem-se uma variação, máxima, na sua concentração de apenas 0,82 %, o que torna a sua aplicação, no Antropoceno, pouco atrativa.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$t$  = tempo decorrido (s).

$\lambda$  = constante de decaimento ( $s^{-1}$ ).

$N(t)$  = número de átomos presentes, no instante  $t$ , do radioisótopo considerado.

$N_0$  = número inicial de átomos do radioisótopo considerado.

Pensando na própria datação com  $^{14}\text{C}$ , vê-se que, quaisquer que sejam os métodos de datação que se venha a adotar, eles possuem um ponto em comum: um evento que “zera” o cronometro e a partir do qual é feita a medição do intervalo de tempo decorrido. Em termos de  $^{14}\text{C}$  considera-se, por exemplo, a morte do ser vivo que incorporava o carbono atmosférico ( $N_0$ ), ou seja, o momento no qual é interrompido o seu equilíbrio com a atmosfera.

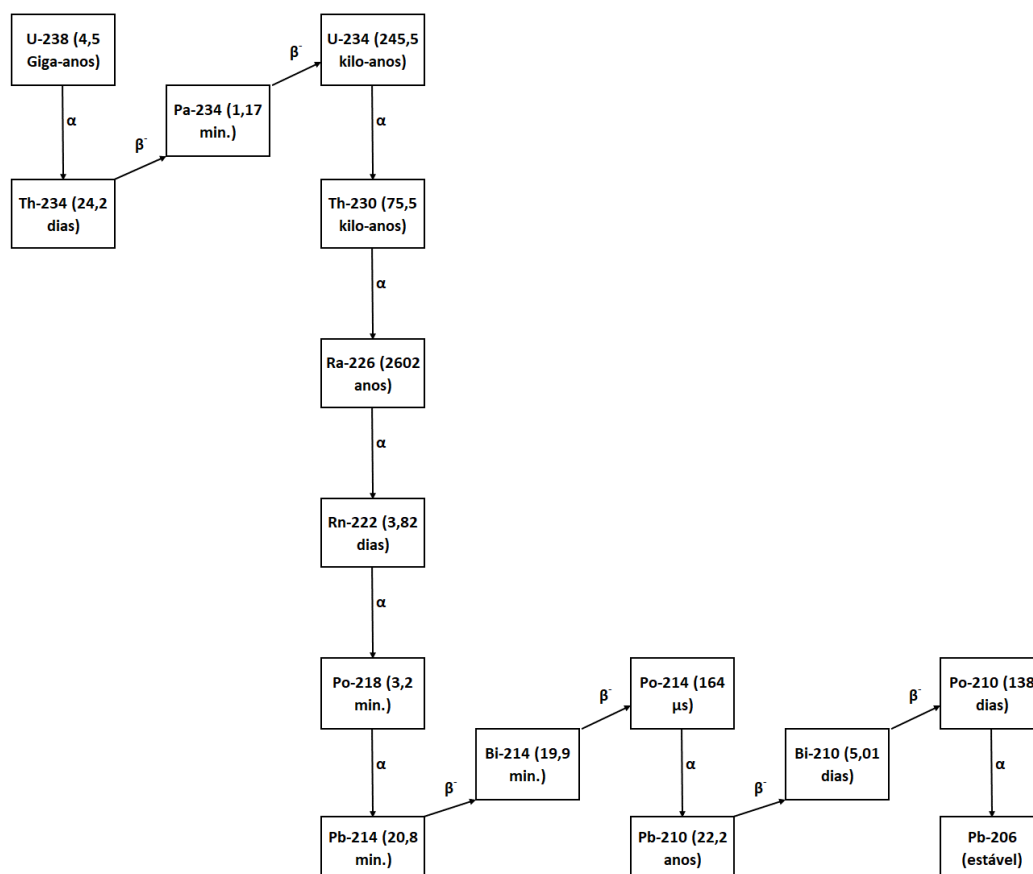
Os testes nucleares na atmosfera sofreram um crescente até o final de 1963 quando, com a assinatura do Tratado de Banimento de Testes Nucleares na Atmosfera, sua frequência diminuiu, gradativamente, até a realização do último teste nuclear, na atmosfera, pela Índia em 1979. Algumas aplicações alternativas, envolvendo a determinação do  $^{14}\text{C}$ , baseadas no pico de entrada na atmosfera (1963-1964), têm sido propostas em estudos forenses como, por exemplo, na verificação se objetos de marfim são recentes, configurando uma captura ilegal de elefantes,<sup>4</sup> na verificação da autenticidade de obras de arte,<sup>5</sup> ou como ferramenta auxiliar na identificação de restos mortais.<sup>6</sup> Nestes casos, uma amostra contendo um excesso de  $^{14}\text{C}$  configura que o ser vivo, da qual ela origina, incorporou carbono atmosférico num período após o início dos testes nucleares na atmosfera. Com base no mesmo princípio e com aplicações semelhantes está o uso do  $^{90}\text{Sr}$ , um produto de fissão com tempo de meia-vida de 28,5 anos,

também, introduzido na atmosfera terrestre em decorrência dos testes nucleares.<sup>4,7</sup>

## 2. Datação de Sedimentos com $^{210}\text{Pb}$

Utilizando as palavras-chave “datação e sedimentos”, o Web of Science como base de dados e o período de 2013-2017, encontra-se cerca de 6200 publicações sobre datações de sedimentos e, dentre eles, tem-se 800 artigos empregando a chamada técnica do  $^{210}\text{Pb}$ . No Brasil, o primeiro artigo sobre de datação de sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$  foi realizado na Baía de Guanabara, em 1986, fruto de uma cooperação entre pesquisadores brasileiros e alemães.<sup>8</sup> Até 1998, cinco outros artigos envolvendo a datação de sedimentos, amostrados no Brasil, são encontrados na literatura, mas sempre com a datação sendo realizada no exterior em colaboração com outros grupos de pesquisa.<sup>9-12</sup> O primeiro artigo internacional em revista indexada, com a datação com  $^{210}\text{Pb}$  sendo realizada no Brasil, aparece em 1998, envolvendo sedimentos da Baía de Guanabara.<sup>13</sup> Desde então, mais de uma centena de artigos podem ser encontrados empregando-se sistemas de busca.

Mas o que faz o  $^{210}\text{Pb}$  tão atrativo para a datação no Antropoceno? O  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22,2$  anos) é um radionuclídeo natural pertencente à “família” do  $^{238}\text{U}$  (Figura 2), com um tempo de meia-vida compatível com os 68 anos do Antropoceno, após a grande aceleração. Neste intervalo de tempo, tem-se uma variação de 0-88 % da sua atividade inicial e um intervalo de tempo de dois anos representa 6 % na atividade, ou seja, seu emprego permite verificar variações quase que anuais entre amostras, ao contrário do  $^{14}\text{C}$  para o qual estes 68 anos representam apenas 0,82 % da atividade inicial.



**Figura 2.** Serie natural do decaimento radioativo do  $^{238}\text{U}$

A série do  $^{238}\text{U}$  pode ser subdividida numa subsérie a partir do  $^{226}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 2602$  anos), cujo primeiro produto de decaimento é um gás nobre, o  $^{222}\text{Rn}$  ( $t_{1/2} = 3,82$  dias). Mesmo em pequenas proporções, o  $^{222}\text{Rn}$  é, constantemente, liberado do solo para atmosfera, sendo  $3,7 \text{ Bq m}^{-3}$  sua concentração média, em ambientes externos, à uma altura de dois metros da superfície do solo.<sup>14</sup> Uma vez na atmosfera, o  $^{222}\text{Rn}$  ascende na troposfera até a camada limite troposfera-estratosfera e, durante este percurso, decai até o seu primeiro descendente de maior tempo de meia-vida, o  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22,2$  anos). Devido ao decaimento radioativo  $^{222}\text{Rn}$ - $^{210}\text{Pb}$ ,

o  $^{210}\text{Pb}$  encontra-se na forma iônica sendo adsorvido ao material em suspensão e, em seguida, atingindo a superfície terrestre através dos processos de deposição úmida e seca (Figura 3). Atingindo a superfície terrestre, o  $^{210}\text{Pb}$  pode ser depositado no solo ou em corpos d'água, dando origem a um excesso de  $^{210}\text{Pb}$  nas camadas superficiais dos sedimentos, chamado de  $^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}$  ou  $^{210}\text{Pb}_{\text{excesso}}$ , cujo decaimento é a base da chamada datação de sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$ . Vale a pena notar que, o instante da deposição do  $^{210}\text{Pb}$  no sedimento equivale ao “zerar” do cronometro.

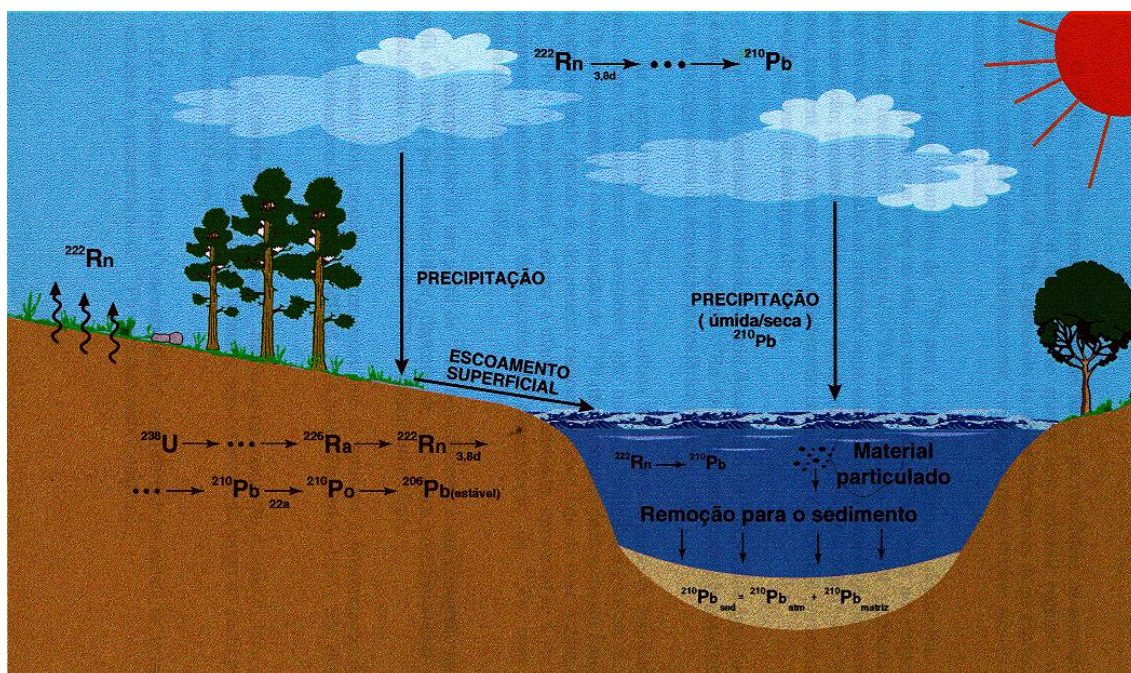


Figura 3. Ciclo do  $^{210}\text{Pb}$  atmosférico nos sedimentos (modificado de Lima)<sup>15</sup>

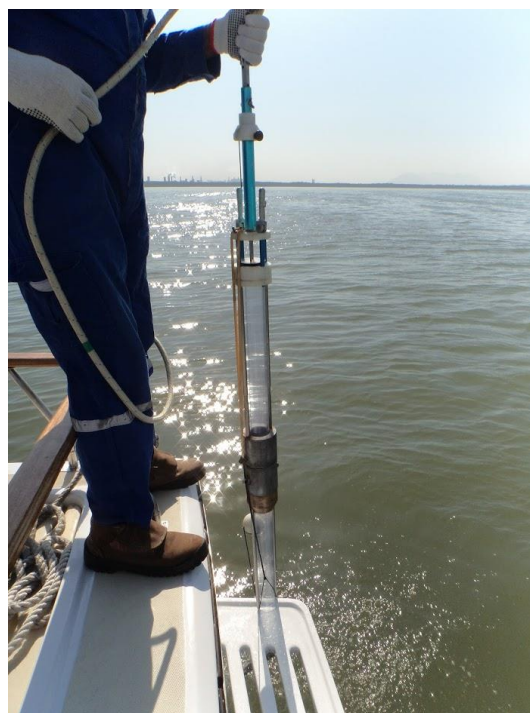
### 3. Amostragem

Ao contrário da datação com  $^{14}\text{C}$ , quando a datação é realizada amostra/amostra, na datação com  $^{210}\text{Pb}$  é feita uma avaliação da taxa de variação do  $^{210}\text{Pb}$  ao longo de um testemunho sedimentar, ou seja, uma única amostra não permite a datação com  $^{210}\text{Pb}$ . Existem diferentes amostradores de testemunhos de sedimentos, sendo os mais comuns os chamados “gravity corer” (Figura

4a-c). Após a retirada do testemunho, este é “fatiado” por extrusão (Figura 4d-f). O fatiamento é uma etapa crítica do processo, fatias muito finas podem significar um esforço analítico desnecessário, mas, por outro lado, fatias muito grossas podem inviabilizar a própria datação, lembrando que; fatias finas podem ser, eventualmente, juntadas, mas fatias grossas não podem ser desmembradas em fatias mais finas. Neste sentido, quando não existe uma informação previa sobre a taxa de sedimentação esperada, o fatiamento cm/cm é o mais aconselhável.



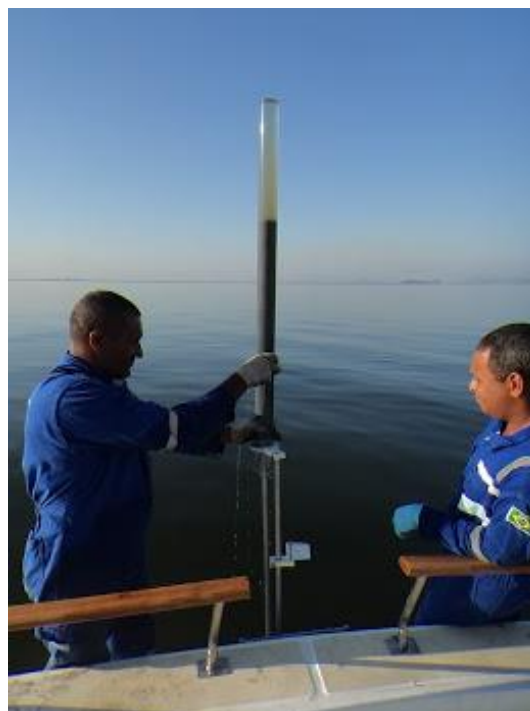
(a)



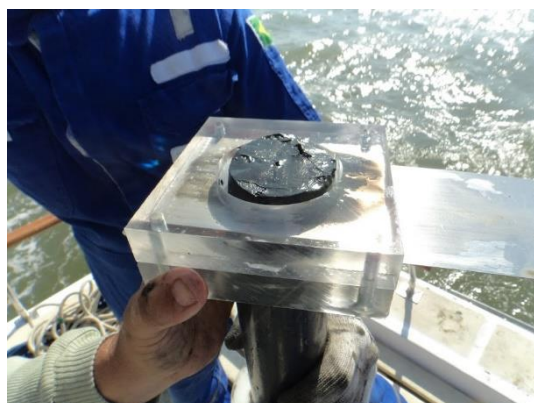
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 4.** Sequência de amostragem (a) e fatiamento de testemunho de sedimento (a-f) (fotos do autor)

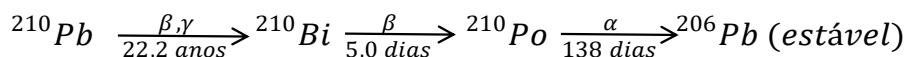
Logo após o fatiamento, as fatias (camadas) devem ser pesadas e reservada uma alíquota para a determinação imediata da umidade, calculando-se a massa seca por unidade de área ( $\text{g cm}^{-2}$ ). De modo a evitar os possíveis efeitos de compactação das camadas mais profundas, o eixo da profundidade da camada de sedimentos deve ser expresso em massa acumulada ( $\text{g cm}^{-2}$ ) ao invés de profundidade simples (cm). Outros dados relacionados com as amostras tais como a granulometria, também, são úteis na interpretação dos resultados.

Como a datação de sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$  está baseada na aplicação de modelos, os resultados obtidos, ou seja, as idades das camadas, tem que ser validados. No hemisfério norte esta validação é feita, via de regra, através do perfil de  $^{137}\text{Cs}$ , que apresenta dois picos, um referente ao máximo das

explosões nucleares na atmosfera (1965) e outro devido ao acidente de Chernobyl (1986). No entanto, no hemisfério sul, mesmo o máximo devido às explosões nucleares na atmosfera é de difícil detecção, sendo necessário fazer-se uso de outras ferramentas como, por exemplo, o histórico da implementação de alguma indústria na região. Portanto, a determinação deste parâmetro adicional, também, tem que estar prevista no momento da amostragem.

#### 4. Medição do $^{210}\text{Pb}$

Repare na Figura 1, nela, é possível notar a sequência de decaimentos a partir do  $^{210}\text{Pb}$  até o  $^{206}\text{Pb}$  (estável), representada abaixo (Figura 5):



**Figura 5.** Subsérie de decaimento do  $^{210}\text{Pb}$  até  $^{206}\text{Pb}$  (estável)

A primeira possibilidade de medição está no próprio  $^{210}\text{Pb}$ , através da partícula beta ou, mais frequentemente, através dos raios gama emitidos. Embora seja muito utilizada, a determinação direta empregando-se a espectrometria gama apresenta algumas

dificuldades devido à baixa frequência de emissões (4 %) e a energia envolvida (47 keV), ocasionando piores limites de detecção e incertezas maiores.<sup>16,17</sup> É importante ressaltar que, embora atribuído ao  $^{210}\text{Pb}$ , os raios gamas são emitidos, na realidade, pelo seu produto

de decaimento,  $^{210}\text{Bi}$ . A partícula beta emitida pelo  $^{210}\text{Pb}$ , também, é de baixa energia ( $\beta_{\text{max}} = 17 \text{ keV}$ ), tornando sua detecção difícil, sendo possível, apenas, por cintilação em meio líquido.<sup>16</sup>

O  $^{210}\text{Bi}$  é um emissor beta de alta energia ( $\beta_{\text{max}} = 1160 \text{ keV}$ ), como sua meia-vida é de apenas cinco dias, o equilíbrio radioativo, com o  $^{210}\text{Pb}$ , é atingido em cerca de 30 dias após uma separação química.<sup>16</sup> Muito empregado, na datação com  $^{210}\text{Pb}$ , o  $^{210}\text{Po}$  possui algumas propriedades químicas muito peculiares, como a deposição espontânea em alguns metais nobres como a prata e o cobre. A espectrometria alfa, após a deposição em

discos de prata, tem sido o método escolhido por muitos grupos de pesquisa.<sup>16,17,19-21</sup> Comparando as espectrometrias alfa e gama, Mabit e outros colocam que a incerteza na determinação de  $^{210}\text{Pb}$ ,<sup>19</sup> será de 40 % usando a espectrometria gama para amostras de sedimento com concentrações na faixa de  $10 \text{ Bq kg}^{-1}$  e que incertezas semelhantes entre os dois métodos só serão obtidas quando a concentração de  $^{210}\text{Pb}$  for maior do que  $120 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

Qualquer que seja o método escolhido, deve-se ter em conta que o  $^{210}\text{Pb}$  medido representa o chamado  $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$  (Figura 3), como explicado na equação (2).

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}} + ^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}} \quad (\text{Equação 2})$$

Levando em consideração a série do decaimento radioativo do  $^{238}\text{U}$  (Figura 2), podemos considerar que o  $^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}}$  está em

equilíbrio radioativo com o  $^{226}\text{Ra}$ , desta forma  $^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}} = ^{226}\text{Ra}$  e:

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{226}\text{Ra} + ^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}} \quad (3)$$

$$^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{226}\text{Ra} \quad (4)$$

Portanto, a datação de sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$  implica, também, na determinação do  $^{226}\text{Ra}$ . Esta necessidade da determinação do  $^{226}\text{Ra}$  explica a preferência pela espectrometria gama, uma vez que a determinação de ambos radionuclídeos se dá de forma simultânea.

Uma outra forma de se estimar o  $^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}}$  se dá através do próprio perfil do  $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$  com a profundidade da camada sedimentar, sendo o  $^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}}$  determinado a partir do momento no qual a concentração de  $^{210}\text{Pb}$  se torna constante, como ilustrado na Figura 6, onde  $20,7 \text{ Bq kg}^{-1}$  representa  $^{210}\text{Pb}_{\text{matriz}}$ ,  $62,4 \text{ Bq kg}^{-1}$  a concentração inicial de  $^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}$  e 0,167 o termo da exponencial.

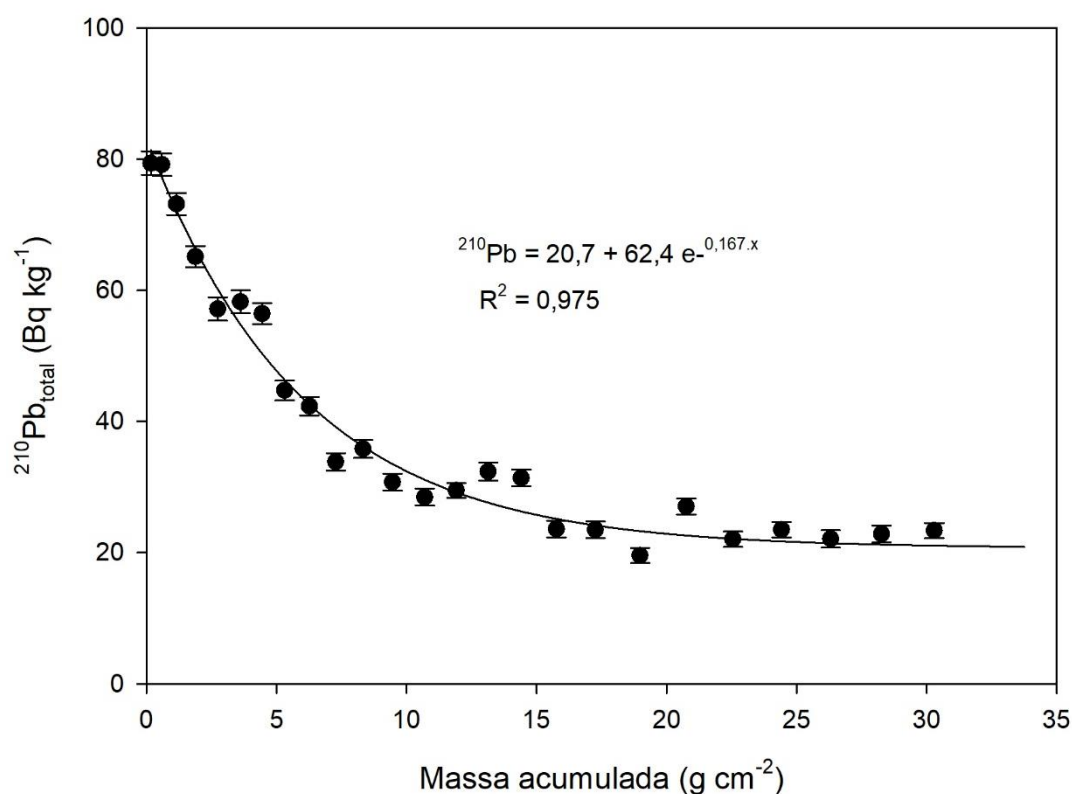


Figura 6. Perfil do  $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$  com a profundidade da camada sedimentar (dados do autor)

## 5. Modelos Matemáticos

Relembrando que a datação com  $^{210}\text{Pb}$ , ao contrário do que ocorre com o  $^{14}\text{C}$ , não pode ser obtida com os resultados de uma única amostra, mas sim obtida através da análise de um perfil semelhante ao apresentado na Figura 6. Pode-se encontrar na literatura alguns livros e revisões bibliográficas dedicados ao tema,<sup>22-26</sup> também, é possível obter-se, sem custos, um manual sobre a datação de sedimentos com  $^{210}\text{Pb}$  publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).<sup>27</sup>

Embora haja outros, dois modelos são os mais usuais: o chamado método da Velocidade e do Fluxo Constante (*Constante Rate-Constant Flux method* (CR-CF)) e o método do Fluxo Constante (*Constant Rate of Supply method* (CRS) ou *Constant Flux method* (CF)), os quais serão abordados no presente trabalho. É importante ressaltar que, qualquer que seja o modelo adotado ele precisa ser

validado a partir de outros dados como, por exemplo, o perfil de um determinado metal.

Outro ponto importante para o qual deve ser chamado a atenção é o efeito de compactação, à medida que as camadas superiores vão se depositando, elas pressionam as camadas inferiores, fazendo com que percam água e reduzam a sua espessura. Desta forma, a profundidade linear das camadas sedimentares se altera influenciando a determinação da velocidade linear de sedimentação (cm ano<sup>-1</sup>). Para resolver este problema, trabalha-se com as profundidades expressas na forma de massa acumulada, como demonstrado na Figura 6.

### 5.1. Método da Velocidade e do Fluxo Constante (CR-CF)

Quando ambos, velocidade mássica de sedimentação (g cm<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>) e fluxo de  $^{210}\text{Pb}$  (Bq cm<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>), são constantes, temos que a

concentração de  $^{210}\text{Pb}$  ( $\text{Bq g}^{-1}$ ), de origem atmosférica, na camada superficial ( $^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(0)$ ) é constante e a sua

concentração nas demais camadas é função apenas do decaimento radioativo, temos:

$$^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(t) = ^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando, que a velocidade é constante tem-se que:

$$t = \frac{z}{v} \quad (\text{Equação 6})$$

$$^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(t) = ^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} = ^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}(0) \cdot e^{-\lambda \cdot z/v} \quad (\text{Equação 7})$$

A figura 5 representa uma situação na qual o método CF-CR é aplicável, o coeficiente da exponencial (-0,167) é utilizado na

determinação da velocidade mássica de sedimentação ( $v = 0,19 \text{ g cm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ):

$$-0,167 = -\frac{0,0311}{v} \quad (\text{Equação 8})$$

Uma vez calculada a velocidade de sedimentação, a idade de cada camada é calculada aplicando-se a velocidade de sedimentação e a profundidade correspondente.

## 5.2. Método do Fluxo Constante (CRS ou CF)

Em muitos locais, sobre o impacto da ação humana, observa-se uma variação na velocidade de sedimentação, sem que haja

uma mudança significativa no aporte de  $^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}$ , ou seja, no fluxo de  $^{210}\text{Pb}$  ( $\text{Bq cm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ). Repare que o modelo anterior, CR-CF, é um caso particular, do modelo do fluxo constante. Uma das condicionantes é que estejam disponíveis os valores da concentração de  $^{210}\text{Pb}$ , ao longo de todo o testemunho, até a linha de base (Figura 3). Caso isto não ocorra, tem que ser possível estimar os valores faltantes. A Figura 7 ilustra as bases da aplicação do modelo CRS.

As equações abaixo ilustram a aplicação do modelo CRS:

$$I_0 = \sum_{i=0}^{\infty} C(i) \cdot m(i) \quad (\text{Equação 9})$$

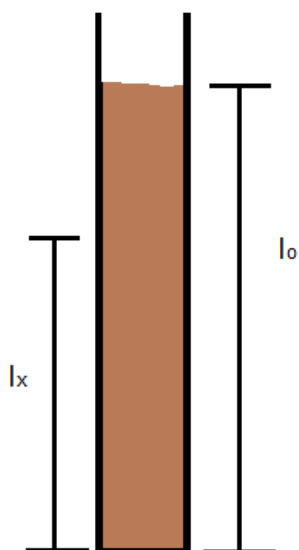
$$I_x = \sum_{i=0}^x C(i) \cdot m(i) \quad (\text{Equação 10})$$

$$t = -0,0311 \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_x}\right) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$C(i)$  = concentração de  $^{210}\text{Pb}_{\text{atmosférico}}$  na camada  $i$  ( $\text{Bq g}^{-1}$ )

$m(i)$  = massa correspondente à camada  $i$  ( $\text{g cm}^{-2}$ )



$I_0$  = inventário de  $^{210}\text{Pb}$  ao longo de todo o testemunho

$I_x$  = inventário de  $^{210}\text{Pb}$  até a altura  $X$  do testemunho

Figura 7. Esquema da aplicação do modelo CFS.

Repare que ao contrário do que ocorre no método CR-CF, onde a idade é calculada, indiretamente, a partir da velocidade de sedimentação, o resultado do método CRS já

é a própria idade da camada. Outro dado que pode ser obtido é a velocidade mássica de sedimentação que existia na época correspondente à cada camada.

$$v (\text{g cm}^{-2} \text{ano}^{-1}) = 0,0311 \cdot \frac{I_i}{C_i} \quad (\text{Equação 12})$$

Importante notar que, este dado permite calcular a variação do fluxo de poluentes ( $\text{massa cm}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) ao longo do período abrangido pela amostragem, multiplicando-se a concentração do poluente ( $\text{massa g}^{-1}$ ), numa determinada camada, pela velocidade mássica de sedimentação ( $\text{g cm}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ), calculada para esta camada.

## 6. Alguns Exemplos de Aplicações no Brasil

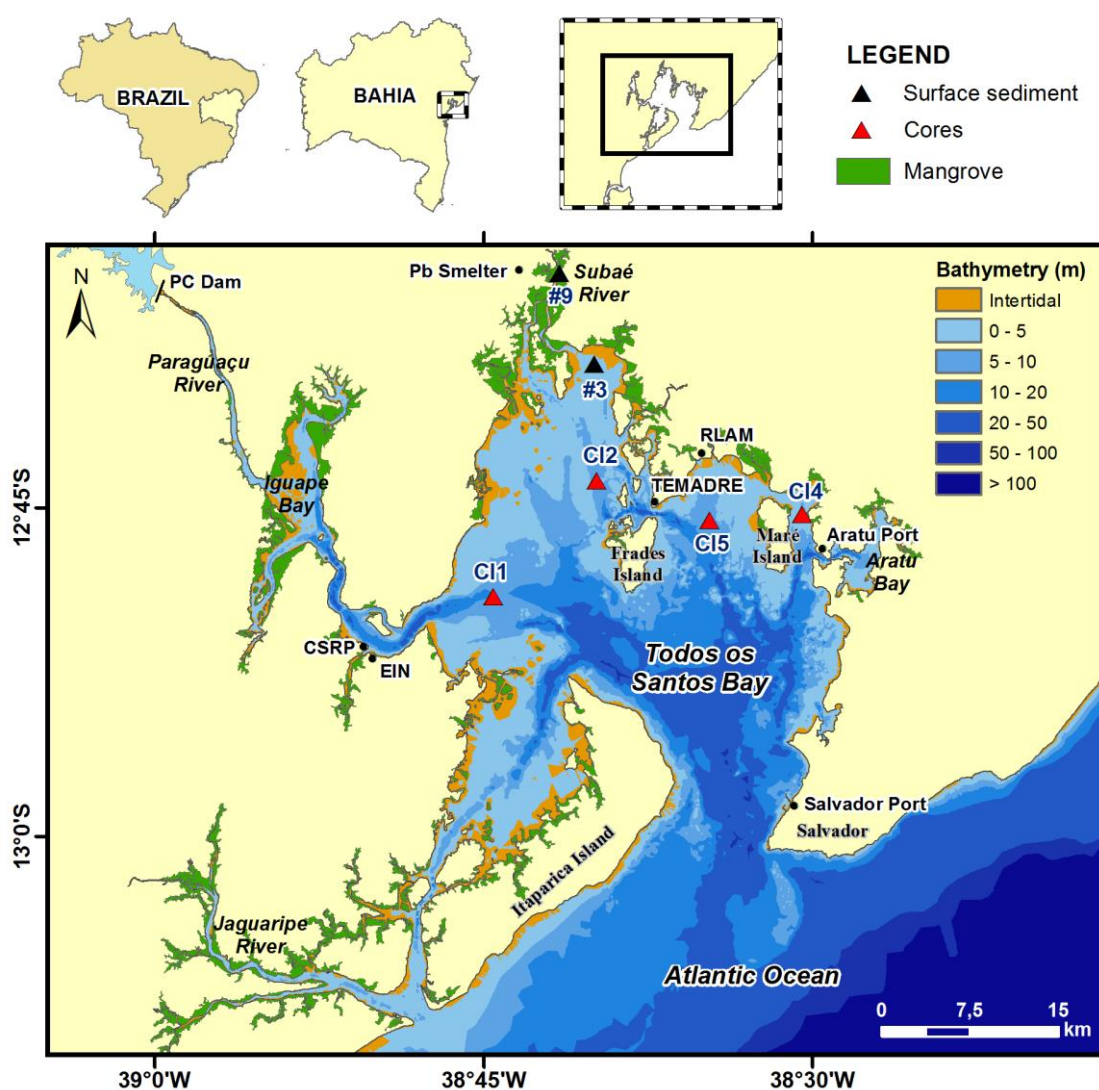
### 6.1. Baía de Todos os Santos

A baía de Todos os Santos (BTS) representa a segunda maior das baías costeiras brasileiras com  $1230 \text{ km}^2$ , dentro de sua bacia de drenagem encontram-se os municípios da Grande Salvador, com uma população em seu entorno de cerca de 3 milhões de habitantes. A baía sofre com múltiplos estressores ambientais como uma rede de saneamento básico insuficiente, atividades industriais, em particular, a refinaria Landulpho Alves, além do legado de uma beneficiadora de minérios de chumbo no município de Santo Amaro.<sup>28,29</sup>

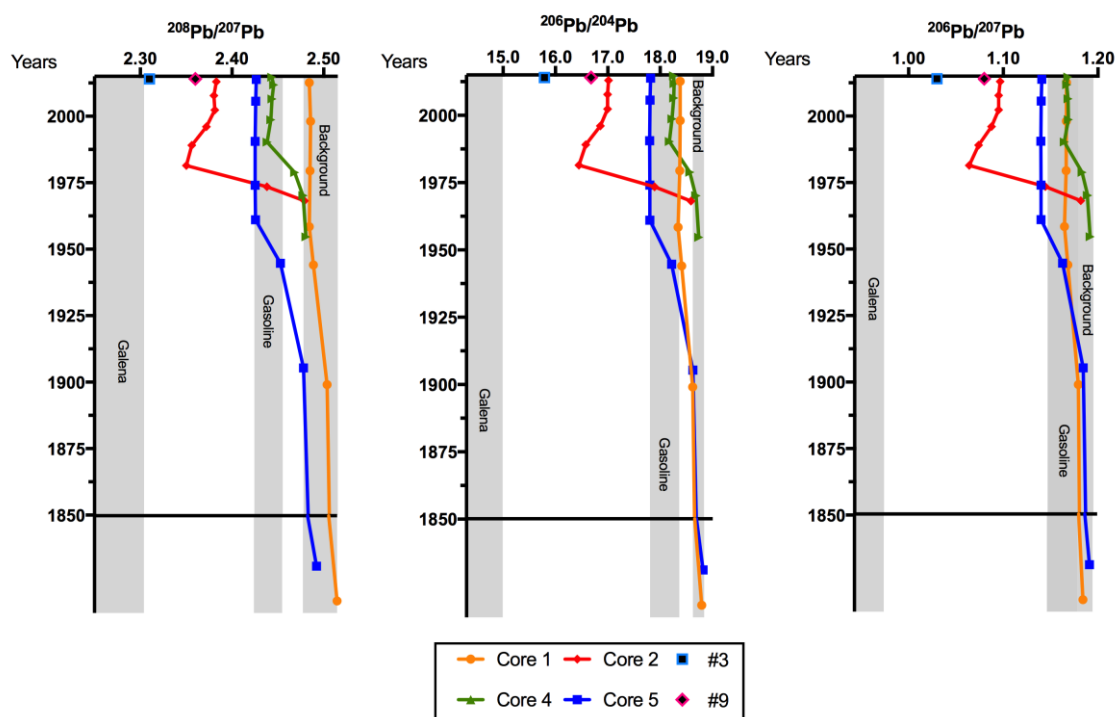
O trabalho de Andrade ilustra a aplicação da datação de sedimentos no estudo do histórico da poluição da BTS com metais pesados.<sup>30</sup> Quatro testemunhos, de até um

metro de comprimento, foram coletados nos locais assinalados na Figura 8 e datados em cooperação com a Universidade Autônoma de Barcelona (Espanha). Dentre os resultados, destaca-se o uso da análise isotópica do chumbo ( $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$ ), que permitiu diferenciar a fonte de chumbo no ponto #2, perto do rio Subaé, que drena a região contaminada de Santo Amaro (Figura 8 e 9).

Dos quatro isótopos estáveis de chumbo, três deles tem origem radiogênica,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$ , representando o final da cadeia de decaimento radioativos do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , respectivamente. Dependendo do tempo de formação do minério de chumbo e da proporção relativa existente das impurezas de U e Th, a composição isotópica do chumbo no minério se altera, sendo empregado na diferenciação da origem do chumbo, não só em estudos ambientais,<sup>31,32</sup> como, também, na arqueologia.<sup>33,34</sup>



**Figura 8.** Baía de Todos os Santos com os locais onde foram retirados os testemunhos (triângulos vermelhos) (Reproduzida da figura 1 da referência 30 com autorização da autora)



**Figura 9.** Perfis sedimentares datados e a variação temporal das razões isotópicas de chumbo, com destaque para o ponto 2 (em vermelho) (Reproduzida da figura 2 da referência 30 com autorização da autora)

## 6.2. Baía de Guanabara

Embora com uma área equivalente apenas a 1/3 daquela da baía de Todos os Santos, a baía de Guanabara possui em seu entorno uma população quatro vezes maior, desta forma seus problemas ambientais, em particular, àqueles relacionados à drenagem de esgotos domésticos, são mais agudos. Adicionalmente, a baía de Guanabara possui, além da refinaria de Duque de Caxias (REDUC), outras instalações relevantes, ligadas ao setor de petróleo, como terminais de óleo. Tais terminais possuem um histórico de derramamentos de grandes volumes de óleo, como o ocorrido em 2000, com o vazamento de 1,3 milhões de litros de óleo.

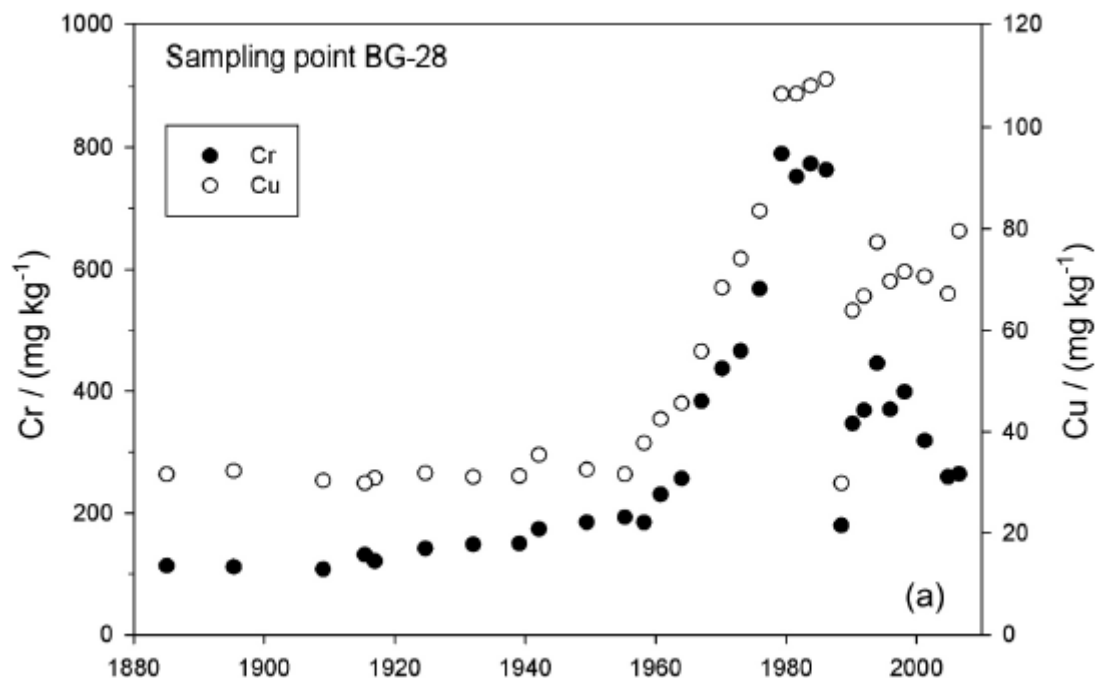
Além das instalações petrolíferas, o entorno da baía da Guanabara abriga indústrias de elevado potencial poluidor como a indústria cloro-alcalina Katrium, com células eletroquímicas contendo mercúrio. Ademais, outras instalações de grande potencial

poluidor existiam em seu entorno e foram descontinuadas como, por exemplo, o Curtume Carioca, que empregava sais de cromo no seu processo industrial, e a fábrica de sais de cromo da Bayer. Desta forma, diferentes marcadores alternativos podem ser utilizados no processo de validação da datação com  $^{210}\text{Pb}$ : Hg,  $^{13}\text{Cr}$ ,  $^{35}\text{S}$  ou HPAs,<sup>15</sup> como exemplificado na Figura 10, onde o pico de cromo e cobre representa a entrada em funcionamento da estação de tratamento de efluentes da fábrica da Bayer, em 1982, com o conseqüente decréscimo nas concentrações durante os anos posteriores.<sup>35</sup>

O trabalho publicado por Godoy e outros faz uma revisão de diferentes artigos relacionados ao tema na baía da Guanabara, além de acrescentar dados adicionais.<sup>35</sup> A Figura 10 mostra os locais onde foram retirados testemunhos sedimentares para a datação com  $^{210}\text{Pb}$  e a tabela 1 resume os resultados destes trabalhos, pode-se notar que, devido às diferentes intervenções humanas que retificaram os principais rios

que desembocam na baía e que, também, reduziram a sua área, a baía apresenta uma aceleração da sua taxa de assoreamento,

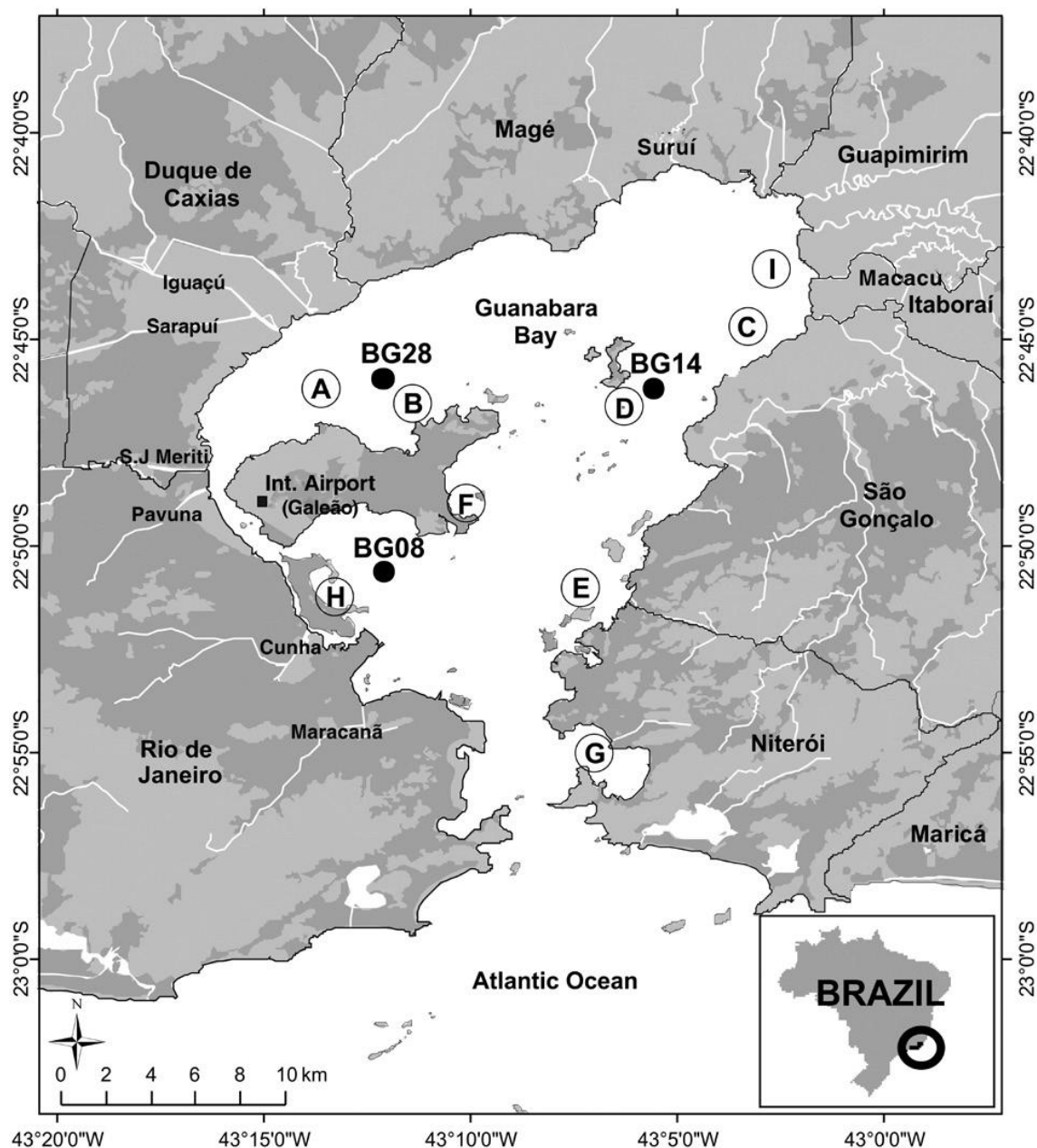
sendo os próprios sedimentos uma das principais causas atuais de degradação da baía da Guanabara.



**Figura 10.** Variação temporal dos perfis de cromo e cobre em testemunho coletado na baía da Guanabara, o pico observado em 1980 corresponde a entrada em funcionamento da estação de tratamento de efluentes da fábrica de sais de cromo da Bayer (Reprodução da Figura 4a da referência 35 com autorização, Copyright© 2012 Journal of Brazilian Chemical Society)

**Tabela 1.** Revisão de velocidades de sedimentação na Baía da Guanabara determinadas através da datação com  $^{210}\text{Pb}$ , denominação dos locais de amostragem conforme Figura 11

| Local de amostragem | Velocidade de sedimentação (cm ano <sup>-1</sup> ) | Período   | <sup>210</sup> Pb fluxo (mBq cm <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup> ) | Referência |
|---------------------|----------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| A                   | 2,2±0,4                                            | 1985-1992 | (22,6±1,2)                                                        | 13         |
|                     | 0,57±0,08                                          | 1959-1985 |                                                                   |            |
|                     | 0,24±0,01                                          | <1959     |                                                                   |            |
| B                   | 1,3±0,1                                            | 1959-1992 |                                                                   |            |
|                     | 0,12±0,03                                          | <1959     |                                                                   |            |
| C                   | 0,86±0,02                                          | 1946-1992 |                                                                   |            |
|                     | 0,19±0,03                                          | <1946     |                                                                   |            |
| D                   | 1,5±0,1                                            | 1978-1992 |                                                                   |            |
|                     | 0,50±0,05                                          | 1948-1978 |                                                                   |            |
|                     | 0,26±0,02                                          | <1948     |                                                                   |            |
| E                   | 2,2±0,2                                            | 1985-1992 |                                                                   |            |
|                     | 0,65±0,03                                          | 1957-1985 |                                                                   |            |
|                     | 0,17±0,01                                          | <1957     |                                                                   |            |
| F                   | 1,76                                               | 1982-1996 | 21,9                                                              | 15         |
|                     | 0,66                                               | 1967-1982 |                                                                   |            |
|                     | 0,22                                               | <1967     |                                                                   |            |
| G                   | 0,62                                               | 1939-1996 | 18,5                                                              |            |
|                     | 0,17                                               | <1939     |                                                                   |            |
| H                   | 0,49                                               | 1935-1982 | 11,7                                                              |            |
|                     | 0,19                                               | <1935     |                                                                   |            |
| I                   | 0,77                                               | 1950-2007 | Não disponível                                                    | 36         |
|                     | 0,42                                               | <1950     |                                                                   |            |
| BG-08               | 0,984±0,014                                        | 1984-2006 | 85                                                                | 35         |
|                     | 0,568±0,011                                        | 1956-1984 |                                                                   |            |
|                     | 0,440±0,033                                        | <1956     |                                                                   |            |
| BG-28               | 0,960±0,071                                        | 1990-2006 | 23,6                                                              |            |
|                     | 0,680±0,016                                        | 1949-1988 |                                                                   |            |
|                     | 0,281±0,019                                        | <1949     |                                                                   |            |

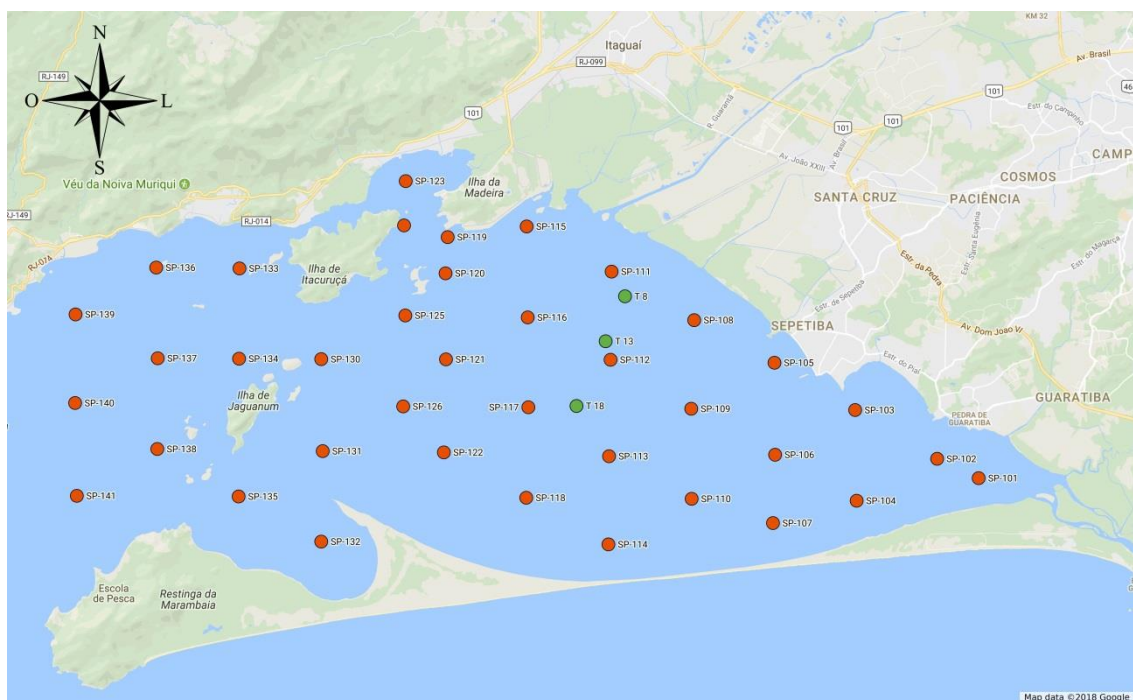


**Figura 11.** Locais onde foram retirados testemunhos para datação com  $^{210}\text{Pb}$  na baía da Guanabara (Reprodução da Figura 1 da referência 35 com autorização, Copyright© 2012 Journal of Brazilian Chemical Society)

### 6.3. Baía de Sepetiba

A Baía de Sepetiba representa um dos casos emblemáticos em termos de desastres ambientais, causados pelo rompimento de

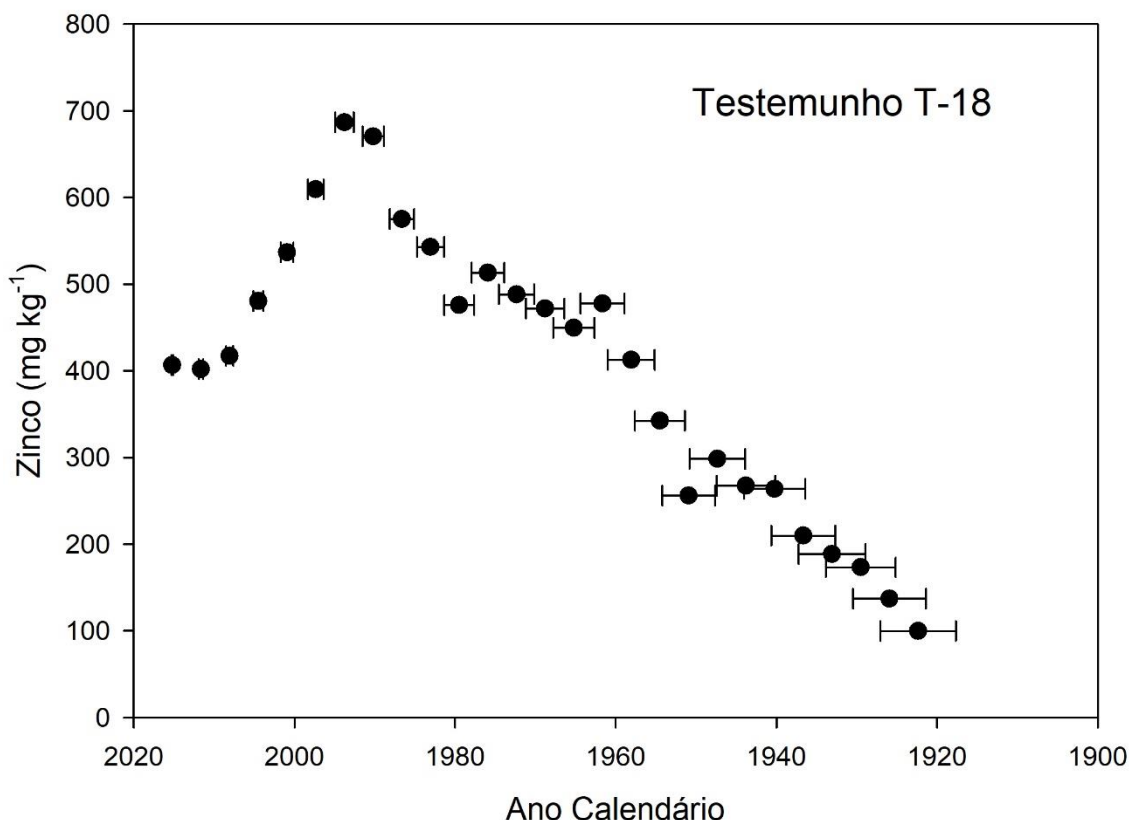
bacias de rejeitos, no Brasil. A Companhia Mercantil Ingá foi instalada na Ilha da Madeira (Figura 12) em 1962, visava produzir zinco e cádmio, chegando a fabricar 30 % do zinco produzido no Brasil.<sup>37</sup>



**Figura 12.** Mapa da baía de Sepetiba, com pontos em vermelho representando pontos de coleta de sedimento superficial e os em verdes pontos de coleta de testemunhos de sedimento (Reproduzida da figura 1 da referência 37 com autorização, Copyright© 2018 Elsevier)

Em fevereiro de 1996, após intensas chuvas de verão, o dique de armazenamento de rejeito da companhia rompeu-se espalhando zinco e cádmio na baía de Sepetiba. Este evento encontra-se refletido

nos testemunhos de sedimento coletados (Figura 13), com o pico de zinco bem acentuado, e serve como ferramenta de validação da datação com  $^{210}\text{Pb}$ .

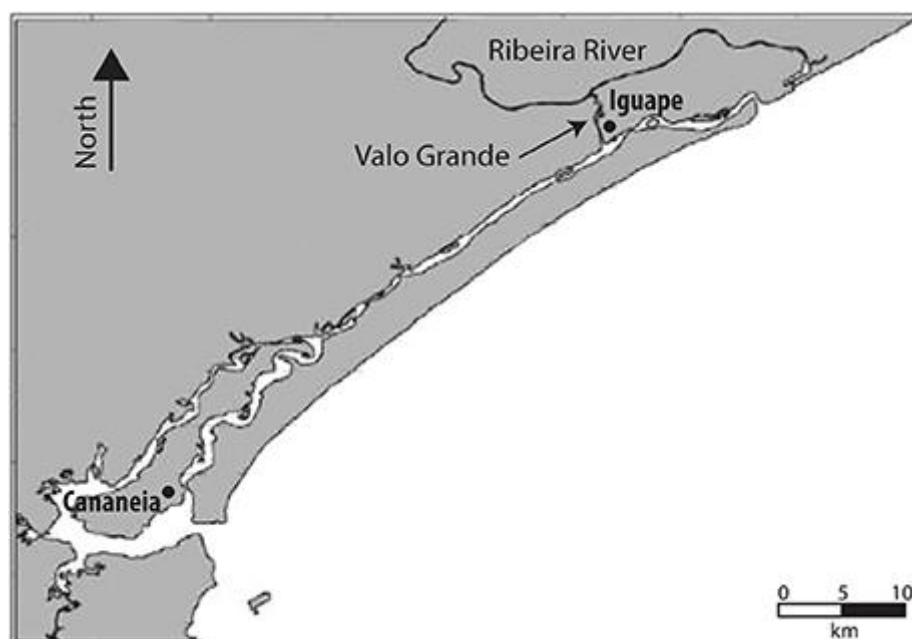


**Figura 13.** Variação temporal da concentração de zinco em testemunho coletado na baía de Sepetiba (Modificado da figura 4f da referência 37, Copyright© 2018 Elsevier)

#### 6.4. Sistema Lagunar Cananéia-Iguape

A região do sistema lagunar Cananéia-Iguape representa um interessante ecossistema no qual a determinação da variação temporal das próprias taxas de sedimentação se torna imprescindível nos estudos envolvendo qualidade de sedimentos. A Figura 14 mostra o sistema lagunar com o chamado Valo Grande

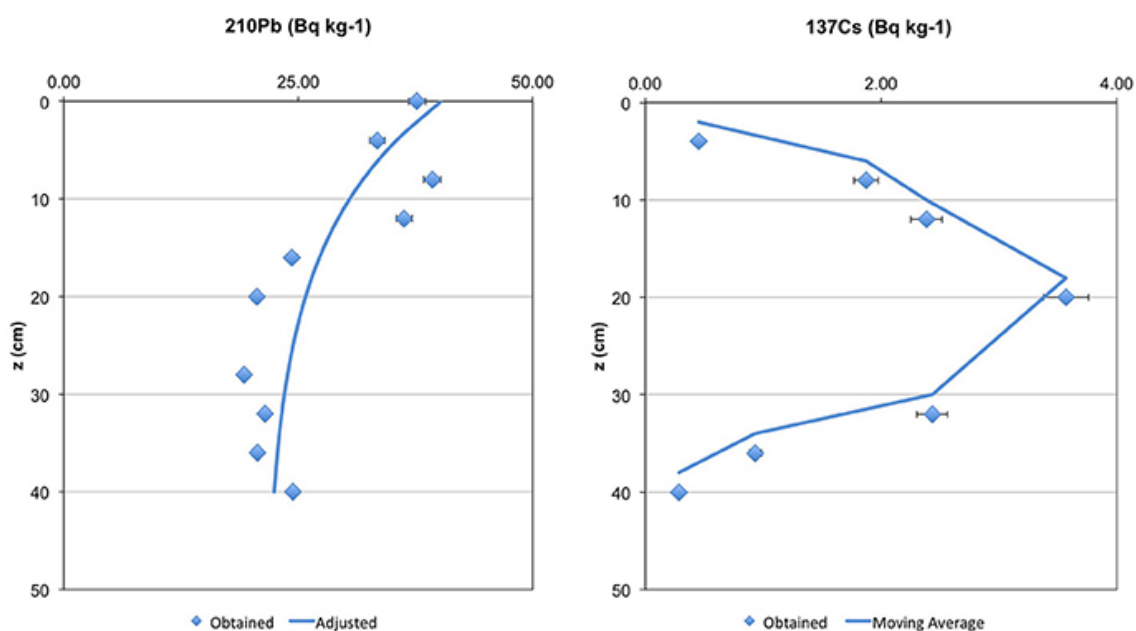
assinalado, o Valo Grande é um canal artificial, ligando o rio Ribeira à lagoa. Este canal foi construído em 1832, com o intuito de escoar a produção agrícola até o Porto de Iguape, sua construção se revelou um desastre ambiental, levando a perda de áreas habitáveis e agrícolas.<sup>38</sup> Na tentativa de mitigar estas perdas, o canal sofreu várias intervenções posteriores com a construção e demolição de barragens, o que levou a variações no aporte de sedimentos para o sistema lagunar.



**Figura 14.** Sistema lagunar Cananéia- Iguape, com o canal do Valo Grande em destaque (Reprodução da Figura 1 da referência 38, Copyright© free Frontiers in Earth Science)

A Figura 15 mostra o perfil de  $^{210}\text{Pb}$  em testemunho coletado na região próxima à cidade de Cananéia o qual, talvez por se encontrar distante do canal do Valo Grande, apresenta um comportamento típico do

modelo CR-CF, com uma velocidade de sedimentação constante. Interessante, também, notar que os autores conseguiram obter um perfil de  $^{137}\text{Cs}$ , o qual foi empregado na validação dos resultados da datação.



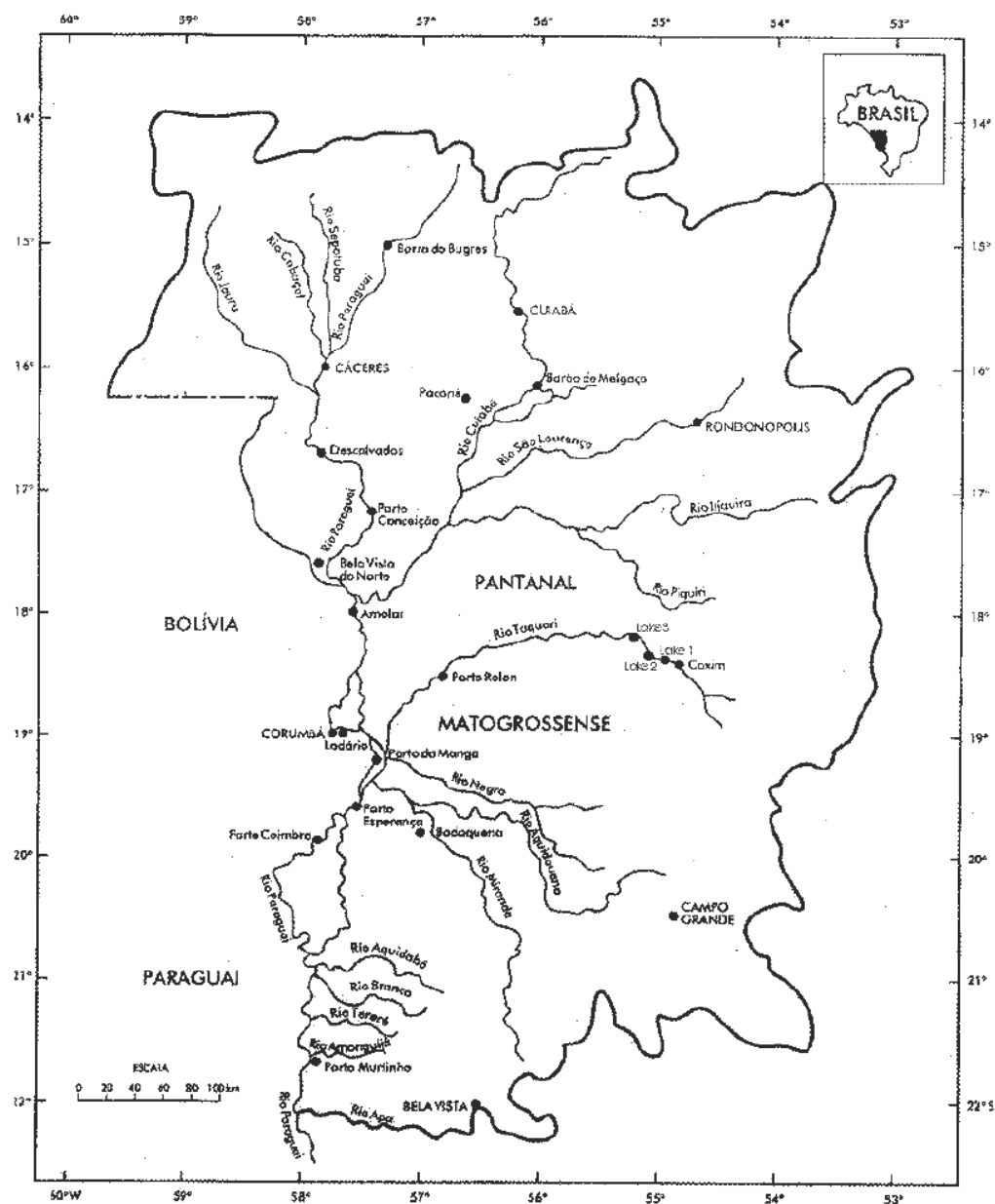
**Figura 15.** Perfis de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  obtidos em um testemunho coletado próximo a cidade de Cananéia (Reprodução da Figura 7 da referência 38, Copyright© free Frontiers in Earth Science)

### 6.5. Pantanal Mato-grossense

O trabalho desenvolvido na região do pantanal mato-grossense foi escolhido de modo a demonstrar uma aplicação da datação com  $^{210}\text{Pb}$  num ambiente bem distinto dos exemplos anteriores. A grosso modo, a bacia do rio Taquari (MS) (Figura 16) pode ser dividida em duas regiões bem distintas: a região de maior altitude, onde é praticada a agricultura intensiva, e a região das terras

baixas, que abriga o pantanal, e onde é desenvolvida a pecuária.

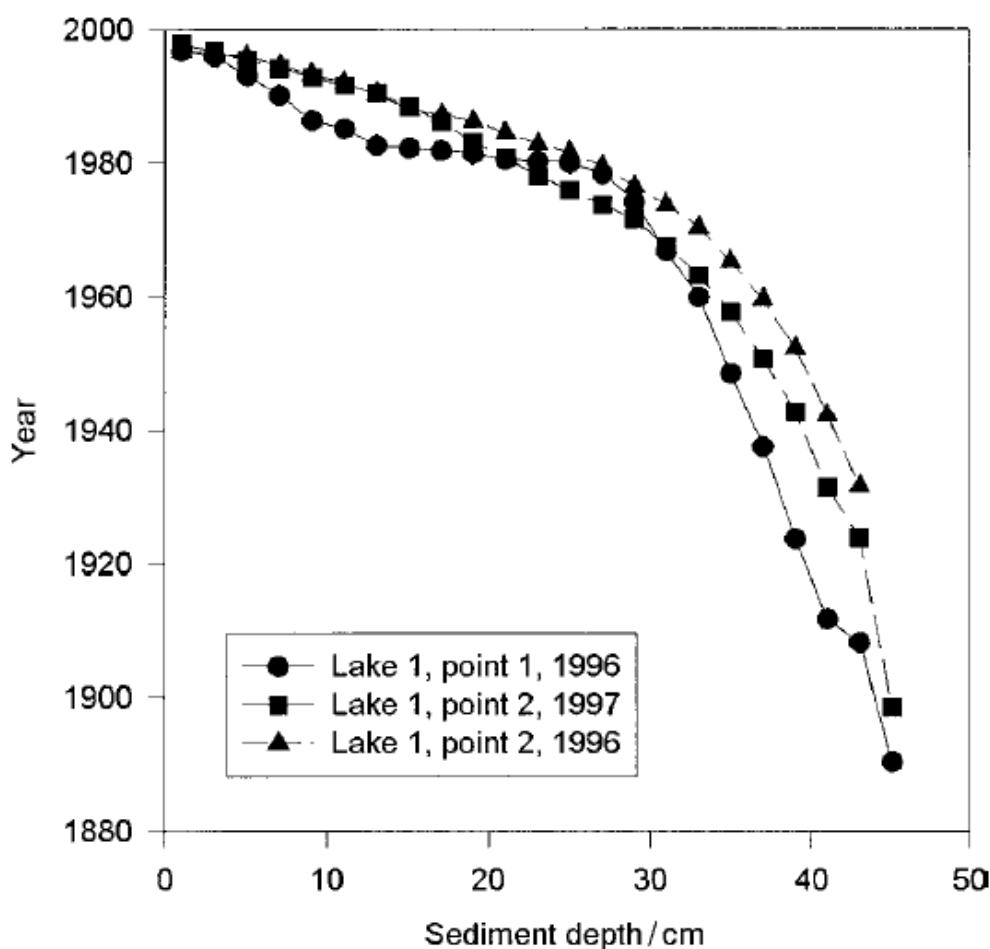
Nas terras altas é visível o processo de erosão com a ocorrência de voçorocas, levando ao assoreamento do rio Taquari na sua parte baixa. Diferentes filmes abordando a questão podem ser encontrados na internet, ilustrando bem a questão (por exemplo: <http://g1.globo.com/mato-grosso-do-sul/bom-dia-ms/videos/v/veja-como-o-assoreamento-do-rio-taquari-afeta-a-bacia-pantaneira/4410045/>).



**Figura 16.** Mapa da região do pantanal mato-grossense (Reprodução da Figura 1 da referência 39 com autorização, Copyright© 2002 Journal of Brazilian Chemical Society)

Diante da questão de como provar a associação do aumento do assoreamento do rio Taquari com a expansão da atividade agrícola nas terras altas, optou-se por trabalhar com as chamadas lagoas de inundação localizadas já na porção baixa do rio. Estas lagoas encontram-se isoladas do rio durante a época de seca, recebendo água apenas na época de cheia, sendo áreas de acumulação de sedimentos. A Figura 17 mostra os resultados em três testemunhos

distintos da lagoa 1, sendo que os pontos 1 e 2 estavam situados em margens opostas da lagoa. Os três testemunhos mostram o mesmo padrão com uma aceleração da taxa de sedimentação no início dos anos 1970. Esta aceleração coincide com uma aceleração da ocupação agrícola das terras altas, corroborando a hipótese da relação entre esta expansão agrícola e o assoreamento na parte baixa do rio.<sup>39</sup>



**Figura 17.** Resultado da datação em três testemunhos de um mesmo lago na região baixa da bacia do rio Taquari, mostrando a aceleração da velocidade de sedimentação no início dos anos 1970 (Reprodução da Figura 3 da referência 39 com autorização, Copyright© 2002 Journal of Brazilian Chemical Society)

## 7. Conclusões

Considerando o tempo de meia-vida do  $^{14}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 5730$  anos) e o início do período da grande aceleração no Antropoceno (1950), sua aplicação para fins de datação neste novo período geológico não é a mais adequada. O  $^{210}\text{Pb}$  um radionuclídeo natural, cujo tempo de meia vida de 22,2 anos é compatível com a duração deste período (68 anos) tem sido uma alternativa amplamente empregada, em especial, na geocronologia de sedimentos.

A geocronologia de sedimentos tem-se mostrado uma ferramenta muito útil na reconstrução do histórico dos impactos ambientais relacionados com o rápido crescimento da Humanidade desde a década de 1950. Sua introdução no Brasil remonta 1986 e, desde então, vem apresentando uma crescente aplicação.

### Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> Crutzen, P. J.; Stoermer, E. F. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* **2000**, 41, 17. [CrossRef]
- <sup>2</sup> Crutzen, P.J.; Steffen, W. How Long Have We Been in the Anthropocene Era? *Climatic Change* **2003**, 61, 251. [CrossRef]
- <sup>3</sup> Silva, C. M.; Arbilla, G. Antropoceno: Desafios de um Novo Mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, 10, 1619. [CrossRef]
- <sup>4</sup> Schidberger, A.; Durner, B.; Ghermeyer, D.; Schupfner, R. Development and application of a method for ivory dating by analyzing radioisotopes to distinguish from illegal ivory. *Forensic Science International* **2018**, 289, 363. [CrossRef]
- <sup>5</sup> Petrucci, F.; Caforio, L.; Fedi, M.; Mando, P.A.; Peccenini, E.; Pellicori, V.; Rylands, P.; Schwartzbaum, P.; Taccetti, F. Radiocarbon dating of twentieth century works of art. *Applied Physics A* **2016**, 122, 983. [CrossRef]
- <sup>6</sup> Cappella, A.; Gibelli, E.; Muccino, E.; Scarpulla, V.; Cerutti, E.; Caruso, V.; Sguazza, E.; Mazzealli, D.; Cattanco, C. The comparative performance of PMI estimation in skeletal remains by three methods (C-14, luminol test and OHI): analysis of 20 cases. *International Journal of Legal Medicine* **2018**, 133, 1215. [CrossRef]
- <sup>7</sup> Schrag, B.; Uldin, T.; Mangin, P.; Bochud, F.; Froidevaux, P. Dating human skeletal remains using  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{210}\text{Pb}$ : Case studies. *Forensic Science International* **2014**, 234, 190. [CrossRef]
- <sup>8</sup> Wilken, R.D.; Moreira, I.; Rebello, A.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Fluxes in a Sediment Core from Guanabara Bay, Brazil. *Science of the Total Environment* **1986**, 58, 195. [CrossRef]
- <sup>9</sup> Fernex, F.; Bernat, M.; Ballestra, S.; Fernandez, L. V.; Marques, A. N. Ammonification Rates and  $^{210}\text{Pb}$  in Sediments from a Lagoon under a Wet Tropical Climate - Marica, Rio de Janeiro State, Brazil. *Hydrobiology* **1992**, 242, 69. [CrossRef]
- <sup>10</sup> Allison, M. A.; Nittrouer, C. A.; Faria, L. E. C. Rates and Mechanisms of Shoreface Progradation and Retreat Downdrift of Amazon River Mouth. *Marine Geology* **1995**, 125, 373. [CrossRef]
- <sup>11</sup> Sommerfield, C. K.; Nittrouer, C. A.; Figueiredo, A. G. Stratigraphic Evidence of Changes in Amazon Shelf Sedimentation during the Late Holocene. *Marine Geology* **1995**, 125, 351. [CrossRef]
- <sup>12</sup> Kuehl, S. A.; Nittrouer, C. A.; Allison, M. A.; Faria, L. E. C.; Dukat, D. A.; Jaeger, J. M.; Pacioni, T. D.; Figueiredo, A. G.; Underkoffler, E. C. Sediment, Accumulation and Seabed Dynamics in an Energetic Fine-grained Coastal Environment. *Continental Shelf Research* **1996**, 16, 787. [CrossRef]
- <sup>13</sup> Godoy, J. M.; Moreira, I.; Bragança, M. J.; Wanderley, C.; Mendes, L. B. A study of Guanabara Bay sedimentation rates. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **1998**, 227, 157. [CrossRef]
- <sup>14</sup> Cothorn, C. R.; Rebers, P. A.; *Radon, Radium and Uranium in Drinking Waters*. CRC Press: Flórida, 1990.

- <sup>15</sup> Lima, A. L. C.; *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 1996.
- <sup>16</sup> Garcia-Orellana, J. *Determinación de <sup>210</sup>Pb y otros Radionuclídeos* em: Sanchez-Cabeza, J.A.; Diaz-Asencio, M.; Ruiz-Fernandes, A.C. *Radiocronologia de Sedimentos Costeros Utilizando <sup>210</sup>Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones*. Viena, Agência Internacional de Energia Nuclear, STI/PUB/1538, 2012, ISBN 978-92-0-325210-2. [Link]
- <sup>17</sup> Mabit, L.; Benmansour, M.; Abril, J. M.; Walling, D. E.; Meusburger, K.; Iurian, A. R.; Bernard, C.; Trajan, S.; Owens, P. N.; Blake, W. H.; Alewell, C. Fallout <sup>210</sup>Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review. *Earth Science Review* **2014**, 138, 335. [CrossRef]
- <sup>18</sup> Godoy, J. M.; Moreira, I.; Wanderley, C.; Simões-Filho, F. F.; Mozeto, A. A. An Alternative Method for the Determination of Excess <sup>210</sup>Pb in Sediments. *Radiation Protection and Dosimetry* **1998**, 75, 1. [CrossRef]
- <sup>19</sup> Mabit, L.; Benmansour, M.; Walling, D. E. Comparative advantage and limitation of the fallout radionuclides <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb and <sup>7</sup>Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity* **2008**, 99, 1799. [CrossRef]
- <sup>20</sup> Vesterbacka, P.; Ikaheimonen, T.K. Optimization of <sup>210</sup>Pb determination via spontaneous deposition of <sup>210</sup>Po on a silver disk. *Analytica Chimica Acta* **2005**, 545, 252. [CrossRef]
- <sup>21</sup> Ebaid, Y. Y.; Kahter, A. E. M. Determination of <sup>210</sup>Pb in environmental samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2006**, 270, 609. [CrossRef]
- <sup>22</sup> Carol, J.; Leche, I. *Sedimentary Processes: Quantification Using Radionuclides*, Radioactivity in the Environment volume 5, Elsevier Science: Amsterdã, 2003.
- <sup>23</sup> Ivanovich, M.; Harmon, H. S.; *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*, 2nd Ed., Oxford Science Publications: Oxford, 1992.
- <sup>24</sup> Sanchez-Cabeza, J. A.; Ruiz-Fernandes, A. C. <sup>210</sup>Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica Cosmochimica Acta* **2012**, 82, 183. [CrossRef]
- <sup>25</sup> Appleby, P. G. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review. *Holocene* **2008**, 18, 83. [CrossRef]
- <sup>26</sup> MacKenzie, A. B.; Hardie, S. M. L.; Farmer, J. G.; Eades, L. J.; Pulford, I. D. Analytical and sampling constraints in <sup>210</sup>Pb dating. *Science of the Total Environment* **2011**, 409, 1298. [CrossRef]
- <sup>27</sup> Sanchez-Cabeza, J. A.; Diaz-Asencio, M.; Ruiz-Fernandes, A. C. *Radiocronologia de Sedimentos Costeros Utilizando <sup>210</sup>Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones*. Viena, Agência Internacional de Energia Nuclear, STI/PUB/1538, 2012. [Link]
- <sup>28</sup> Hatje, V.; Andrade, J. B. *Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos*, EDUFA: Salvador, 2009.
- <sup>29</sup> Santos, M. C. B.; Kede, M. L. F. M.; Moreira, J. C.; Mavropoulos, E.; Rossi, A. M.; Bertolino, L. C.; Pérez, D. V.; Santelli, R. E.; Bielchowsky, C.; Soares, R. Avaliação da Toxicidade e Comportamento Geoquímico do Chumbo em Solos Contaminados de Santo Amaro da Purificação (BA) após Atenuação por Fósforo. *Revista Virtual de Química* **2017**, 9, 2135. [CrossRef]
- <sup>30</sup> Andrade, R. L. B.; *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2016.
- <sup>31</sup> Gemeiner, H.; Dourado, T. A.; Sulato, E. T.; Galhardi, J. A.; Gomes, A. C. F.; Almeida, E.; Menegário, A. A.; Gastmans, D.; Kiang, C. H. Elemental and isotopic determination of lead (Pb) in particulate matter in the Brazilian city of Goiânia (GO) using ICP-MS technique. *Environmental Science Pollution Research* **2017**, 24, 20616. [CrossRef]

- <sup>32</sup> Geraldles, M. C.; Paula, A. H.; Godoy, J. M.; Valeriano, C. M. Pb isotope signatures of sediments from Guanabara Bay, SE Brazil: Evidence for multiple anthropogenic sources. *Journal of Geochemical Exploration* **2006**, *88*, 384. [CrossRef]
- <sup>33</sup> Albarède, F.; Desaulty, A-M; Blichert-Toft, J. A Geological Perspective on the Use of Pb Isotopes in Archaeometry. *Archaeometry* **2012**, *54*, 5. [CrossRef]
- <sup>34</sup> Aggarwal, J.; Habicht-Mauche, J.; Juarez, C. Application of heavy stable isotopes in forensic isotope geochemistry: A review. *Applied Geochemistry* **2008**, *23*, 2658. [CrossRef]
- <sup>35</sup> Godoy, J. M.; Oliveira, A. V.; Almeida, A. C.; Godoy, M. L. D. P.; Moreira, I.; Wagener, A. R.; Figueiredo Junior, A. G. Guanabara Bay Sedimentation Rates based on <sup>210</sup>Pb Dating: Reviewing the Existing Data and Adding New Data. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2012**, *23*, 1265. [CrossRef]
- <sup>36</sup> Monteiro, F. F.; Cordeiro, R. C.; Santelli, R. E.; Machado, W.; Evangelista, H.; Villar, L. S.; Viana, L. C. A.; Bidone, E. D.; Sedimentary geochemical record of historical anthropogenic activities affecting Guanabara Bay (Brazil) environmental quality. *Environmental Earth Science* **2012**, *65*, 1661. [CrossRef]
- <sup>37</sup> Gonçalves, R. A.; Oliveira, D. F.; Ferreira, P. H. G.; Rezende, C. E.; Almeida, P.; Lacerda, L. D.; Godoy, J. M. Decadal and spatial variation of Hg concentrations in sediments of a multi-stressor impacted estuary. *Marine Pollution Bulletin* **2018**, *135*, 1158. [CrossRef]
- <sup>38</sup> Cornaggia, F.; Jovane, L.; Alessandretti, L.; Ferreira, P. A. L.; Figueira, R. C. L.; Rodelli, D.; Berbel, G. B. B.; Braga, E. S. Diversions of Ribeira River Flow and their Influence on Sediment Supply in the Cananeia-Iguape Estuarine-Lagoonal System (SE Brazil). *Frontiers Earth Science* **2018**, *6*, 1. [CrossRef]
- <sup>39</sup> Godoy, J.M.; Padovani, C.R.; Guimarães, J.R.D.; Pereira, J.C.A.; Vieira, L.M.; Carvalho, Z.L.; Galdino, S. Evaluation of the Siltation of River Taquari, Pantanal, Brazil, through <sup>210</sup>Pb Geochronology of Floodplain Lake Sediments. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2002**, *13*, 71. [CrossRef]