



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

Daniel Ferreira Araújo

QUÍMICA E A IDADE DA TERRA

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Brasília – DF

2º/2011



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

Daniel Ferreira Araújo

QUÍMICA E A IDADE DA TERRA

Monografia de Graduação em Ensino de Química apresentada ao Instituto de Química da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciada(o) em Química.

Orientador: Gerson de Souza Mól

2º/2011

“Onde a árvore cresceu, hoje ruge o oceano.
Ó Terra, que mudanças viste!
E onde agora freme a avenida,
Reinava a quietude do mar central.”

Alfred Tennyson

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta e indireta de muitas pessoas, mas antes de tudo, agradeço aquela que esteve sempre ao meu lado, com apoio e amor incondicional (além de muita paciência): Mãe Ursa, obrigado por tudo!

Também não poderia deixar de agradecer aos incríveis amigos que compartilharam comigo a aventura de desvendar os mistérios da Química: Eduardo (Dudu), cuja parceria nas longas madrugadas de estudo e debates químicos se tornaram inesquecíveis; a minha amiga Rachel pela alegria sempre contagiante e a paciência para comigo; a minha amiga Danielle (Dani) pela companhia no laboratório e pelas divertidas conversas.

Agradeço também a minha querida amiga e futura geóloga Jéssica Rolim pela ajuda nos assuntos geológicos, empréstimos de livros, organização de churrascos e elaboração de drinques.

Deixo a minha imensa gratidão ao meu orientador de pós-graduação em Geologia Geraldo Boaventura, pelo apoio, confiança e incentivo e também pela inspiração pelos estudos geoquímicos.

Agradeço ao meu amigo Ronaldo pelas correções e revisões de texto, e muitas e muitas outras coisas que não caberiam nestas linhas.

Agradeço ao meu orientador Gérson Mol, pelo apoio, sugestões e incentivo no desenvolvimento deste trabalho e ao professor Roberto Ribeiro (Bob) pelas correções e sugestões.

À minha “namorada” Verónica, pelo amor e paciência de cada dia.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	viii
INTRODUÇÃO	viii
GEOCIÊNCIAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS: UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM CTS	11
CTS e controvérsias científicas	13
TEMPO GEOLÓGICO: UM TEMA PARA ENSINAR GEOCIÊNCIAS	16
O ensino da Geocronologia e a transposição didática	17
METODOLOGIA	19
Considerações finais	24
Referências bibliográficas	25
Anexos	59

RESUMO

A atual Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (nº 9394/96) propõe entre vários outros aspectos referentes aos componentes curriculares, que estes promovam a articulação e a integração dos conhecimentos tendo em vista à interdisciplinaridade e contextualização.

Infelizmente, a apresentação dos conteúdos relacionados às Ciências Naturais durante o Ensino Médio ocorre de maneira fragmentada. Tal fragmentação é evidente no que diz respeito aos conhecimentos referentes às Geociências, nas quais diversos conceitos são dispersos por conteúdos desarticulados, faltando assim, uma ordenação capaz de explicar a Terra como um sistema integrado. Desta maneira, se torna inviável compreender a origem, a evolução, as interações das diferentes esferas (litosfera, atmosfera, biosfera, hidrosfera) e o conceito de tempo geológico. Este último tem um papel de destaque já que se apresenta como uma das mais importantes contribuições das geociências para o pensamento humano e um conceito indispensável ao educando para compreender a dinâmica terrestre, a história da Terra e da vida.

Neste sentido, este trabalho busca resgatar o processo histórico que envolve a determinação da idade da Terra. São apresentadas desde as primeiras idéias vinculadas a religião que preponderavam na Idade média, passando pela Revolução Científica e pelo surgimento de novas Ciências como Geologia e da Paleontologia no século XVII que promoveram a mudança de concepção de tempo e distanciamento dos dogmas religiosos. Também enfatiza-se as diversas controvérsias que surgiram entre físicos, geólogos e biólogos no século XIX, notadamente entre Lord Kelvin e Charles Darwin a respeito da idade da Terra, e como Rutherford conseguiu encontrar, através da radioatividade, a solução deste enigma, ao realizar a primeira datação de um mineral, criando assim, uma nova Ciência, a Geocronologia. Também é feita uma introdução teórica sobre o método radiométrico Pb-Pb, que possibilitou a determinação por Claire Patterson em 1956 de 4,5 bilhões de anos para a idade da Terra, a partir de amostras de meteoritos, valore este aceito até os dias de hoje. Por último, é apresentada a escala do tempo geológico, bem como um convite à reflexão sobre a magnitude do tempo de nosso planeta.

Palavras-chaves: Idade da Terra; Datação isotópica; Claire Patterson.

INTRODUÇÃO

A atual Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (nº 9394/96) propõe entre vários outros aspectos referentes aos componentes curriculares, que estes promovam a articulação e a integração dos conhecimentos tendo em vista à interdisciplinaridade e contextualização. Logo, a LDB estabelece estes dois fatores como imprescindíveis na educação que visa preparar o educando para a vida, para o trabalho e para exercício da cidadania de forma crítica e consciente. Segundo (LUCK, 2001, p.64)

a interdisciplinaridade é o processo de integração e engajamento de educadores, num trabalho conjunto, de interação das disciplinas do currículo escolar entre si e com a realidade, de modo a superar a fragmentação do ensino, objetivando a formação integral dos alunos, afim de que exerçam a cidadania, mediante uma visão global de mundo e com capacidade para enfrentar os problemas complexos, amplos e globais da realidade.

Infelizmente, a apresentação dos conteúdos relacionados às Ciências Naturais durante o Ensino Médio ocorre de maneira fragmentada, provocando o fracionamento do conhecimento em disciplinas isoladas. A configuração e o âmbito dessas disciplinas são freqüentemente estabelecidos pelos livros didáticos, que delimitam os conteúdos e a seqüência dos tópicos (CORREIA *ET AL.*, 2004).

Em se tratando especificamente do ensino de Química, as Orientações Curriculares Para o Ensino Médio -OCPEM- reafirmam

a contextualização e a interdisciplinaridade como eixos centrais organizadores das dinâmicas interativas no ensino de química, onde a busca do diálogo entre diferentes áreas do conhecimento deve ser permanente. Diálogo que é favorecido quando os professores de diferentes componentes curriculares focam, como objeto de estudo, o contexto real, fenômenos naturais ou aplicações tecnológicas (BRASIL, 2006, Pg. 117).

Para promover este diálogo, os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN - propõem a utilização de temas transversais que incluem ética, pluralidade cultural, meio ambiente, saúde e orientação sexual; ou seja, temas que abordam questões urgentes e relevantes para a formação do aluno (MACEDO, 2006). Neste sentido, muitos autores têm abordado o tema

radioatividade em sala de aula, contemplando diversos aspectos como impactos ambientais, aplicações bélicas, aplicações na medicina, aspectos históricos, energia etc, em textos como, por exemplo “*História do tempo presente*” (Merçon & Quadrat, 2004); “*Raios X e radioatividade*” (CHASSOT, 1995) e “*O despertar da radioatividade no alvorecer do século XX*” (LIMA et al., 2011).

Desta forma, este trabalho propõe uma nova temática relacionada com a radioatividade e que apresenta grande potencial para articular o conhecimento químico com outras áreas do conhecimento: a Geocronologia e a idade da Terra.

Entende-se por Geocronologia, a ciência que estuda a determinação da idade dos minerais e conseqüentemente a idade terrestre, juntamente com outros eventos geológicos ocorridos, através da datação isotópica. (CARNEIRO et al., 2005 e GERALDES, 2010).

Acreditamos que o tema “a Química e a idade da Terra” possa promover, entre outras coisas:

- A compreensão da escala do tempo geológico, para que educando perceba o “lugar” que o homem ocupa na história do planeta, ou seja, situar a história da sociedade humana tendo em vista a idade de 4,5 bilhões de anos da Terra;
- A percepção das transformações que o homem tem causado no ritmo de tempo da natureza;
- O entendimento da ciência como produto sócio-cultural do homem e que, portanto, sofre a influência direta do contexto histórico social.
- A utilização das controvérsias científicas relativas à Idade da Terra de maneira a desmistificar a concepção dos estudantes de imutabilidade na ciência.
- A percepção do desenvolvimento não linear da ciência ao longo da história.
- A percepção da complexidade de se calcular a Idade da Terra, e como diferentes métodos tecno-científicos desenvolvidos ao longo dos séculos formularam diferentes respostas.
- A compreensão das implicações da determinação da Idade da Terra na sociedade.
- A noção da importância da Geocronologia na compreensão da história do planeta e nos processos geológicos.
- O interesse de alunos e professores pelos temas de geociências, que ainda se encontram dispersos e fragmentados nos currículos escolares.

Em se tratando especificamente do ensino de Química, o foco do trabalho é a abordagem aos princípios de datação isotópica e as bases de dois importantes métodos radiométricos: o método U-Pb e o método Pb-Pb. O primeiro constitui um dos métodos mais robustos da geocronologia atual e foi o método utilizado na determinação da amostra terrestre mais antiga na década de 80. O segundo método tem grande importância histórica, porque foi o método utilizado por Claire Patterson, em 1956, para datações isotópicas de meteoritos e, considerando estes com a mesma idade da Terra, levou a determinação da idade da Terra como sendo igual a 4,5 bilhões de anos. Esta é a idade aceita atualmente.

Espera-se que as discussões a cerca dos métodos utilizados, possa levar a uma reflexão sobre a idade do planeta, no sentido que não seja uma determinação absoluta e inquestionável, ou seja, buscou-se mostrar aqui ao estudante que os métodos radiométricos se baseiam em diversas premissas e que portanto não se constituem como verdades absolutas.

O grande desafio para a aplicação dos conhecimentos da Geocronologia em sala de aula se refere à **transposição didática** a ser realizada. A Geocronologia é uma ciência nova, que se estabeleceu na década de 1940, com o aperfeiçoamento do espectrômetro de massa (GERALDES, 2010). No Brasil, esses trabalhos tiveram início somente em 1960 com o primeiro espectrômetro de massa instalado em São Paulo, e, portanto, é uma área da ciência que ainda se encontra em grande expansão e desenvolvimento, mas que tem se destacado cada vez mais como um conhecimento imprescindível para o desenvolvimento do país (GERALDES, 2010).

Levando esses aspectos em consideração, o intuito deste trabalho é realizar a transposição didática acerca do conhecimento relacionado à Geocronologia e a idade da Terra (contido principalmente em livros específicos de graduação e pós-graduação dos cursos de Geociências) de modo a fornecer aos professores de ensino médio um material que possam utilizar como tema transversal que possibilite articular a Química com outras disciplinas, tanto intra como inter-áreas, enfatizando as controvérsias científicas históricas no questionamento da idade da Terra sob uma abordagem ciência-tecnologia e sociedade (CTS).

Acreditamos também que este trabalho possa vir ser usado como um primeiro contato dos alunos de graduação de Química com a Geocronologia e com a Química Isotópica, pouco explorada nos currículos.

CAPÍTULO 1

GEOCIÊNCIAS NO ENSINO DE CIÊNCIAS: UMA PROPOSTA DE ABORDAGEM CTS

A partir da segunda metade do século XX um conjunto de processos e fatores, tais como a aceleração do desenvolvimento científico-tecnológico, a sociedade de consumo, a crise ambiental, a explosão da informática, a globalização e a pós-modernidade, revelaram que currículos estritamente disciplinares são cada vez menos adequados para tratar de temas pluridimensionais. Ou seja, esses temas não ocorrem isoladamente, mas sim mantêm interações com outros. Hoje, a preparação para o exercício da cidadania em uma realidade complexa exige a compreensão integrada dessa realidade (MARINHO, 2008).

Nesse sentido, as reformas educacionais apresentam propostas de mudanças na estrutura curricular, com a intenção de incorporar uma abordagem interdisciplinar para atender aos princípios da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB n.º 9394/96), que dá ênfase à formação geral do educando. É notável nos Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN – (BRASIL, 1997) que tais reformas se preocupam em superar a organização por disciplinas estanques e revigorar a integração e articulação dos conhecimentos, em um processo de interdisciplinaridade. Tal fato também é perceptível nos Parâmetros Curriculares do Ensino Médio – PCNEM– (BRASIL, 2000), quando este estabeleceu grandes áreas de conhecimento (Ciências da Natureza e Matemática, Ciências Humanas, Linguagens e Códigos) na busca de interações entre as linguagens, códigos e modelos específicos das diferentes ciências que a compõem. Propõe-se desta forma que as características comuns às ciências de uma determinada área permitam organizar e estruturar, de forma articulada, os temas sociais, os conceitos e os conteúdos associados à formação humano-social, na abordagem de situações reais facilitadoras de novas ações conjuntas”(BRASIL, 2000). O PCN+ acrescentam ainda que a organização em áreas não diluem e nem eliminam as disciplinas, apenas a interligam. Preserva-se, portanto, a identidade da Química, como campo disciplinar, que *“tem sua razão de ser, sua especificidade, seu modo de*

interrogar a natureza, de controlar respostas por meio de instrumentos técnicos e de linguagem peculiar” (BRASIL, 2002). Desta maneira, a Química e suas ferramentas próprias para descrever o mundo devem ser utilizadas como um instrumento que promova a ampliação cultural e a autonomia no exercício da cidadania e que se for apresentado como ciência, com seus conceitos, métodos e linguagens próprias, e como construção histórica, esteja relacionada ao desenvolvimento tecnológico e aos muitos aspectos da vida em sociedade (BRASIL, 2006)

De forma geral, os PCNEM e os PCN enfatizam o uso como eixos centrais a interdisciplinaridade e a contextualização na organização de dinâmicas interativas na sala de aula e ressaltam que estes se apresentam como recursos complementares para ampliar as inúmeras possibilidades de interação entre disciplinas (BRASIL, 2006).

Para contemplar esta interdisciplinaridade e a contextualização, os mesmos documentos ressaltam importância do uso de Temas Transversais como formas de relacionar diferentes disciplinas. Neste sentido, os Temas Transversais devem assumir um papel de eixo integrador, que pode ser o objeto de conhecimento, um projeto de investigação, um plano de intervenção, os quais podem estar unidos aos problemas sociais da comunidade escolar e possam servir como referência. A partir deste eixo integrador, os conceitos de cada disciplina são identificados e podem contribuir para descrever, explicar e prever soluções (MARINHO, 2008). No entanto, segundo o PCN+ (BRASIL, 2002, p.17), a idéia de *Perspectiva interdisciplinar de conteúdos educacionais apresentados com contexto, no âmbito de uma ou mais áreas, não precisa ser necessariamente de uma reunião de disciplinas, pois pode ser realizada numa única disciplina.*

O mesmo documento acrescenta ainda que

É importante perceber que, no interior de uma única disciplina, como a Química, um certo conteúdo pode ser desenvolvido com uma perspectiva intra-área, em seus aspectos energéticos e ambientais, ou com uma perspectiva inter-áreas, em seus aspectos históricos, geográficos, econômicos e políticos, ou mesmo culturais e de linguagens, sem precisar de um acordo interdisciplinar envolvendo diferentes professores” (BRASIL, 2002, pg.17).

Ao que se refere à temas que possibilitem o uso da Química de forma articulada com os demais componentes curriculares da área de Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias, bem como as demais áreas de estudo, algumas foram propostas no PCN+. Entre

elas destacamos a Química e a biosfera, a Química e atmosfera, a Química e hidrosfera e a Química e litosfera.

Nota-se aqui que estes temas possuem relações estreitas com o meio ambiente e, portanto, são temas importantes para articular conteúdos de educação ambiental, conforme o Plano Nacional de Educação – PNE (BRASIL, 2001) segundo o qual a educação ambiental, tratada como tema transversal, será desenvolvida como uma prática educativa integrada, contínua e permanente (BRASIL, 2006).

Devido à complexidade das atividades humanas e o meio natural, as questões de natureza ambiental passaram a integrar o corpo de conhecimentos básicos que uma pessoa deve possuir, para exercer, ao longo de sua vida, aquilo que se entende por cidadania responsável e conseqüente (CARNEIRO et al., 2004). Sendo assim,

fica claro que o ensino útil à vida e ao trabalho preconizado pelos PCNEM devem incluir o conhecimento integral sobre o funcionamento do ambiente e das relações de interdependência de todos os seus setores, inclusive a biosfera, numa perspectiva histórica da evolução planetária”. (TOLEDO, 2002)

Desta forma, a discussão sobre a necessidade de temas geológicos a serem abordados nos atuais níveis de ensino fundamental e médio vem se fortalecendo, com intermitências, no Brasil (CARNEIRO et al., 2004).

CTS e controvérsias científicas

Após uma euforia inicial com os resultados do avanço científico e tecnológico, nas décadas de 1960 e 1970, a degradação ambiental, bem como a vinculação do desenvolvimento científico e tecnológico às guerras (as bombas atômicas, a guerra do Vietnã com seu napalm desfolhante), fizeram com que a ciência e a tecnologia (C&T) se tornassem alvo de um olhar mais crítico (Auler & Bazzo, 2001). Desta forma, cresceu no mundo inteiro um movimento que passou a refletir criticamente sobre as relações entre ciência, tecnologia e sociedade. Esse movimento levou a proposição, a partir da década de 1970, de novos currículos no ensino de ciências que buscassem incorporar conteúdos ligados a contextos de ciência, tecnologia e sociedade – CTS (SANTOS, 2007).

Sendo assim, o enfoque CTS na educação, inclui a abordagem de temas e a busca de democratização de processos decisórios, e ainda uma busca pela interdisciplinaridade e

consequentemente o fim da fragmentação curricular. Desta forma, acredita-se que este tipo de enfoque possa promover entre outras coisas: o interesse dos estudantes em relacionar a ciência com aspectos tecnológicos e sociais, discutir as implicações sociais e éticas relacionadas ao uso da ciência-tecnologia (CT), adquirir uma compreensão da natureza da ciência e do trabalho científico, formar cidadãos científica e tecnologicamente alfabetizados capazes de tomar decisões informadas e desenvolver pensamento crítico e a independência intelectual (AULER, 2007).

Segundo Auler (2007), nesse cenário também começaram a se tornar mais comuns os estudos de controvérsias tecnocientíficas, talvez, exatamente, por essa emergência tão explícita de contradições ocasionadas pelo emprego dos conhecimentos provenientes desses campos, antes tidos como benéficos e seguros, e, também, pela amplitude que a apropriação midiática dos discursos científicos vinha ganhando há algumas décadas principalmente com o rádio e a TV, que voltam a atenção de todos para essas questões. Narasimhan (2001)¹ citado por Ramos e Silva (2007) define controvérsia científica *como uma disputa conduzida publicamente e mantida persistentemente, sobre um assunto de opinião considerado significativo por um número de cientistas praticantes*”.

Para Velho & Velho (2002), os estudos das controvérsias técnicas e científicas, no âmbito dos estudos sociais da ciência, emergem como foco de análises destes referenciais, “pois é mais fácil identificar as influências sociais (interesses e valores) sobre o conteúdo do conhecimento em situações de disputa do que nas de consenso”. Estes autores também retomam *que o enfoque nas controvérsias permitiria entender a maneira pela qual o status do conhecimento científico dependia de negociações e debates entre as partes interessadas, envolvendo diferentes segmentos da sociedade*.

Esses trabalhos no âmbito dos estudos sociológicos da ciência permitem um olhar mais abrangente para as atividades científicas e suas relações com a sociedade. Ao conceber as atividades científicas como elementos que compõem as relações sociais, ao invés de percebê-las como atividades paralelas diferenciadas e fora do contexto dessas relações, é possível identificar as relações de produção do conhecimento técnico-científico dentro da sociedade e suas influências e interferências mútuas, enquanto atividades sociais. (Ramos & Silva, 2007)

¹ NARASIMHAN, M. G. **Controversy in science**. *Journal of Biosciences*. 26(3): 299-304. 2001.

Um esforço de inserção destes estudos em salas de aula de ciências, mesmo considerando as limitações que o ensino formal possa impor a este tipo de prática, pode significar alguns avanços no enfoque Ciência-Tecnologia-Sociedade. Uma abordagem das controvérsias pode ajudar a problematizar idéias de neutralidade, objetividade e imutabilidade dos conhecimentos científicos, tão presentes nas concepções de estudantes acerca de conhecimentos técnicos e científicos (AULER, 2007). Em outras palavras, acredita-se que as controvérsias científicas possam desenvolver uma construção de sentidos mais ampla e próxima de uma realidade histórica sobre as práticas científico-tecnológicas, favorecendo uma visão dos conhecimentos científicos como não estáticos, passíveis de debate e mudança (Ramos e Silva, 2007).

Enfim, as controvérsias científicas permitem trabalhar interdisciplinarmente (JUAN, 2006) e estabelecer relações entre os discursos de diversas áreas de conhecimentos, tendo grande potencial para desenvolver o enfoque CTS na educação.

Como será visto adiante neste trabalho(apêndice), buscou-se neste trabalho, incluir as diversas controvérsias ao longo da história referentes à idade da Terra de forma a atingir os objetivos comentados anteriormente na introdução.

CAPÍTULO 2

TEMPO GEOLÓGICO: UM TEMA PARA ENSINAR GEOCIÊNCIAS

Abordagens específicas de disciplinas como Biologia, Química, Física, Geografia, História e Filosofia corroboram para fragmentação dos conhecimentos referentes às Geociências, nas quais diversos conceitos são dispersos por conteúdos desarticulados, faltando assim, uma ordenação capaz de explicar a Terra como um sistema integrado. Desta maneira, se torna inviável compreender a origem, a evolução, os fenômenos interiores e superficiais, as interações das esferas (oceanos, atmosfera, litosfera, biosfera), e as profundas e diversificadas relações entre meio físico e seres vivos existentes no planeta (TOLEDO, 2002).

Segundo Carneiro, 2004:

tal fragmentação é improdutiva e prejudica o alcance dos objetivos dos PCNEM, pois não dá lugar à idéia da Terra como um sistema complexo no tempo e no espaço, cujos processos, interdependentes e cíclicos, possuem história entrelaçada com a história da vida, modificando continuamente os ecossistemas.

Os resultados diretos dessa fragmentação são: que o educando perde a noção de interdependência entre os processos; não compreende o ciclo natural global; não desenvolve a noção do tempo geológico como fator inerente à sucessão dos processos naturais; é privado da oportunidade de utilizar o “laboratório Terra”, para compreender e contextualizar os processos físicos e químicos, assim como a origem e evolução da vida, delineada ao longo do tempo por meio da evolução dos ecossistemas (TOLEDO, 2002).

Logo, apesar das inúmeras referências a temas geológicos (conceitos, processos, materiais) em Biologia, Química e Física, os educandos geralmente não compreendem as duas últimas como Ciências da Natureza, pois não há referência geológica aos conceitos e fenômenos tratados. A Geografia, situada a meio caminho entre Ciências Humanas e Ciências

Naturais, inclui múltiplas referências às relações entre espaço físico e sociedade. Em História, finalmente, refere-se às diferentes noções de tempo, mas não inclui, como seria de se esperar, a noção de **tempo geológico**, indispensável para o entendimento da evolução da Natureza (CARNEIRO et al., 2004).

Segundo Fairchild (2009), o conceito de tempo geológico é uma das mais importantes contribuições da Geologia para o pensamento humano. Carneiro (2004) afirma que Diferentes motivos existem para que o educando se aproprie mais intensivamente do mais fundamental conceito geológico: o tempo. Além da aplicação prática do conhecimento sobre a dinâmica terrestre, a história da Terra e da vida é fundamental para se entender a natureza e sua história.

O ensino da Geocronologia e a transposição didática

A Geocronologia, sendo a ciência que estuda a determinação da idade dos minerais e consequentemente a idade terrestre (CARNEIRO et al., 2005), adquire um papel importantíssimo na concepção de tempo geológico pela sociedade atual.

Devido aos métodos radiométricos desenvolvidos ao longo do século XX para determinar a idade da Terra, o homem pôde enfim calcular o tempo geológico e situar a história da humanidade em uma nova escola temporal na história da Terra (FAIRCHILD, 2009).

O ensino da Geocronologia, no entanto, exige uma transposição didática de seus princípios científicos.

Segundo Chevallard (1991) *apud* Polidoro & Stigar (2010), a Transposição Didática é entendida como um processo no qual um conteúdo do saber que foi designado como saber a ensinar sofre um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo apto para ocupar um lugar entre os objetos de ensino.

Esse processo de transformação do conhecimento se dá porque os funcionamentos didáticos e científicos do conhecimento não são os mesmos. Eles se inter-relacionam, mas não se sobrepõem. Assim, para que um determinado conhecimento seja ensinado, em situação acadêmico-científica ou escolar, necessita passar por uma transformação didática, uma vez que não foi criado com o objetivo primeiro de ser ensinado. Essa transformação do objeto de conhecimento científico em objeto de conhecimento escolar – para ser ensinado pelos professores e aprendido pelos estudantes – significa selecionar e inter-relacionar o

conhecimento acadêmico, adequando-o às possibilidades cognitivas dos alunos e exemplificando de acordo com a sua realidade circundante (Polidoro & Stigar, 2010). Enfim, a teoria de Chevallard parte do pressuposto de que o ensino de um determinado elemento do saber só será possível se esse elemento sofrer certas transformações para que esteja apto a ser ensinado (MARANDINO, 2004).

Pode-se dizer que um dos maiores problemas enfrentados solitariamente pelo professor é exatamente o de redimensionar o objeto de conhecimento (o objeto de estudo, o objeto de ensino) ao “transpô-lo” de uma prática discursiva para outra, ou seja, tratar o conhecimento levando em consideração a mudança da situação discursiva. (Polidoro & Stigar, 2010)

Aliada a esta dificuldade intrínseca da transposição didática, existe ainda uma deficiente formação acadêmica dos professores nível fundamental e médio em geociências. Geralmente o primeiro e último contato com esse conteúdo se dá por uma única disciplina de graduação denominada “Introdução às Geociências”, “Geologia Geral” ou algo equivalente, cuja disciplina busca oferecer uma visão integrada das esferas terrestres e suas interações (Compiani & Cunha, 1992).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

EM RELAÇÃO À PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E ABORDAGEM PEDAGÓGICA

A realização deste trabalho se baseou em pesquisas bibliográficas que seguiram a seguinte sequência:

- i) leitura de conteúdos relacionados ao tema “Química e Idade da Terra” nos livros de química;
- ii) leitura de livros de geologia geral utilizados nos cursos de graduação de Geologia;
- iii) leitura de conteúdos específicos de geocronologia, utilizados geralmente em cursos de pós-graduação em cursos de geociências;

ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS

Para avaliação da necessidade e relevância da proposta, foi feita a análise de alguns livros didáticos de Química para o ensino médio aprovados no Programa Nacional do Livro do Ensino Médio – PNLDEM – de 2008 e no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) 2012.

Os livros analisados foram:

- 1- QUÍMICA E SOCIEDADE, Wildson Santos (coord.) e Gerson Mól (coord.), 1º Ed., São Paulo: Nova Geração, 2005.
- 2- QUÍMICA- VOLUME ÚNICO, Olímpio Nóbrega, Eduardo da Silva e Ruth da Silva, 1º Ed., São Paulo: Ática, 2007.
- 3- SER PROTAGONISTA QUÍMICA-vol.2, Julio Cezar Foschini Lisboa, 1ºed, São Paulo: SM, 2011.

ANÁLISE DE LIVROS DE GEOLOGIA E LIVROS DE GEOCRONOLOGIA

Nos livros de geologia geral, foram explorados os aspectos históricos e os métodos de datação relativa, que utiliza os princípios de deposição das camadas sedimentares e os princípios de datação de fósseis. Busca-se mostrar as bases do raciocínio geológico que culminou no desenvolvimento da noção tempo geológico e do surgimento da Geologia como Ciência.

Para uma maior precisão dos conceitos e fatos abordados no texto, pesquisamos livros de pós-graduação para subsidiar os capítulos a cerca dos métodos radiométricos. Buscamos resgatar o desenvolvimento histórico da Geocronologia no início do século XX e as primeiras datações da idade da Terra e como se chegou a idade de 4,5 bilhões de anos aceita atualmente. Tratamos também alguns aspectos modernos como o método de datação em zircão, que utiliza o decaimento U-Pb, e é um dos principais métodos aplicados nos laboratórios de geocronologia hoje em dia (CPRM, 2006).

Buscou-se desenvolver os diversos tópicos deste trabalho de forma a contemplar a abordagem CTS. A figura abaixo mostra de forma esquemática como os diferentes tópicos foram trabalhos de modo a atender esta abordagem.

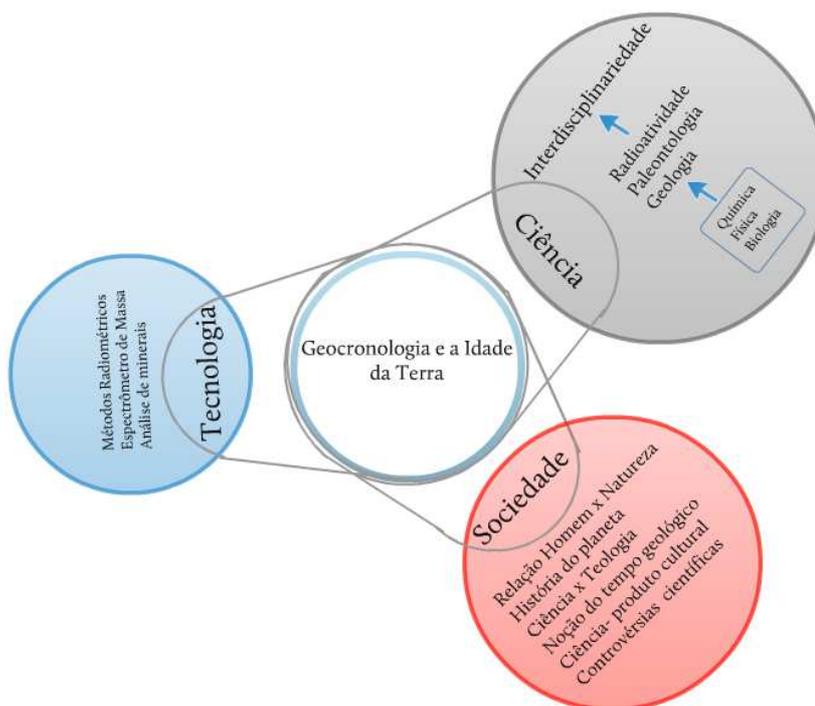


Figura 1: Esquema da estrutura geral do trabalho

SEQUENCIAMENTO DE IDÉIAS NO TEXTO

As concepções sobre a Idade da Terra foi tema de diversas controvérsias científicas e como abordado no capítulo 1, estas controvérsias quando colocadas no ensino escolar permitem ampla abordagem sobre questões históricas e sócio-culturais da ciência, ou seja, constituem temas propícios para a abordagem CTS.

Segundo Narasimhan (2001, p.299², apud Ramos & Silva), as controvérsias científicas por terem se constituído por certo período, estas são levantadas como um evento histórico e, por consequência, suas análises devem ser feitas historicamente.

Levando isso em consideração, buscou-se neste trabalho tratar o tema Geocronologia e idade da Terra num seqüenciamento histórico. Assim, são apresentadas desde as primeiras idéias vinculadas a religião que preponderavam na Idade média, passando pela Revolução Científica e pelo surgimento de novas Ciências como Geologia e da Paleontologia no século XVII que promoveram a mudança de concepção de tempo e distanciamento dos dogmas religiosos. Também enfatiza-se as diversas controvérsias que surgiram entre físicos, geólogos e biólogos no século XIX, notadamente entre Lord Kelvin e Charles Darwin a respeito da idade da Terra, e como Rutherford conseguiu encontrar, através da radioatividade, a solução deste enigma, ao realizar a primeira datação de um mineral, criando assim, uma nova Ciência, a Geocronologia. Ainda, tratamos dos pioneiros da Geocronologia na busca de rochas antigas remanescentes da Terra primordial e uma introdução teórica sobre o método radiométrico Pb-Pb, que possibilitou a determinação por Claire Patterson em 1956 de 4,5 bilhões de anos para a idade da Terra.

FORMALISMO MATEMÁTICO

A maior parte das equações matemáticas utilizadas estão ao nível escolar e já são trabalhadas em livros didáticos do ensino médio, como por exemplo, a equação exponencial de decaimento radioativo:

$$P = P_i \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{equação 1}$$

² NARASIMHAN, M. G. *Controversy in science*. *Journal of Biosciences*. 26(3): 299-304. 2001.

Cabe aqui apenas um ressalva no tópico que aborda o método Pb-Pb – “Pioneiros da Geocronologia”- cuja simplificação não foi possível, já que poderia ocasionar possíveis distorções de alguns conceitos. Mesmo assim, optou-se por inserir estas equações para que o professor ou estudante de graduação possa compreender de forma mais sólida como foi feita a datação da Terra que forneceu a idade aceita até os dias de hoje. Ressalta-se aqui entretanto, que o não uso destas equações não impede uma explicação conceitual de como a datação foi realizada, não prejudicando assim o entendimento global do texto.

RESULTADOS DA ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICOS

Na análise do primeiro livro citado acima, “Química e Sociedade”, encontrou-se o tópico “A idade da Terra”, no capítulo 26, relativo aos conteúdos de radioatividade. Neste tópico há uma referência aos aspectos históricos sobre a primeira datação de uma rocha realizada por Rutherford e uma rápida descrição sobre o decaimento do Urânio 238 em chumbo 206 e seu tempo de meia-vida de 4,5 bilhões de anos que permitiu o cálculo da idade da Terra através da razão entre átomos de Urânio-238 e Chumbo- 206. No anexo 1, encontra-se uma imagem do tópico abordado no livro.

O segundo livro, “Química-Volume único”, não aborda os conceitos de radioatividade e logo não foi encontrado nada referente ao tema.

No terceiro livro, “Ser Protagonista Química”, foi encontrado o tópico “Datação com Urânio e o Potássio”. Neste tópico, é abordado a importância do uso destes elementos para a datação de longos períodos de tempo, inclusive para estimar a idade da Terra. Além disso, possui uma tabela onde mostra a proporção entre átomos de chumbo-206 e U-238 e o número de meias-vidas para exemplificar como se pode quantificar o tempo de uma rocha (anexo 2).

Apesar de haver referências do uso do decaimento do Urânio para a datação da idade da Terra, de forma geral os livros enfatizam a datação do carbono-14 em fósseis como principal aplicação dos conhecimentos envolvendo o tempo de meia-vida. No entanto, nota-se que estas aplicações tecnológicas geralmente são citadas em forma de curiosidades ou para justificar o porquê de estudar tais conteúdos. Desta forma, ocorre uma lacuna no que diz respeito quais as implicações, sociais e filosóficas por exemplo, que o uso destas tecnologias de datação acarretaram. Na busca de uma abordagem CTS, discutir a idade da Terra e suas controvérsias

ao longo do tempo protagonizada por teólogos e cientistas de diversas áreas do conhecimento pode ser um tema de grande potencial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, os temas de Geociências ainda se encontram muitos distantes do cotidiano escolar e dos conteúdos programáticos. É fundamental a participação do professor de classe e a sua capacitação para os temas. A melhor maneira para que isso ocorra é a parceria entre pesquisadores e os professores no trabalho de transposição didática, tendo em vista os poucos livros e materiais disponíveis acerca das geociências para ensino médio.

Neste sentido, acreditamos que este trabalho possa ser um exemplo de como temas geocientíficos apresentam grande potencial para se trabalhar os conteúdos de Química de forma a contemplar a interdisciplinariedade e a contextualização preconizada pela LDB.

Além disso, espera-se que este trabalho possa promover o ensino do conceito de tempo geológico, destacando sua importância histórica no desenvolvimento das ciências da Terra, ao mesmo tempo que possibilite a articulação de diferentes disciplinas escolares como história, geografia, filosofia, física etc.

Especificamente no ensino de Química, este trabalho se apresenta como uma nova abordagem para o ensino da radioatividade e conceitos como meia-vida e datação. Uma abordagem que além de mostrar as aplicações tecnológicas, mostra também a evolução da ciência por meio de controvérsias científicas, destacando a ciência como produto cultural do homem e não como uma verdade absoluta de leis imutáveis.

Por último, esperamos que este trabalho possa atrair interesse de professores a divulgarem os temas de Geociências nas escolas, de forma a promover no educando uma visão ampla, integrada e consciente do planeta Terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AULER, D. **Enfoque ciência-tecnologia-sociedade: pressupostos para o contexto brasileiro.** Ciência & Ensino. Bauru/SP, Vol.1, número especial, novembro de 2007.

AULER, D.; BAZZO, W. A. **Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro.** Ciência & Educação. Bauru/SP V.7, n.1. 2001.

BRASIL.**Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**, Lei nº 9 394, de 20 de dezembro de 1996.

BRASIL. Ministério da Educação. Ministério da Educação (MEC), Secretária de Educação Fundamental (SEF). **Parâmetros Curriculares Nacionais: Introdução aos Parâmetros Curriculares Nacionais.** Brasília: 1997.

BRASIL. **Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**, Resolução CEB nº3 de 26 de junho de 1998.

BRASIL.Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec). **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.** Brasília: MEC/Semtec, 2000

BRASIL.**Plano Nacional de Educação (PNE).** Lei nº 10.172, de 9 de janeiro de 2001, Brasília, DF. Disponível em:

BRASIL.Ministério da Educação (MEC), Secretaria da Educação Média e Tecnologia (Semtec). **PCN+ Ensino Médio:** orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais- Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/Semtec, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica. ***Orientações curriculares para o ensino médio: Ciências da natureza, Matemática e suas tecnologias, volume 2.*** Brasília, MEC/SEB, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação (MEC), Secretária de Educação Básica (SEB), Fundo de Desenvolvimento da Educação (FNDE). **Catálogo do Programa Nacional do Livro para Ensino Médio (PNLEM) 2008: Química.** Brasília: MEC/SEB/Fundeb, 2008.

BRASIL. Ministério da Educação (MEC), Secretária de Educação Básica (SEB), Fundo de Desenvolvimento da Educação (FNDE). **Guia de Livros do Programa Nacional do Livro (PNLD) 2008: Química.** Brasília: MEC/SEB/FNDE 2008.

CARNEIRO, C.D.R.; MIZUSAKI, A.M.P; ALMEIDA, F.F.M. **A determinação da idade das rochas.** Terrae Didática, vol.1, nº 6, pág.35, 2005. Disponível em

CARNEIRO, C.D.R; TOLEDO, M.C.M; ALMEIDA, F.F.M de. **Dez motivos para inclusão de temas de Geologia na Educação Básica.** Revista Brasileira de Geociências, 2004, Campinas.

CHASSOT, A.I. **Raios X e radioatividade.** Química Nova na Escola, Qnesc, n. 2, p.19-22, 1995.

CHEVALLARD, Y. **La Transposition Didactique.** Grenoble: La Pensée sauvage, 1991.

COMPIANI, M & CUNHA, C.A.L.S. **O ensino de Geociências nos 3 graus de escolaridade - um panorama do Brasil.** In: Congresso Geologia de España, 3 y Congresso Latinoamericano de Geologia, 8. Salamanca, 1992, tomo I, p.324-352

CORREIA, P. R.M. *et. al.* **A Bioquímica como ferramenta interdisciplinar.** Química Nova na Escola. n.19, p. 19-23, maio 2004.

FAIRCHILD, T.R. *et al.* **Decifrando a Terra**. 2ªed. São Paulo: Companhia Nacional, 2009.

GERALDES, M.C. **Introdução à Geocronologia**. 1ªed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geociências, 2010.

JUAN, X. **Está cambiando el clima de la Tierra?**. Didáctica de las ciencias experimentales. Alambique, nº 49. 2006.

LIMA, R. da Silva; PIMENTEL, L.C.F; AFONSO, J.C. **O Despertar da Radioatividade ao Alvorecer do Século XX**. Química Nova na Escola, Qnesc, Vol. 33, Nº 2, MAIO 2011. 93. HISTÓRIA DA QUÍMICA

LISBOA, J.C.. **Ser protagonista Química-vol 2**., 1ªed, São Paulo: SM, 2011.

LÜCK, H. **Pedagogia interdisciplinar: fundamentos teórico-metodológicos**. 9. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

MACEDO, E.F. **Os temas transversais nos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Química Nova na Escola (QNESEC), nº8, 1998.

MARANDINO, M. **Transposição ou recontextualização?** Sobre a produção de saberes na educação em museus de ciências. Revista Brasileira de Educação, v. 26, 2004.

MARINHO, A.A. **Início de um camino a ser percorrido: em busca da interdisciplinariedade**. 2008. Monografia (especialização em Educação)- Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MEÇON, F.; QUADRAT, S.V. **A Radioatividade e a História do Tempo Presente**. Química Nova na Escola, Qnesc, nº19, maio, 2004.

NARASIMHAN, M. G. **Controversy in science**. *Journal of Biosciences*. 26(3): 299-304. 2001.

NÓBREGA, O.S.; SILVA, E.R. da; SILVA, R.H. da. **Química-volume único**, 1ªed. São Paulo: Ática, 2007.

POLIDORO, F.T de; STIGAR, R. **A transposição didática: a passagem do saber científico para o saber escolar.** Ciberteologia, Revista de Teologia e Cultura, nº27, Ano VI, ISSN: 1809-2888, 2010.

RAMOS, M.B; SILVA, H.C. **Para pensar as controvérsias científicas em aulas de ciências.** Ciência & Ensino. Bauru/SP, Vol.1, número especial, novembro de 2007.

SANTOS, W.L.P.; MÓL, G.S. (Coords.) et alii. **Química e Sociedade**, 1ªed. São Paulo: Nova Geração, 2005.

SANTOS, W.L.P. dos. **Contextualização no Ensino de Ciências por meio de temas CTS em uma perspectiva crítica.** Ciência & Ensino. Bauru/SP, Vol.1, número especial, novembro de 2007.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geocronologia aplicada ao mapeamento regional, com ênfase na na técnica U-Pb SHRIMP e ilustrada com estudos de casos brasileiros.** Publicações especiais do serviço geológico do Brasil, nº 1, setembro de 2006. Disponível em: < www.cprm.gov.br>. Acesso em: 06 de agosto de 2011.

TOLEDO, M.C.M. 2002. **Geologia/Geociências no Ensino. In: Seminário Nacional sobre Cursos de Geologia, 1,24 a 26 de abril de 2002.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas. (Apresentação oral).

VELHO, L.; VELHO, P. **The policy and politics of alternative food programs in Brazil.** *História de Ciência e Saúde-Manguinhos.*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, 2002.

APÊNDICE

QUÍMICA E A IDADE DA TERRA

A Química e a Idade da Terra

Resumo

Este artigo tem como objetivo resgatar o processo histórico que envolve a determinação da idade da Terra. São apresentadas desde as primeiras idéias vinculadas a religião que preponderavam na Idade média, passando pela Revolução Científica e pelo surgimento de novas Ciências como Geologia e da Paleontologia no século XVII que promoveram a mudança de concepção de tempo e distanciamento dos dogmas religiosos. Também enfatiza-se as diversas controvérsias que surgiram entre físicos, geólogos e biólogos no século XIX, notadamente entre Lord Kelvin e Charles Darwin a respeito da idade da Terra, e como Rutherford conseguiu encontrar, através da radioatividade, a solução deste enigma, ao realizar a primeira datação de um mineral, criando assim, uma nova Ciência, a Geocronologia. Ainda, tratamos dos pioneiros da Geocronologia na busca de rochas antigas remanescentes da Terra primordial e uma introdução teórica sobre o método radiométrico Pb-Pb, que possibilitou a determinação por Claire Patterson em 1956 de 4,5 bilhões de anos para a idade da Terra, a partir de amostras de meteoritos, valore este aceito até os dias de hoje. O método U-Pb também é retratado de forma breve para abordar a datação dos grãos de zircão de Jack Hills, Austrália, o material terrestre mais antigo já conhecido. Por último, é apresentada a escala do tempo geológico, bem como um convite à reflexão sobre a magnitude do tempo de nosso planeta.

QUAL A IDADE DA TERRA? COMO A CALCULAMOS?

Para estas perguntas o homem obteve diferentes respostas ao longo da história da humanidade. A Ciência e a Religião, na busca de tais respostas, suscitaram um dos maiores embates entre teólogos e cientistas (ALBARÈDE, 2011). Até no âmbito da ciência, a questão foi motivo de controvérsias entre físicos, biólogos, geólogos e outros cientistas do século XIX e no início do século XX.

Atualmente, aceita-se com naturalidade que a Terra tenha cerca de 4,5 bilhões de anos. No entanto, a idéia de que a Terra poderia ser extremamente antiga só emergiu por volta do século XVI com o advento do pensamento científico moderno (FAIRCHILD et al, 2009).

Antes disso, todas as estimativas da idade da terra eram feitas sob a influência da religião, cada uma com seu próprio cálculo próprio para data da Criação. Segundo o Judaísmo, a Terra teria sido concebida em 3761 a.C e de acordo com o calendário bizantino, adotado pela Igreja Ortodoxa russa, isto teria ocorrido a 5508 a.C. Ideias semelhantes perduraram durante toda Idade Média e Renascença na Europa, onde os teólogos afirmavam que a criação do mundo, em coerência com a Bíblia, se dera há cerca de 6.000 anos. Tal concepção transformou-se definitivamente em dogma em torno de 1650 quando o respeitado arcebispo protestante James Ussher, primaz da Irlanda, publicou um volumoso tratado sobre a cronologia bíblica, a partir das escrituras sagradas e outras fontes históricas. Segue abaixo o cômputo da Idade da Terra segundo a Bíblia: (FAIRCHILD et al., 2009)

Cômputo da Idade da Terra	
Da Criação até o Dilúvio	1.656 anos
Do Dilúvio até Abraão	292
Do Nascimento de Abraão até Êxodo do Egito	503
Do Êxodo até a Construção do Templo	481
Do Templo até o Cativoiro	414
Do Cativoiro até o Nascimento de Jesus Cristo	614
Do Nascimento de Jesus Cristo até hoje	1.560
Idade da Terra	5.520 anos

Figura 1. Fonte: Fairchild et al., 2009

Este o cômputo de 5.520 anos permaneceu em notas de rodapé nas bíblias publicadas pelas universidades inglesas renomadas de Oxford e Cambridge, até o início do século XX, tão prestigioso e influente era Ussher para igreja nesse período (PRESS et al., 2006).

O distanciamento destes dogmas religiosos começaria apenas com a Revolução Científica iniciada no século XVI. As grandes descobertas realizadas por Copérnico, Galileu, Kepler e outros pensadores, como Descartes, Newton e Francis Bacon, que mudaram nossa visão sobre o universo e daí novas teorias surgiam. Desta forma, o Sistema Solar, a Terra e a vida, que antes se acreditavam ser criações que Deus realizou durante seis dias, passavam a ser visto agora pela ciência como processos naturais complexos e de longa duração (ANTUNES, 1991).

FÓSSEIS E DATAÇÃO DO TEMPO RELATIVO

Neste cenário, o conhecimento em relação à análise de rochas e estratos, fósseis e estruturas geológicas evoluiu e permitiu desvendavar, pouco a pouco, o passado da Terra e a dimensão do tempo geológico.

Nicolau Steno, durante o século XVII, observou que os estratos sedimentares formam-se horizontalmente, isto é dizer que sedimentos depositam-se horizontalmente à medida que vão chegando à bacia de sedimentação, ficando as mais antigas na base, enquanto as mais

novas, sucessivamente acima (PRESS et al., 2006). William Smith (1769-1839) participava da construção de canais na Grã Bretanha para escoar carvão e essa atividade exigia uma observação cuidadosa do caráter e da ordem das camadas de rochas. Dessa forma, constatou que grupos de fósseis encontrados nos estratos seguiam uma ordem determinada e invariável, de modo que, se esta ordem é conhecida, torna-se possível determinar a idade relativa entre camadas a partir de seu conteúdo fossilífero. Logo, rochas com os mesmos fósseis apresentavam a mesma idade, mesmo quando situadas em áreas geográficas distintas. Esta constatação, conhecida como princípio da sucessão fóssil, passou então a ser utilizado como um instrumento prático para determinação relativa do tempo dos processos geológicos (Mosley & Lynch, 2011). Posteriormente, este princípio foi explicado pela Teoria da Evolução de Darwin: uma vez que existe uma evolução biológica irreversível através dos tempos geológicos, os fósseis devem-se ordenar no tempo segundo uma escala evolucionária.

SURGIMENTO DA NOÇÃO DO TEMPO GEOLÓGICO

Avanços nos estudos de fósseis entre fins do século XVIII e início do século XIX levaram vários cientistas a concluir que a idade da Terra deveria ser de uma ordem muito maior do que a de milhares de anos (PRESS et al., 2006). O grande precursor desta nova concepção do tempo geológico foi James Hutton. Filho de comerciante, Hutton abandonou os estudos de direito e seguiu seu interesse em química. Tornou-se rico com a invenção de um processo industrial para produzir cloreto de amônio a partir da fuligem, além haver herdado uma fazenda que estimulou seu interesse pela Geologia. A abastança permitiu-lhe fazer muitas viagens, observando as paisagens e elaborando teorias sobre as mudanças graduais (Mosley & Lynch, 2011). Hutton teorizou que todo registro geológico podia ser

explicado pelo princípio de causas naturais, ou seja, pela ação de fenômenos modernos, tais como vulcanismo, erosão, intemperismo, sedimentação etc., atuando de forma cíclica por um período inimaginavelmente longo:

“Para onde quer que olhasse, encontrava sinais de que as forças naturais hoje atuantes no planeta agem muito devagar, e que essas mesmas forças sempre estiveram em ação.”

(James Hutton. em Mosley & Lynch, 2011, pg.121).

As idéias de Hutton ficariam famosas mais tarde com sua célebre frase: “... um mundo sem vestígios de um início nem perspectiva de um fim.” (GERALDES, 2010).



James Hutton.Figura 2. Fonte:

<http://earthlearningidea.blogspot.com/2010/11/meet-mr-rock-cycle.html>.

Em 1830, Charles Lyell, desenvolvendo de forma mais ampla as ideias de Hutton, publicou o livro *Principles of Geology*. Neste livro, Lyell afirmou que o princípio de causas naturais de Hutton devia ser chamar Uniformitarismo, ou seja, os processos geológicos do passado teriam sido iguais aos atuais, até em gênero e intensidade, ou seja, “uniformes” durante toda a história da Terra. A geologia assim começava emergir como uma ciência sólida baseada em evidências cuja interpretação apoiava o Uniformitarismo, cujo lema se tornou “o presente é a chave do passado”.

O trabalho de Lyell influenciou gerações e gerações de cientistas, entre os quais Charles Darwin, que em seu livro *A origem das Espécies*, a partir do princípio da sucessão fóssil e

do registro estratigráfico, propôs que idade da Terra seria da ordem de bilhões de anos. A apresentação pública destes valores foi como que o ponto de partida à corrida do cálculo da idade da Terra (MEDINA et al., 2009).

Atualmente, sabe-se que a Teoria do Uniformitarismo é falha, pois apesar do tempo geológico ser realmente longo, não é infinito ou cíclico, e a história do planeta foi marcada por diversos eventos catastróficos. Hoje, aplica-se o Atualismo, que alega a constância através do tempo das leis naturais como a lei da gravidade, as leis da termodinâmica, etc. (CARNEIRO et al., 2005).

CONTROVÉRSIAS ENTRE FÍSICOS E GEÓLOGOS

Em resposta a Darwin, o físico William Thomson (mais conhecido como Lord Kelvin), um grande questionador do Uniformitarismo de Lyell, também calculou a idade da Terra. Lord Kelvin criticava o Uniformitarismo de Lyell, pois segundo ele a idéia de ciclos geológicos eternos violava as leis da Termodinâmica. Para Kelvin, a energia da Terra não era inesgotável e provinha da energia termal da origem do planeta. Utilizando a teoria de condução de calor de Fourier, Kelvin presumiu que a Terra tinha seu interior quente e perdia calor para o espaço continuamente. Portanto, sabendo a taxa de dissipação de calor pelo tempo, poderia calcular a idade da Terra. Assim encontrou para a idade da Terra, valores entre 20 e 40 milhões de anos (BRUSH, 1996; GERALDES, 2010). Kelvin, porém, admitia que pudesse estar faltando algum fator desconhecido em seus cálculos.

Outros físicos, utilizando outros métodos, calcularam diferentes idades para a Terra, com valores sempre muito menores do que o de Darwin. Destaca-se aqui, o método utilizado pelo irlandês Joly que calculou a idade da Terra por meio do cálculo da idade do oceano, que atribuiu ser a mesma da Terra. Segundo Joly, se dividíssemos a massa de sódio no

oceano pela massa depositada anualmente pelos rios, poderia se calcular a idade do oceano. Ao fazer isso, encontrou o valor semelhante ao de Lorde Kelvin, 100 milhões de anos (ALLÈGRE, 2008). O físico alemão Hermann von Helmholtz e o canadense astrônomo Simon Newcomb obtiveram em seus cálculos, valores em torno de 20 milhões de anos a partir do diâmetro do sol.

Em meados do século XIX, com as diversas propostas para o tempo geológico, os conflitos intensificaram, desvelando uma separação nítida, com físicos de um lado e biólogos e geólogos de outro. Enquanto os primeiros defendiam uma idade jovem para a Terra, biólogos e geólogos defendiam uma terra com bilhões de anos.

O debate entre físicos, biólogos e geólogos só começaria a ter fim com a descoberta da radioatividade, em 1896 por Becquerel, que observou a emissão espontânea de raios invisíveis (no caso, raios-x) por sais de urânio. Os resultados animaram o casal Currie, que em seguida descobriu que determinados minerais emitiam espontaneamente quantidades constantes e extraordinárias de energia (MEDINA et al.; 2010).

A QUÍMICA COMEÇA A DESVENDAR A IDADE DA TERRA

Ernest Rutherford e seu colega Frederick Soddy, trabalhando com os fenômenos radioativos, constataram que estes processos envolviam a emissão de partículas ou radiações eletromagnéticas. Além disso, Rutherford percebeu que os átomos radioativos desintegravam em uma razão constante e que, portanto, poderiam ser utilizados como relógios naturais para calcular a idade absoluta de uma rocha ou mineral. (CARNEIRO et al., 2005). Seu trabalho marcava o início da era da Física Nuclear, mas, ironicamente, uma de suas mais importantes contribuições ocorreria em campo sobre o qual pouco conhecia: a Geologia (BRENMAN, 1998).

Em 1905, Rutherford revolucionaria a datação do tempo geológico, com a utilização da radioatividade para medir a idade exata de uma rocha. Rutherford datou uma amostra de fergusonita, considerando o decaimento do rádio com liberação de hélio, em 500 milhões de anos (BRUSH, 1996). A partir de suas descobertas sobre o decaimento radioativo, Rutherford encontrou sua própria resposta para o enigma da idade da Terra e em uma reunião da Royal Society, onde se encontrava ninguém menos que Lord Kelvin, falou sobre o tema. Rutherford afirmava que a Terra permanecia tépida por ser aquecida por átomos de elementos radioativos presentes nas rochas e em seu núcleo liquefeito e que a taxa de decaimento desses elementos comprovava a antiguidade da Terra e fornecia um meio para a datação do tempo geológico (BRENMAN, 1998). Em uma de suas cartas, Rutherford mais tarde descreveria a apreensão que sofrera naqueles momentos

“Adentrei a sala, que estava na penumbra, e passado pouco tempo avistei Lord Kelvin na audiência e percebi que estaria em apuros na última parte da minha palestra, referente à idade da Terra, pois meus pontos de vista conflitavam com os dele. Para meu alívio, Kelvin rapidamente pegou no sono, mas quando eu cheguei no ponto em questão, pude ver o velho pássaro se ajeitar na cadeira, abrir um olho e engatilhar um olhar sinistro em minha direção! Então me veio uma súbita inspiração e eu disse: "Lord Kelvin havia limitado a idade da Terra, uma vez que nenhuma nova fonte fora descoberta. Essa declaração profética diz respeito ao que levamos em consideração hoje, o rádio!" Eis que o velho então sorriu-me.” (EVE, 1939)

A datação radiométrica proposta por Rutherford permitiu tratar numericamente o tempo. É difícil avaliar seu impacto nos conceitos geológicos devido à quantificação; não somente se aprimorou o conceito sobre a idade da Terra, mas também foi possível datar amostras de rochas da Lua e fragmentos de meteoritos (como será visto adiante), mostraram-se com

idades similares. A datação isotópica também abriu possibilidades para se determinar com rigor quantitativo as taxas de processos atuantes no passado geológico (CARNEIRO et al., 2005). Assim, Rutherford fundava uma nova ciência, a Geocronologia (GERALDES, 2010), cujo desenvolvimento transformaria não somente o campo da Geologia, mas da Paleontologia, a da Antropologia, a Arqueologia e todas as outras disciplinas envolvidas na determinação de datas de origem, seja de uma rocha, espécime ou fóssil (BRENNAN, 1997).

ESPECTRÔMETRO DE MASSA

Assim como não haveria a cristalografia sem os raios-X e nem a astronomia sem os telescópios, não haveria datação radiométrica sem o espectrômetro de massa. Foi Aston quem desenvolveu o precursor do espectrômetro de massa, o espectrógrafo de massa. Com este instrumento, Aston consolidou o conceito de isótopos e determinou a abundância isotópica de diversos elementos. Com a evolução tecnológica e contribuição de diversos cientistas, o espectrógrafo se tornaria o espectrômetro de massa atual, um dos equipamentos analíticos mais robustos da ciência moderna. (GERALDES, 2010; MEDEIROS, 1999). Aston ganhou em 1922 o prêmio Nobel pelo desenvolvimento deste instrumento que possibilitou a descoberta dos isótopos e o cálculo de suas abundâncias (ALLÈGRE, 2008).

O objetivo do espectrômetro de massa é separar em uma amostra suas partes constituintes, tais como íons ou moléculas com base em sua massa. A proporção relativa das espécies isotópicas, moléculas ou íons são investigadas através de um espectro de massa ou numericamente pela razão de diferentes massas.

Todo espectrômetro de massa possui três componentes essenciais: a fonte, o magneto e os coletores ou detectores.

A fonte possui três funções: gerar íons dos átomos, acelerar estes íons por diferença de potencial e direcionar o feixe de íons de forma adequada para o magneto. O magneto tem duas funções: desviar os íons os separando por massa. Os coletores, geralmente copos de Faraday (ou gaiolas de Faraday), que convertem as cargas dos íons gerando corrente elétrica que passa por um amplificador, o que resulta em pulsos elétricos que são registrados ou enviados à um computador que, através de um software, traduz os pulsos em dados.

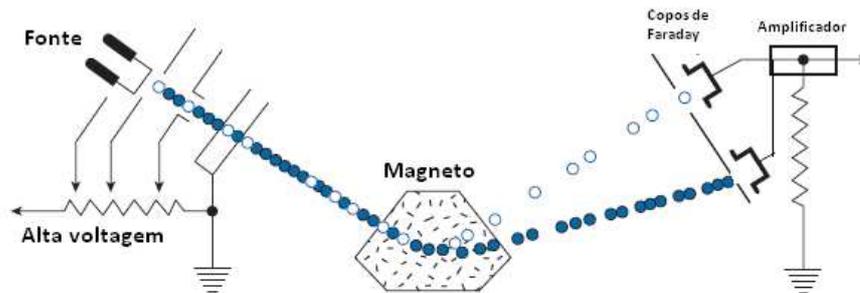


Figura 3. fonte: adaptado de allègre,2008.

O princípio da medição de composição isotópica se baseia na razão entre dois sinais simultâneos de dois isótopos. Como veremos adiante, os resultados referente a composição

isotópica de chumbo, por exemplo, são expressos como: $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$, $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$, $\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}$ e $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$.

ÁTOMOS RADIOATIVOS: RELÓGIOS NATURAIS - Princípios da Geocronologia

Os átomos radioativos desintegram-se ou decaem em taxas de desintegração precisas ao longo do tempo e estas taxas são comumente estabelecidas em termos de **meia-vida** de um elemento. Assim, após o período de meia-vida, metade do número inicial de átomos desintegra-se. No final do segundo período de meia-vida, a metade daquela metade, ou

quarto do número original, ainda resta. No final da terceira meia-vida, um oitavo ainda resta e assim sucessivamente. Matematicamente, o decaimento radioativo é expressa por um equação exponencial:

$$P = P_i \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{equação 1}$$

Onde P é o número de átomos pai no tempo presente, P_i a quantidade inicial de átomos do átomo pai, t o tempo decorrido desde o fechamento do sistema isotópico (idade a ser determinada) e λ a constante de desintegração do átomo pai.

Para determinar a idade de um sistema a partir da eq.1, além do número atual de isótopos pai, também é necessário conhecer seu número inicial P_i . Se dispusermos dessa informação, teremos um cronômetro baseado no decaimento de um nuclídeo radioativo, que permite calcular a idade por meio de:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{P_i}{P} \quad \text{eq. 2}$$

A datação pelo método do ^{14}C é um bom exemplo:

$$t = \frac{1}{\lambda^{14\text{C}}} \ln \frac{^{14}\text{C}_i}{^{14}\text{C}} \quad \text{eq. 3}$$

Mas se não tivermos esses dados, será necessária outra solução. Para cada átomo pai, um átomo filho (ou nuclídeo radiogênico) é formado, em geral um único elemento, cuja quantidade é indicada por D (o isótopo filho ou isótopo radiogênico é indicado pela letra D, do inglês *daughter isotope*). Assim, o número de átomos radiogênicos produzidos do decaimento do átomo pai desde a data de formação do mineral pode ser dado por:

$$D^* = P_i - P \quad (\text{eq 4})$$

Onde D^* é o número de átomos radiogênicos, P_i é o número inicial de átomos do átomo pai, e P o número de átomos do átomo pai no momento atual. Portanto, o número total de átomos do elemento **D** (átomo filho) em um mineral pode ser expresso como a soma dos átomos

radiogênicos D^* mais aqueles preexistentes antes no mineral, ou seja, não oriundos do decaimento do nuclídeo pai:

$$D = D_i + D^* \quad (\text{eq 5})$$

Substituindo a equação 4 na equação 5, obtemos:

$$D = D_i + P_i - P \quad (\text{eq 6})$$

E por fim, substituindo P_i pela equação 1 na equação 4, obtém-se:

$$D = D_i + P \cdot e^{\lambda t} - P \quad \text{eq.7}$$

Simplificando, a equação final fica como abaixo:

$$D = D_i + P (e^{\lambda t} - 1) \quad \text{eq.8}$$

Esta é a equação fundamental da geocronologia

Como normalmente estes valores são expressos pelo espectrômetro de massa em razões isotópicas, como visto na seção ‘espectrômetro de massa’, tem-se:

$$\frac{D}{D'} = \frac{D}{D'} i + \frac{P}{D'} (e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{eq. 9})$$

Onde D' se refere à um isótopo estável do mesmo elemento que o nuclídeo radiogênico que não é produzido por decaimento radioativo. Portanto, ao longo do tempo não há alteração da sua quantidade inicial $D'_i = D'$.

O termo $P(e^{\lambda t} - 1)$ é uma medida de acumulação de isótopos radiogênicos durante o tempo t . Mesmo que os valores D e P sejam determinados, para que essa equação permita a obtenção de idades, é necessário que se saiba o número de isótopos filhos D_i no tempo $t=0$. Como veremos adiante, determinar o número de isótopos filhos D_i no tempo inicial da formação de uma rocha (chamada aqui, de composição primordial) se constitui em um dos grandes desafios dos métodos radiométricos (Albarède, 2011). Um caso simples ocorre quando o número inicial de átomos filhos é tão pequeno que pode ser desprezado. Essa

aproximação é válida para o método urânio-chumbo em zircão, por exemplo, que será discutido mais detalhadamente adiante.

O DESAFIO DE DETERMINAR A IDADE DA TERRA

Existem dois problemas principais em se determinar a idade da Terra. O primeiro deles é a necessidade de possuir um método capaz de avaliar uma dimensão de tempo tão vasta quanto a do tempo geológico. Esse problema foi resolvido com o advento dos métodos de datação radiométrica utilizando elementos com meia-vida longa, no caso o Urânio. O segundo problema, de mais difícil solução, é a escolha do material a ser utilizado para a datação. Depois de sua formação a Terra sofreu intensa diferenciação, com alteração das concentrações e composições isotópicas das rochas originais. Isso fez com que vários cientistas propusessem diferentes formas para resolver o problema. Veremos nas próximas seções como cientistas desenvolveram métodos para contornar estes problemas: o método Pb-Pb e o método U-Pb. O primeiro possui grande importância histórica, já que foi o método utilizado por Patterson em amostras de meteorito para chegar à idade da Terra conhecida atualmente e o segundo método é aqui tratado por ser o mais utilizado nos dias de hoje e ter fornecido idades mais antigas para amostras terrestres.

PIONEIROS DA GEOCRONOLOGIA

Na década de 30, já era compreendido que dois isótopos de chumbo – ^{206}Pb e ^{207}Pb – eram os produtos estáveis do decaimento do ^{238}U e ^{235}U respectivamente. Outro isótopo, ^{208}Pb , era gerado por um átomo de Tório e o quarto isótopo, ^{204}Pb , não era gerado por nenhum processo radioativo (BRUSH, 1996).

Em 1938, Alfred Nier (GERALDES, 2010), utilizando o espectrógrafo de massa de Aston, mediu a composição isotópica de chumbo em amostras de galena (PbS). Assim, observou que os isótopos de chumbo não ocorriam com a mesma proporção nas amostras. Nier propôs que cada amostra era uma mistura do chumbo primordial (ou comum) com o chumbo radiogênico. Com base na Equação Fundamental da Geocronologia (eq.9) para o isótopo ^{206}Pb e ^{207}Pb , respectivamente:

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} i + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda^{238}t} - 1) \quad \text{eq. 10}$$

$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} i + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda^{235}t} - 1) \quad \text{eq. 11}$$

Nier raciocinou que poderia calcular a idade da Terra, “ t ”, utilizando qualquer uma destas equações. No entanto, seria necessário além de conhecer as razões isotópicas atuais, conhecer também a razão isotópica primordial. Ou seja, para resolver a equação 10, por exemplo, seria necessário medir as razões atuais, $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ e $\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}$, e saber a composição isotópica primordial $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} i$ (DICKIN, 2005).

Em 1946, Arthur Holmes e Friedrich Hutermans trabalhando independentemente nos dados de galenas de Nier, elaboraram um modelo conhecido como Modelo de Estágio Único para descrever a evolução isotópica de chumbo em uma dada amostra. De acordo com este modelo, o Pb radiogênico, em uma dada amostra, seria introduzido pelo decaimento do U no magma e o Pb resultante (Pb inicial + Pb radiogênico) seria então separado dos seus precursores radioativos no momento da formação do mineral. Assim, minerais como, galenas, não tem alterações em sua composição isotópica de Pb porque

este mineral não contém U e sua composição reflete a composição do magma de origem. (GERALDES, 2010). A figura 4 abaixo traz um esquema simplificando estas idéias:

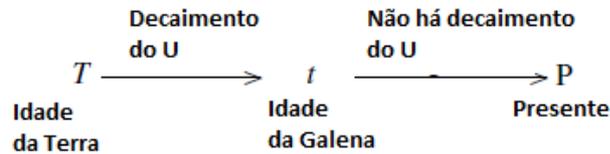


Figura 4. Adaptado de DIKIN, 2005.

Neste raciocínio, uma rocha formada no início da história da Terra, por exemplo, teria poucos átomos de chumbo radiogênicos produzidos pelo decaimento do urânio, enquanto uma rocha nova teria uma quantidade maior. Isso quer dizer que a razão Pb^{206} / Pb^{204} de uma rocha antiga deve ser menor do que uma amostra mais jovem.

Com base nisso, Gerling propôs uma simplificação para o problema. Ele considerou que poderia fazer uma aproximação da composição primordial utilizando rochas com baixo teor de isótopos radiogênicos (^{206}Pb e ^{207}Pb). Neste caso, a rocha seria uma representação próxima do chumbo primordial. A amostra escolhida foi uma galena (PbS) de Ivigtut, Groelândia. Assim, Gerling encontrou para a Terra a idade de 3,1 bilhões de anos (ALLÈGRE, 2008).

MÉTODO Pb-Pb

Holmes e Hutermans propuseram então um método diferente (GERALDES, 2010) para obter a idade da Terra. Dividindo as equações 11 e 10 uma pela outra, obtiveram a seguinte equação:

$$\frac{\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right) - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i}{\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right) - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i} = \frac{1}{137.88} \frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}$$

eq.12

Analisando a equação 12 acima, percebe-se que o lado direito da equação é uma constante, e portanto, têm-se uma equação do tipo:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{Y}{X} = a$$

cuja representação em um gráfico da razão $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ em função da razão $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ é uma reta. Hutermans chamou esta reta de “isócrona”, cuja inclinação daria a idade das amostras, e o intercepto da reta forneceria a composição primordial. O lado direito da equação é o coeficiente angular da reta. Assim, considerando duas ou mais amostras que tenham a mesma idade e que tenham a mesma origem, o coeficiente angular obtido pelo gráfico $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ das amostras em questão pode ser utilizada para o cálculo do tempo (t) (DICKIN, 2005). O uso da eq.12 para a datação de rochas é chamado de **método Pb-Pb**.

O valor 1/137.88 é referente à razão isotópica de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ que é constante na Terra, já que os isótopos de Urânio possuem propriedades físico-químicas tão semelhantes e portanto, não sofrem fracionamento (ALLÈGRE, 2008; WHITE, 2009; GERALDES, 2010).

A má notícia é que esta equação não pode ser resolvida algebricamente de forma direta (trata-se de uma equação transcendental). Para obter t é necessário o uso de um computador para sugerir diversos valores de t e calcular o valor que torna a equação verdadeira (WHITE, 2009).

Holmes e Hutermans trabalhando independentemente no método Pb-Pb em suas amostras, atribuíram para a Terra idades semelhantes, próximas de 3,5 bilhões de anos em 1947 (BRUSH, 1996). Os trabalhos destes primeiros geocronólogos demonstraram que os cálculos de Kelvin continham dois erros: desconsideravam o aquecimento interno resultante do decaimento radioativo e a convecção do manto.

CLAIRE PATTERSON E A DETERMINAÇÃO DA IDADE DA TERRA

Em 1953, um grupo de cientistas da Universidade de Chicago e da Califórnia, reportaram razão isotópicas $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de meteoritos muito menores do que nas amostras utilizadas anteriormente para determinação da idade da Terra (BRUSH, 1996) e a quantidade de urânio era tão ínfima que apontava que estes meteoritos praticamente não tiveram suas composições primordiais de chumbo alteradas por isótopos radiogênicos (ALBARÈDE, 2011). Assim, em 1956, Patterson partiu da premissa de que a idade da Terra deveria ser igual a dos meteoritos, uma vez que nosso planeta e esses corpos errantes do espaço originaram-se na mesma época, junto com toda a matéria do sistema solar (FAIRCHILD et al., 2009).

Patterson datou 5 meteoritos e algumas amostras terrestres obtendo uma isócrona com idade de $4,55 \pm 0,07$ bilhões de anos, que ele deduziu ser a idade da Terra também. Segue abaixo, a isócrona obtida por Patterson.(Patterson, 1956):

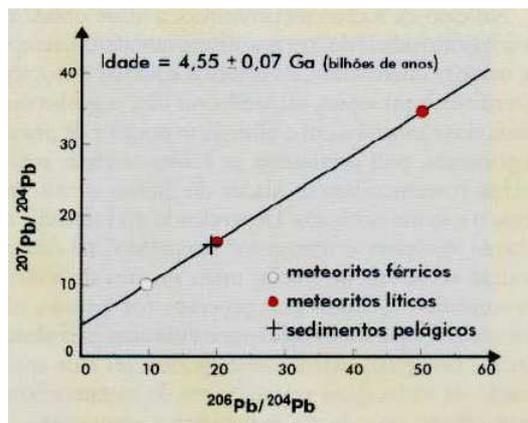


Figura 5. Fonte: Fairchild, 2009

Os meteoritos utilizados por Patterson posteriormente também foram datados por outros métodos radiométricos que se desenvolveram (^{40}Ar - ^{39}Ar e Sm-Nd, Re-Os) e obtiveram a mesma idade, confirmando os resultados obtidos por ele (ALBARÈDE, 2011).



Figura 6.

Fonte: (a) e (b) TROUILLET, 2010; (c) CASANOVA, 1998.

Fragmentos do meteorito do Canyon Diablo, Arizona, e Claire Patterson à direita.

Ao estabelecer a idade da Terra, Patterson tornou possível vislumbrar a dimensão do tempo geológico e a grandeza da natureza, dando ao homem a percepção de sua pequenez. Abaixo, segue um recorte do artigo histórico de Claire Patterson em que foi publicada a Idade da Terra aceita atualmente:

Age of meteorites and the earth

CLAIRE PATTERSON
Division of Geological Sciences
California Institute of Technology, Pasadena, California

(Received 23 January 1956)

Abstract—Within experimental error, meteorites have one age as determined by three independent radiometric methods. The most accurate method (Pb^{207}/Pb^{206}) gives an age of $4.55 \pm 0.07 \times 10^9$ yr. Using certain assumptions which are apparently justified, one can define the isotopic evolution of lead for any meteoritic body. It is found that earth lead meets the requirements of this definition. It is therefore believed that the age for the earth is the same as for meteorites. This is the time since the earth attained its present mass.

Figura 7. Fonte: Patterson, 1956

ZIRCÕES SÃO PARA SEMPRE – O material terrestre mais antigo

Ao contrário do que se diz com frequência, a Terra nunca foi realmente datada, porque não há amostras de um material não modificado, herdado do período inicial de nosso planeta (ALBARÈDE, 2011).

Os materiais terrestres datados como mais antigos foram amostras de minerais de zircão ($ZrSiO_4$) situados em Jack Hills, Austrália. Suas idades de 4,1 e 4,4 bilhões foram determinadas na década de 80 pelo método U-Pb. Similar ao método Pb-Pb, este método se baseia nas equações 10 e 11 para os isótopos radiogênicos de Pb: ^{207}Pb e ^{206}Pb .

O método U-Pb geralmente utiliza o mineral zircão. Suas principais vantagens são que ele ocorre em diversos tipos rochas e possui alta resistência ao intemperismo, mantendo-se assim preservado. No meio geocronológico costuma se atribuir o mesmo dito popular imputado ao diamante: “Zircão é para sempre”.

Mais importante, o método de U-Pb se baseia no fato de a estrutura cristalina deste mineral não permitir a entrada de Pb comum, o que faz com que todo o Pb presente no zircão seja radiogênico, resultado do decaimento do U. Desta maneira, o problema de se determinar composição isotópica primordial não existe, pois a quantidade inicial de Pb comum é nula (GERALDES, 2010). Logo, para encontrar o valor de “t” basta medir as

composições isotópicas atuais, ou seja, medir a razão Pb/U. Assim, as equações 10 e 11, podem ser rescritas como:

$$t = \frac{1}{\lambda^{238}} \ln \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}} \right) \quad eq. 12$$

$$t = \frac{1}{\lambda^{235}} \ln \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}} \right) \quad eq. 13$$

Estas duas equações constituem dois cronômetros independentes. Quando as idades fornecidas por estas equações coincidem, são chamadas de idades concordantes. Lançados em um gráfico de ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ vs. ${}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$, os pontos representando as idades concordantes definem a curva da **concórdia** (GERALDES, 2010).

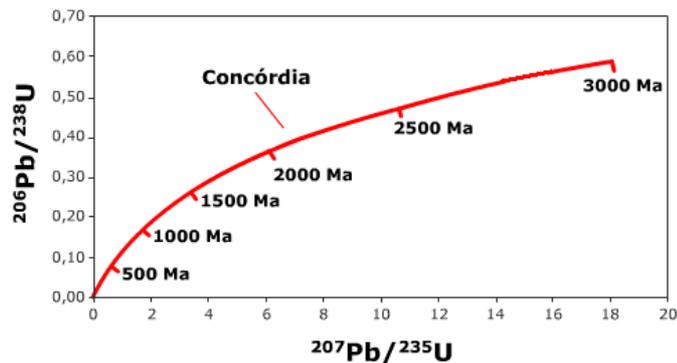


Figura 8. Fonte: http://www.ig.uit.no/webgeology/webgeology_files/portuguese/upb_pt.html
 Assim, ao realizar a análise isotópica de um zircão, verifica-se sua idade localizando a idade concordante na curva da concórdia a partir das razões isotópicas Pb/U. Quando se tem um conjunto de análises de zircões e estes têm idades discordantes, ou seja, não caem na curva da concórdia, plota-se uma reta conhecida como **Discórdia**. Neste caso, a reta da discórdia é construída conectando-se o intercepto superior na concórdia, representado pela idade de cristalização ou formação do mineral (GERALDES, 2010; WHITE, 2009). Na figura 8 abaixo, encontra-se a curva da concórdia para grãos de zircão de Jack Hills,

Austrália. A intersecção da discórdia (linha tracejada) fornece a idade destes minerais, cuja idade mais antiga chega a $4,404 \pm 0,008$ bilhões de anos (Ga).

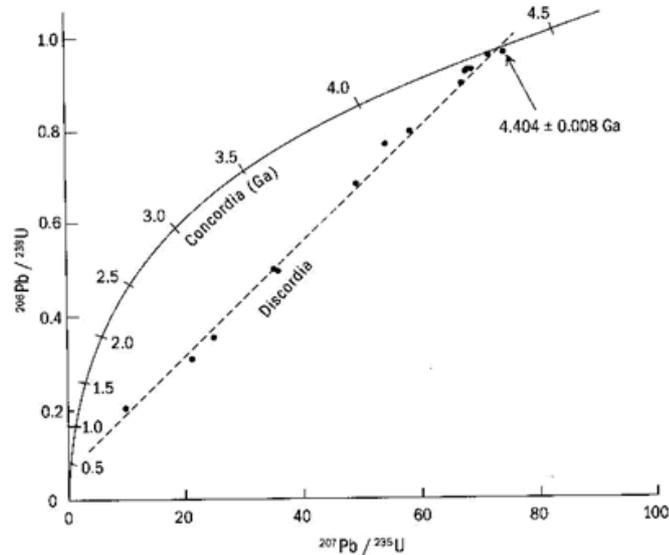


Figura 9. Fonte: Wilde et al., 2001

A ESCALA DO TEMPO GEOLÓGICO: Contando a História da Terra

Como visto anteriormente, nos séculos XVI e XVII os estudiosos utilizaram os princípios de datação relativa para compreender os diversos processos naturais. As informações acumuladas de diversas áreas do mundo foram no século XIX e XX utilizadas para o ajuste da **Escala do Tempo Geológico**, um calendário de idades relativas da história geológica da Terra.

No entanto, a calibração da idade de suas subdivisões, em termos de milhões de anos (Ma), só foi possível a partir século XX com o desenvolvimento dos métodos radiométricos (PRESS et al., 2006). Cada intervalo de tempo nessa escala está correlacionado a um pacote de rochas e respectivos fósseis. Embora, a escala do tempo geológico ainda esteja sendo refinadas, suas principais divisões tem permanecido constantes durante o tempo o último século (PRESS et al. 2006). Para desenhar o Tempo Geológico, cientistas optaram

por representar eventos bem caracterizados da História da Terra. Esses eventos estão organizadas em graus hierárquicos cada vez menores da seguinte forma, em ordem de diminuição: éons, eras, períodos e épocas. Um éon é a maior divisão da história e significa um intervalo de tempo muito grande, indeterminado (RAFFERTY, 2011)

A história da terra está dividida em quatro éons: Hadeano, Arqueano (“antigo” em grego), Proterozóico (“vida precoce”) e Fanerozóico (“vida saudável”). Os éons possuem subdivisões, as eras. Uma **era** geológica é caracterizada pelo modo como os continentes e os oceanos se distribuíam e como os seres vivos nela se encontravam. O período, é uma subdivisão da era, e é a unidade fundamental na escala do tempo geológico. A época é um intervalo menor dentro de um período, e portanto, a menor divisão do tempo geológico. Ela tem duração máxima de 6 milhões de anos, podendo ter menos de 1 milhão. (FARCHILD et al., 2009)

A seguir, apresentamos, a escala geológica do tempo e suas divisões, assim como uma fita do tempo da Terra para uma visualização mais fácil da proporção dos tempos de cada éon.

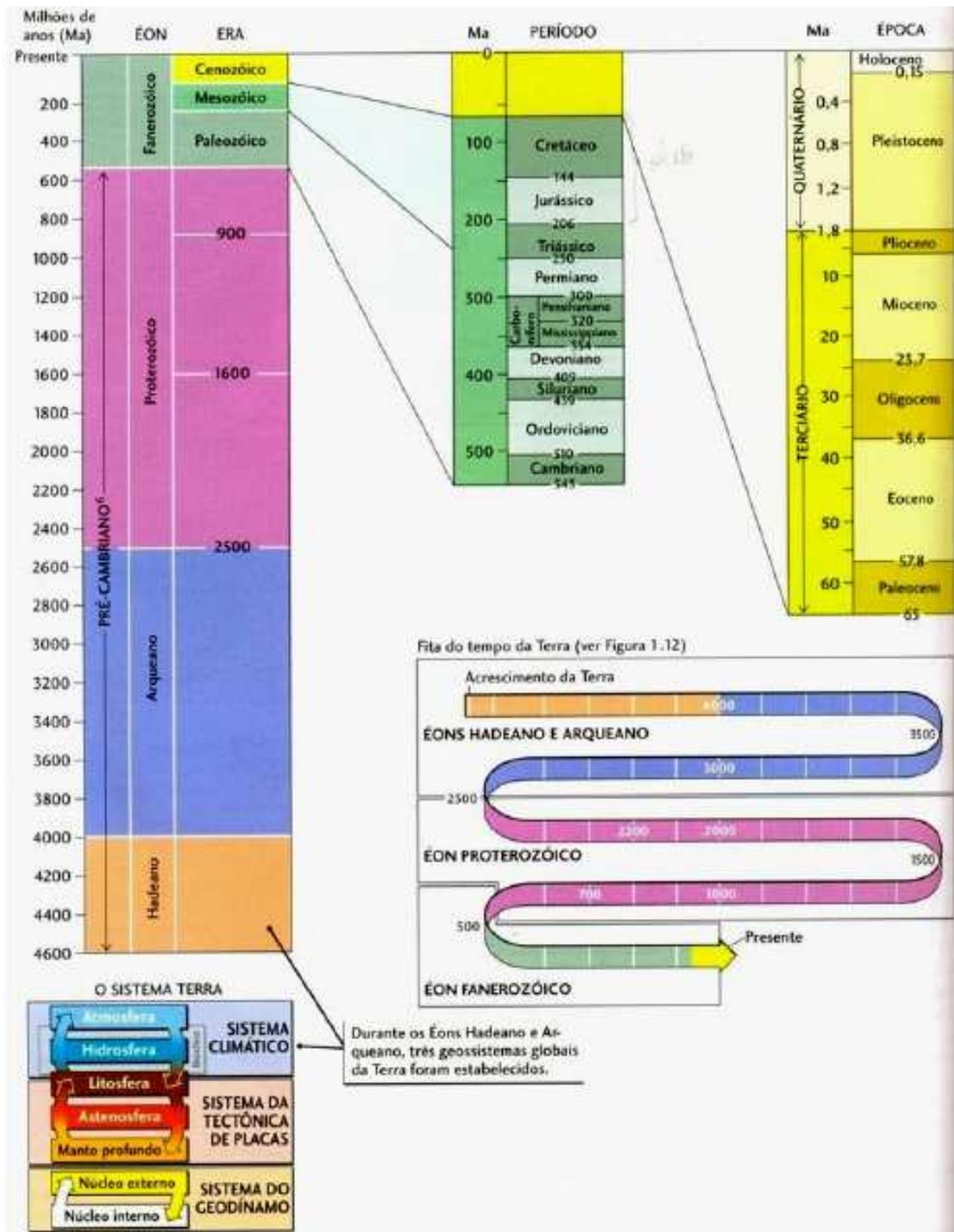


Figura 10. Fonte: PRESS et al., 2006.

Os três primeiros éons que antecedem o éon Fanerozoico é comumente chamada de período Pré-Cambriano. O Pré-Cambriano está compreendido entre o aparecimento da Terra, há cerca de 4,5 bilhões de anos, até o surgimento de uma larga quantidade de fósseis, que marca o

início do período Cambriano da era Paleozóica do éon Fanerozóico, há cerca de 540 milhões de anos. O período pré-cambriano, apesar de representar quase 90% da idade terrestre, é pouco conhecido devido ao fato de se conhecerem poucos fósseis deste período, dificultando a interpretação. No éon fanerozóico houve uma “explosão de vida” e os fósseis se tornaram abundantes. Por outro lado, a partir do período Cambriano, diminuiu-se a intensidade das transformações geológicas, ocasionando uma maior preservação dos estratos e permitindo aos cientistas compreenderem melhor a história da Terra. O desenvolvimento dos métodos radiométricos assume, neste sentido grande importância, já que permitiu aos cientistas estudar melhor o período pré-Cambriano (RAFFERTY, 2009)

Para facilitar a visualização da história da Terra, é apresentado aqui um relógio da História da Terra (figura 11), desde o seu início até hoje. Este relógio conta a história da Terra correspondente ao período de 1 dia, ou seja, de 24 horas. Analisando-o, é possível ter uma visualização fascinante de como é recente a nossa passagem por aqui. Os primeiros homínídeos apareceriam faltando apenas 20 segundos para completar o ciclo de 24 horas. Impossível representar graficamente em escala, esse tempo tão breve (MAZING, www.geoturismobrasil.com))

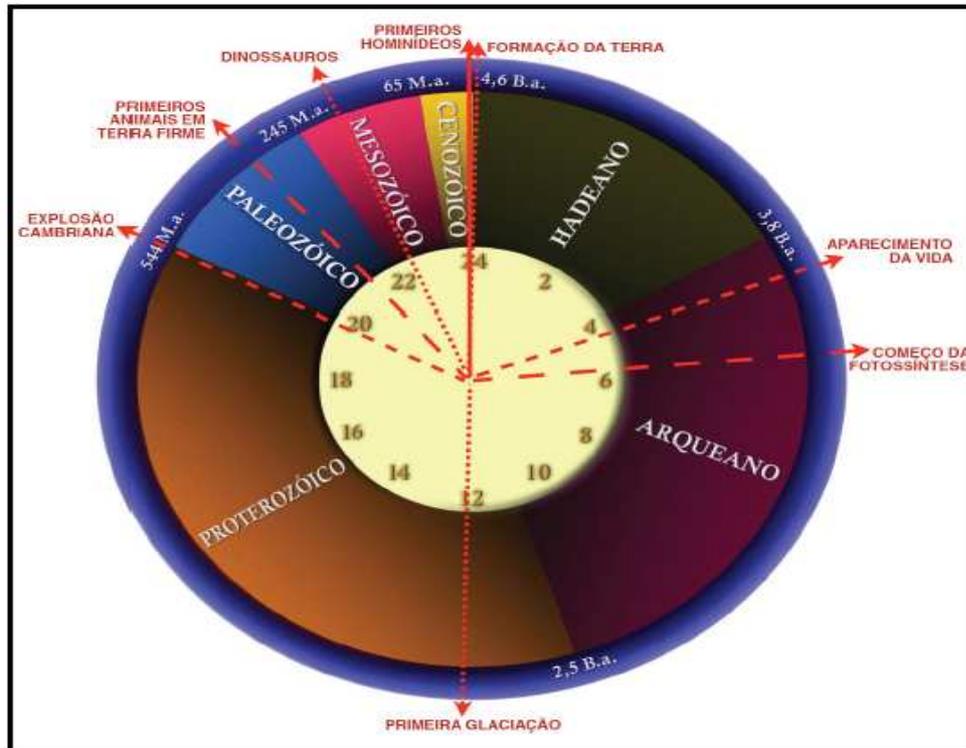


Figura 11. Fonte: Mazing, www.geoturismobrasil.com

Este 20 segundos correspondente ao aparecimento dos primeiros hominídeos, que parece ser um tempo tão ínfimo em relação à Idade da Terra, representam ainda assim para a humanidade, um espaço de tempo absurdamente longo como se pode observar na figura 12 abaixo.

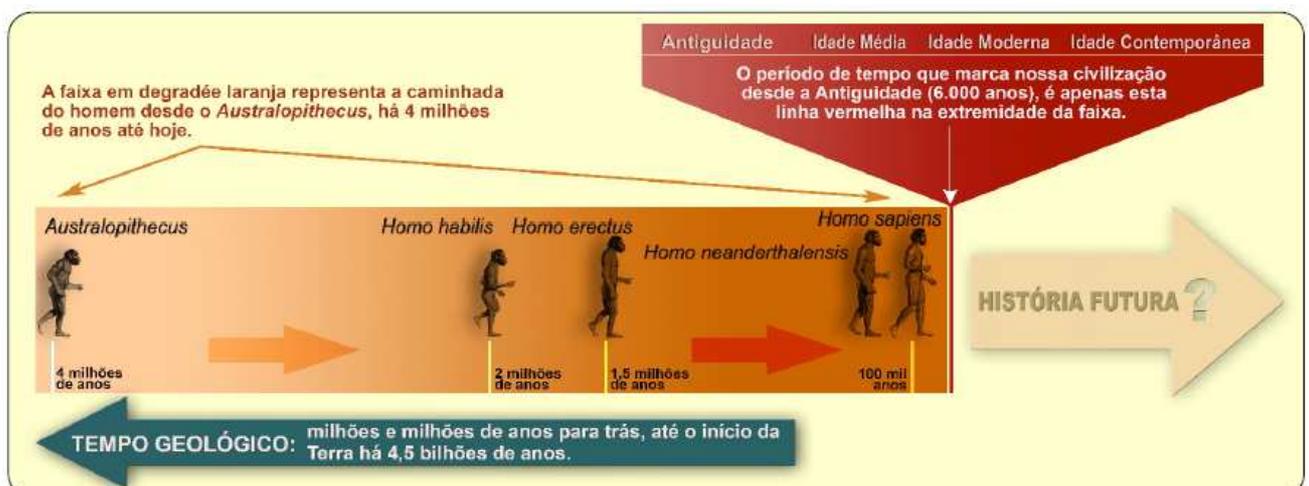


Figura 12. Fonte: Mazing, www.geoturismobrasil.com

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É notável o avanço dos métodos radiométricos desde a primeira datação realizada por Rutherford. A sua idéia de utilizar os átomos radioativos como relógios naturais foi capaz de responder aos grandes questionamentos de físicos, geólogos e biólogos e acerca da magnitude do tempo, comprovando as idéias defendidas por James Hutton e Charles Darwin.

Percebe-se ao final deste trabalho que diversos cientistas que contribuíram para a construção da escala do tempo geológico fizeram mais do que simplesmente datar as rochas. Eles promoveram uma evolução no modo de pensar o tempo, o nosso planeta e, inclusive, nós mesmos. Eles descobriram que a Terra é muito mais antiga do que se poderia ter imaginado e contrariando as idéias correntes anteriores, que a superfície terrestre e o seu interior transformaram-se e modelaram-se repetidamente pelos mesmos processos geológicos que ainda hoje estão atuantes. Eles descobriram também que não apenas o planeta, mas também seus habitantes evoluíram no tempo. E revelaram que os humanos ocupam apenas um dos mais breves momentos da longa história da Terra. Enfim, para assimilar o conceito de Tempo Geológico, é preciso tempo e reflexão, e principalmente uma mente aberta para novas descobertas (MAZING, www.geoturismobrasil.com)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBARÈDE, F. *Geoquímica: Uma introdução*. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ALLÈGRE, C.J. *Isotopic Geology*. 1ªed. New York: Cambridge University Press, 2008.

ANTUNES, M.T. *O Ensino da Geologia: perspectiva científicas*. 1ªed. Lisboa: Universidade Aberta, 1991.

BRENNAN, R. *Gigantes da Física: Uma história da física moderna através de oito biografias*. 1ªed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

BRUSH, S.G. *Transmuted Past: The age of the Earth and the Evolution of the elements from Lyell to Patterson*. 1ªed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

CARNEIRO, C.D.R.; MIZUSAKI, A.M.P; ALMEIDA, F.F.M. *A determinação da idade das rochas*. Terrae Didática, vol.1, nº 6, pág.35, 2005. Disponível em <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>> Acesso: 05 de setembro de 2011.

CASANOVA, I. *Clair C.Patterson (1922-1955), discoverer of the age of the Earth*. Internatl Microbiol, Springer-Verlag Ibérica, 1:231-232, 1998.

DICKIN, A.P. *Radiogenic Isotope Geology*. 2ªed. New York: Cambridge University Press, 2005.

EVE, A.S. *Rutherford: Being the life and letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford, O. M.*. Cambridge: Cambridge University Press. 1939.

FAIRCHILD, T.R. *et al. Decifrando a Terra*. 2ªed. São Paulo: Companhia Nacional, 2009.

GERALDES, M.C. *Introdução à Geocronologia*. 1ªed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geociências, 2010.

KULLERUD, KARE. *O Método U-Pb*. Traduzido por Ricardo Barroso, Escola Secundária D.Sancho I, Portugal. Disponível em:

<http://www.ig.uit.no/webgeology/webgeology_files/portuguese/upb_pt.html>. Acesso em: 05 de outubro de 2011.

MAZING, C.P. *O Tempo Geológico*. Disponível em:

<<http://www.geoturismobrasil.com/REVISTA%20ARTIGOS/o%20tempo%20geol%C3%B3gico%20-%20Manzig.pdf>>. Acesso em 30 de novembro de 2011.

MEDEIROS, A. *Aston e a descoberta dos isótopos*. Química Nova na Escola, nº10, novembro, 1999.

MEDINA, J. *et al.* *A idade da Terra numa perspectiva histórica*. Revista electrónica de ciências da Terra. Disponível em: < [http:// e-terra.geopor.pt](http://e-terra.geopor.pt)>, ISSN 1645-0388, vol.15, nº6, 2010>. Acesso em: 10 de outubro de 2011.

MOSLEY, M.; LYNCH, J. *Uma História da Ciência*. 1ªed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2010.

PATTERSON, C. *Age of Meteorites and the Earth*. Geochimica et Cosmochimica acta, 1956, vol.10, pág.230 a 237.

PRESS *et al.* *Para entender a Terra*. 4ªed. São Paulo. Ed. Artmed, 2006.

RAFFERTY, J.P (ed). *Geochronology, Dating and Precambrian time: The beginning of the World as we know it*. 1ªed. New York: Britannica Educational Publishing, 2011.

TROUILLET, F. *L'age de la Terre: la démarche de Clair Patterson*. Bulletin de l'Union des physiciens, Paris, nº923, pp. 413-427, 2010.

WILDE, S. A *et al.* (2001). "Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago". *Nature* **409** (6817): 175–178.

WHITE, W.M. *Radiogenic Isotope Geochemistry in: Geochemistry by William M. White: an on-line textbook*. Ed .John Hopkins University Press, 2009. Disponível em: <[http://www.imwa.info/white geochemistry.html](http://www.imwa.info/white_geochemistry.html)>. Acesso em 20 de setembro de 2011.

ANEXOS

Anexo 1

■ Datação radioativa

PENSE

Como podemos afirmar que o "Pergaminho do Mar Morto", manuscrito hebreu do livro do Velho Testamento, possui mais de dois mil anos?

Qual a idade do fóssil do Homem de Neanderthal?

A resposta a essas e outras perguntas pode ser obtida por meio da medição das quantidades de determinados isótopos presentes nos objetos.

■ Determinação da idade de fósseis e objetos antigos

Em 1946, o químico norte-americano Willard Libby (1908-1980) desenvolveu uma técnica para determinar a idade de objetos antigos utilizando como parâmetro o isótopo radioativo carbono-14. Tal método baseia-se no fato de que nos sistemas vivos estão presentes os três isótopos do carbono: ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C . Os dois primeiros são estáveis e o terceiro decai de acordo com a equação:

$$^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\beta$$

O tempo de meia-vida desse decaimento é de $5,7 \times 10^3$ anos.

A quantidade de nitrogênio-14 da amostra pode ser determinada em laboratório. Como é possível determinar a quantidade original de carbono-14?

Qual a idade do Santo Sudário? Como ela pode ser determinada?

A resposta a essa questão foi dada por Willard F. Libby, que em 1949 publicou um artigo apresentando o método de datação com carbono-14.

Qual a idade do planeta Terra?

O carbono-14 é distribuído pelos ciclos do carbono (decomposição de plantas, fotossíntese, respiração, alimentação, etc.) e absorvido em todos os seres e compostos orgânicos do planeta, como o exemplo do Santo Sudário e de fósseis muito antigos.

■ A idade da Terra

Lord Kelvin (1824-1907) propôs, baseado em cálculos termodinâmicos, que a Terra teria 100 mil anos. Essa estimativa foi aceita por muitos cientistas, mas rejeitada por outros. Ernest Rutherford foi quem propôs o método baseado em decaimento radioativo, aceito até hoje. De acordo com tal método, as rochas mais antigas já identificadas na Terra (granitos da África do Sul) tiveram a idade estimada em cerca de 3,8 bilhões de anos. Por isso considera-se que o planeta Terra deve ter pelo menos 4 bilhões de anos.

O método baseia-se na comparação das quantidades de urânio e chumbo presentes em minérios de urânio que se acreditava existirem desde os primórdios do planeta. O chumbo-206 presente nesses minérios provém do decaimento do isótopo do urânio-238 por emissões radioativas.

713

Fonte: SANTOS, W.L.P.; MÓL, G.S. (Coords.) et alii. Química e Sociedade, 1ª ed. São

Paulo: Nova Geração, 2005.

Anexo 2

■ Datação com o urânio e o potássio

A datação com o C-14 permite determinar somente a idade de materiais de origem orgânica (substâncias que apresentam carbono). A medição de outros isótopos radioativos, como o urânio e o potássio, permite a datação de rochas. Isso é possível devido aos tempos de meia-vida dos isótopos naturais serem muito longos. Por exemplo, a meia-vida do urânio é $4,5 \times 10^9$ anos, e a do potássio, $1,3 \times 10^9$ anos.

Esse tipo de datação é importante, pois permite estimar a idade da Terra, uma vez que se acredita que os minérios de urânio existam desde a formação do planeta.

Como, a cada tempo de meia-vida, a quantidade de um isótopo cai à metade e, no caso do decaimento do urânio, cada átomo desse elemento termina seu decaimento no Pb-206, podemos usar a relação entre o número de átomos de Pb-206, estável, e o número de isótopos de urânio da amostra, determinando a idade, por exemplo, de uma rocha ou de um meteorito.

A tabela a seguir mostra as relações entre Pb-206 e U-238, considerando uma quantidade inicial de urânio igual a 100.

Número de meias-vidas	Número de átomos de U-238	Número de átomos de Pb-206	Relação Pb/U
0	80	0	0
1	40	40	1
2	20	60	3
3	10	70	7
4	5	75	15

Quando a relação Pb/U for igual a três, significa que a rocha foi formada há 3 meias-vidas do U-238, ou seja, a $1,35 \times 10^{10}$ anos.

De forma semelhante, pode-se fazer a medição de fósseis e rochas pelo potássio-40. Como o decaimento do K-40 é por captura de um elétron ou pela emissão de pósitrons, forma-se o argônio-40:



Nesse método, tritura-se a rocha ou o fóssil e mede-se a quantidade de argônio que é liberada. Pela relação entre o argônio e o potássio estima-se a idade das rochas e dos fósseis.

■ Medicina

Os radioisótopos (radioisótopos artificiais) atualmente são utilizados em larga escala na medicina nuclear. Os **radiotraçadores** são os radioisótopos artificiais usados para mapeamento de órgãos, uma vez que se concentram em determinados tecidos. O Na-24, por exemplo, é usado no estudo de lesões vasculares e no mapeamento do coração.

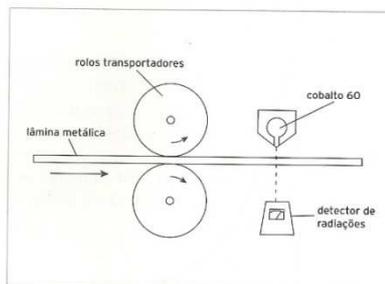
Já o iodo-131 é utilizado para terapia do câncer da tireoide. Como esse radioisótopo se acumula nesse órgão, a radiação gama emitida por ele destrói as células doentes, que estão mais fragilizadas do que as outras. Outro grupo de radioisótopos emissores de pósitrons são usados nos diagnósticos por imagem, como o PET (*positron emission tomography*, "tomografia de emissão de pósitron"), em que é possível obter imagens do processo bioquímico no tecido ou órgão *in vivo* – ou seja, por meio do metabolismo celular e possível distinguir lesões benignas de malignas. Dentre os diversos radioisótopos emissores de pósitron podemos citar o ${}^{18}\text{F}$ (flúor-18), que é utilizado para identificar as regiões do organismo com metabolismo intenso de glicose, e o ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ (isótopo instável do tecnécio-99), que tem um período de meia-vida de, aproximadamente, 6 horas e é usado em diagnósticos feitos por interpretação de imagem em contador de cintilação. O equipamento mede a energia da radiação gama emitida pelo elemento no organismo da pessoa submetida a esse tipo de análise clínica.

■ Agricultura, indústria e alimentação

Como as radiações gama ultrapassam os materiais menos densos, elas podem ser utilizadas para esterilização de materiais cirúrgicos e alimentos. Porém, devido a sua capacidade ionizante, alguns alimentos, ao serem irradiados, deterioram-se. Isso ocorre, por exemplo, com o leite e seus derivados.

Já na agricultura utiliza-se o P-32 como radiotraçador para verificar a absorção de fertilizantes pela planta. Essa técnica permite observar qual parte da planta utiliza o nutriente.

Na indústria, várias atividades utilizam radioisótopos, como a detecção de falhas em lâminas metálicas, a ionização de materiais pela radiação gama para formar radicais livres em reações de polimerização e na localização de pequenos vazamentos em tubulações de água.



▲ Uma das aplicações das radiações gama. A passagem de radiação seria um indicativo de falhas na lâmina. Representação fora de escala.