



4

Comportamento dos Radionuclídeos no Ecossistema

Barbara Paci Mazzilli

1.1 Introdução

Os radionuclídeos primordiais tiveram sua origem nas rochas, mas ao longo do tempo foram se espalhando pelos vários compartimentos do ecossistema até atingir um estado de equilíbrio. Na Figura 1.1, podem-se visualizar as principais vias de transferência dos radionuclídeos primordiais ^{40}K , urânio, tório, ^{226}Ra , ^{228}Ra e o radônio e descendentes (RnD) nos vários compartimentos do ecossistema.

Várias indústrias não nucleares utilizam matérias-primas que podem conter pequenas quantidades de radionuclídeos naturais. Estes radionuclídeos podem, eventualmente, concentrar-se durante o processamento da matéria-prima nos produtos, subprodutos ou resíduos, alcançando valores mais altos. Tais indústrias são capazes de gerar exposições importantes de grupos críticos ou exposições coletivas à radiação natural; tais exposições podem ser incorridas tanto por trabalhadores, quanto pela população que vive nas circunvizinhanças daquelas indústrias, ou mesmo pela população remota pelo uso de subprodutos.

No Brasil, diversas indústrias podem ser classificadas como NORM e sua operação requer um controle radiológico

ocupacional e ambiental adequado às suas características. Dependendo dos níveis de radioatividade, estas indústrias são passíveis de controle pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, o que inclui adequação aos seus regulamentos de proteção radiológica. Tais indústrias encontram-se dispersas por todo o território nacional e, portanto, as características regionais tem papel primordial na exposição da população aos possíveis poluentes liberados pelas instalações. Adicionalmente, grandes áreas contendo rejeitos de processo com radionuclídeos associados (bacias de rejeito, pilhas de estéreis) serão abandonadas ao final das operações e, portanto, ações remediadoras para aquelas áreas visando ao seu uso irrestrito poderão ser necessárias. Portanto, a estimativa deste passivo ambiental é de extrema importância na avaliação do impacto radiológico ambiental causado pelo funcionamento destas instalações. Existe também uma tendência mundial de reúso dos resíduos gerados por estas instalações, e neste caso, também se torna necessário avaliar os impactos radiológicos que podem advir desta prática.

Para se avaliar de forma satisfatória o impacto radiológico ambiental das indústrias NORM, é necessário quantificar o material radioativo liberado na forma de efluentes líquidos e gasosos e estudar como este material se dispersa no meio ambiente até atingir o homem. Quando um radionuclídeo é introduzido no ar ou na água, ele se dispersa e é diluído, espacialmente redistribuído e, finalmente, acumulado em algum compartimento específico do ambiente. O comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente é governado por uma série de fatores físicos, químicos e biológicos. Para se entender os efeitos biológicos, deve-se conhecer ou ser capaz de se prever o movimento e a concentração do material no sistema em estudo e a toxicidade química e radiológica dessas concentrações para os componentes bióticos deste sistema.

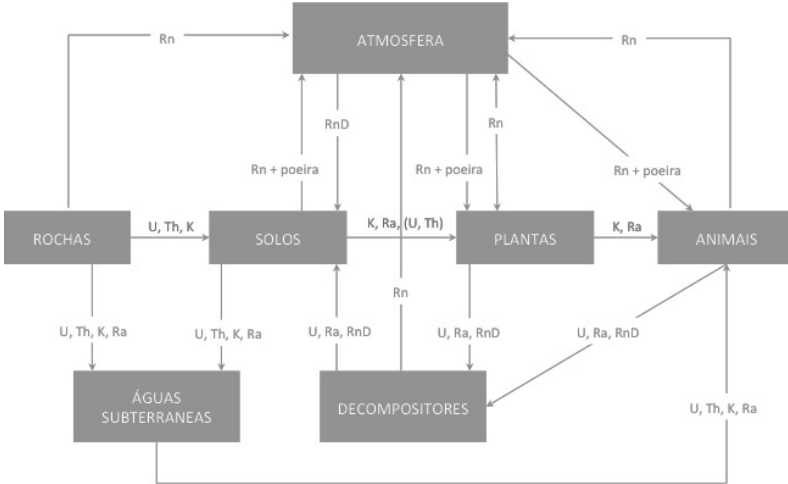


Figura 1.1. Principais vias de transferência dos radionuclídeos primordiais e descendentes nos vários compartimentos do ecossistema.

1.2 Mecanismos de transporte

A descrição da liberação de radionuclídeos no meio ambiente é conhecida como “termo fonte”. Esta descrição inclui o conhecimento do tipo de radionuclídeo e sua forma físico-química, da quantidade liberada por unidade de tempo e da configuração geométrica da descarga.

Os radionuclídeos liberados no meio ambiente percorrem diversos caminhos, por meio de vias preferenciais de transferência, até chegarem ao homem. Este movimento pode ser descrito matematicamente por meio de modelos de compartimento. As vias de transferência que contribuem para a maior dose de radiação no homem são conhecidas como vias críticas e são características para cada instalação e meio ambiente receptor.

Quando os radionuclídeos são liberados no meio ambiente, o material se dispersa no meio abiótico. Os comparti-

mentos que recebem o material e que podem, eventualmente, concentrar quantidades consideráveis do radionuclídeo, podem ser constituídos de organismos vivos ou materiais inertes. As quantidades acumuladas em cada compartimento dependem da importância dos processos de transportes envolvidos (figura 1.2).

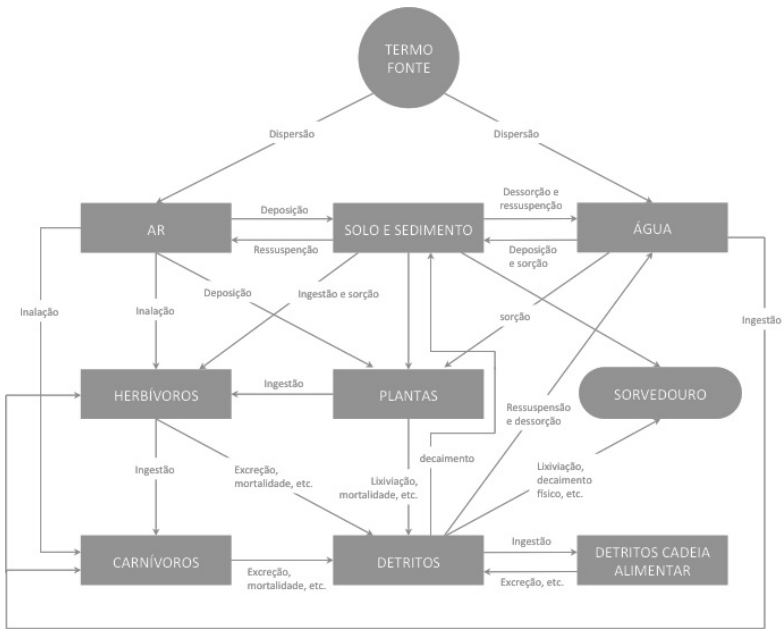


Figura 1.2. Transporte dos radionuclídeos no ecossistema.

A maior parte das descargas radioativas ocorre na forma de material dissolvido ou em suspensão nos efluentes líquidos, ou gases e particulados em efluentes gasosos. O material que entra em um corpo de água ou corrente de ar é imediatamente sujeito a um processo de turbulência e difusão molecular que causa a sua dispersão.

O efeito geral da dispersão é a redução da concentração do radionuclídeo no ar ou na água com a distância do ponto de descarga. A extensão e a rapidez com que este material se dispersa variam com o grau de turbulência do meio aéreo ou aquático.

Os radionuclídeos no ar ou na água são, então, sujeitos ao fenômeno de deposição. Este fenômeno inclui a sedimentação gravitacional, arraste por precipitação, impactação e adsorção ou troca química. A sedimentação gravitacional de partículas em suspensão torna-se relevante para partículas com diâmetro superior a 20 μ m. O arraste por precipitação ocorre quando os particulados são lavados da atmosfera por cristais de gelo ou gotículas de água. A impactação é o processo pelo qual as partículas em suspensão no ar ou na água colidem com um objeto sólido, enquanto que a corrente é desviada pelo objeto. Como a sedimentação gravitacional, a importância deste processo também aumenta com o tamanho da partícula. A adsorção ou troca química é um processo bem mais complexo, pois depende das propriedades físico-químicas do radionuclídeo bem como da superfície onde a troca ou adsorção ocorre.

Quando o ar ou a água contendo radionuclídeos entra em contato com material sólido como rocha, sedimento em suspensão, vegetação ou plâncton, as partículas apresentam uma alta probabilidade de serem adsorvidas pela superfície desses materiais. Geralmente, os materiais sólidos acumulam a maioria dos radionuclídeos, de forma que a sua concentração no equilíbrio é consideravelmente maior do que no meio aquático ou gasoso circundante. A adsorção costuma aumentar com o aumento da área superficial por unidade de massa ou volume.

A adsorção de radionuclídeos na superfície de um sólido se processa rapidamente. Entretanto, se o meio aquático ou ar é continuamente reabastecido, e se o meio contém concentrações significativas do radionuclídeo durante um longo período de tempo, então, a superfície em questão irá acumular o radio-

nuclídeo e sua concentração aumentará durante um período de tempo bem mais longo.

O aumento ou decréscimo de radioatividade em uma determinada superfície, em certo período de tempo, dependerá da relação entre sua entrada e saída. A razão de entrada aumenta com a concentração do radionuclídeo no meio, a extensão da superfície em contato com o meio, a razão com a qual o meio em contato com a superfície é renovado, com a diminuição da concentração de íons competitivos presentes no meio e muitos outros fatores. As perdas do radionuclídeo, por outro lado, são causadas por fenômenos tais como decaimento físico, lixiviação, ressuspensão ou redistribuição espacial da superfície absorvente.

Um processo de deposição importante que remove radioatividade da atmosfera é a precipitação por arraste, que pode ocorrer na forma de *rainout* e *washout*. No *rainout* partículas de tamanho inferior a *submicron* atuam como um núcleo de condensação, em cuja superfície o vapor de água se condensa formando cristais de gelo que crescem em massa até que a ação da gravidade possa agir sobre elas. No processo de *washout*, partículas geralmente maiores do que 1 mm, são carregadas por cristais de gelo ou gotas de água. Ao precipitar as gotas colidem com partículas de aerossóis que aderem à sua superfície e são carregadas para o solo.

A ressuspensão do solo, sedimento ou material orgânico é um outro processo de transporte que pode ocorrer em várias situações.

Radionuclídeos que se encontram em compartimentos abióticos do ecossistema podem se concentrar nas plantas, base da cadeia alimentar, por assimilação do solo, deposição do ar ou adsorção da água no caso de plantas aquáticas.

O transporte do material radioativo das plantas para os herbívoros ocorre por ingestão. Os herbívoros ingerem, também, radionuclídeos associados com solo ou sedimento. A inalação

de aerossóis constitui uma alternativa adicional de assimilação de radionuclídeos pelos animais. A inalação pode se tornar mais importante do que a ingestão nos casos de radionuclídeos insolúveis em ambientes áridos e poeirentos. Os radionuclídeos presentes nos tecidos dos herbívoros podem ser ingeridos pelos carnívoros através da predação.

Cada etapa da cadeia alimentar fornece uma forma de discriminação, uma vez que cada radionuclídeo se concentra fisiologicamente em um determinado tecido, dependendo de suas propriedades físico-químicas.

A morte de plantas e animais, além de suas secreções e excretas, transporta os radionuclídeos para os reservatórios de detritos orgânicos. Os detritos funcionam como um reservatório significativo de material radioativo que pode reciclar através de compartimentos bióticos por meio da cadeia alimentar dos detritos. A mineralização dos detritos, realizada por microrganismos, libera os radionuclídeos no solo ou sedimento, tornando-os novamente disponíveis por meio da cadeia alimentar ou da inalação do material ressuspense no ar.

Os compartimentos ambientais que recebem material radioativo e não o liberam para outros compartimentos são denominados sorvedouros. Esses compartimentos são frequentemente constituídos de extratos profundos de solo ou sedimento com praticamente nenhum contato com processos biológicos e protegidos da erosão do vento e da água.

1.3 Fatores que afetam os mecanismos de transporte

Os compartimentos esquematizados na figura 1.2 podem ser definidos como uma entidade estrutural do ecossistema homogênea ao longo do tempo, que recebe, perde e mantém um inventário de substâncias químicas.

A quantidade total de um radionuclídeo presente em um compartimento de interesse pode ser definida como sendo q . A

concentração média de um radionuclídeo (C) em um compartimento é dada pela razão q/M , onde M é a massa do compartimento.

Os principais fatores que podem afetar q ou C são as razões de entrada ou perda do compartimento. Simbolicamente:

razão de entrada $\rightarrow q \rightarrow$ razão de saída

A razão de entrada, **Re**, e a razão de saída, **Rs**, são expressas, normalmente, em unidades de radioatividade em função do tempo. Portanto, a derivada de q com relação ao tempo (t) é dada por:

$$dq / dt = Re - Rs$$

Se **Re = Rs**, q é uma constante e o compartimento será definido como um estado estacionário.

Os processos envolvidos com o movimento dos radionuclídeos são, normalmente, de primeira ordem. Nesses casos, **Rs** pode ser expresso por:

$$Rs = Kq$$

A constante **k** pode ser expressa pela razão:

$$k = \ln_2 / Tef$$

Onde: **Tef** é definido como meia-vida efetiva e representa o tempo necessário para que um determinado radionuclídeo seja perdido por um compartimento. Este termo leva em consideração todos os mecanismos responsáveis pela perda, tais como, decaimento físico, excreção, transporte, etc.

A expressão que fornece **dq/dt** pode ser integrada de tal forma que q seja expressa em função de **Re**, **k** e **t**. Assumindo

que $\mathbf{R_e}$ é constante ao longo do tempo e que quando $\mathbf{t} = \mathbf{0}$, $\mathbf{q} = \mathbf{0}$, pode-se afirmar que:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{R_e/k}) (1 - \mathbf{e^{-kt}})$$

Esta expressão mostra que \mathbf{q} é proporcional a $\mathbf{R_e}$, inversamente proporcional a \mathbf{k} e cresce com o tempo até que seja alcançada a condição de equilíbrio (quando $\mathbf{1 - e^{-kt}}$ tende para 1).

Esta equação mostra que a concentração de um radionuclídeo em um compartimento depende da relação entre a razão de entrada e razão de saída. Pode-se, então, definir e medir uma série de razões de entrada (\mathbf{m}) e de saída (\mathbf{n}), agindo em um determinado compartimento. Genericamente:

$$\mathbf{dq/dt} = \sum \mathbf{R(e)_i} - \mathbf{q} \sum \mathbf{k_j}$$

Conclui-se que a variação na concentração de um radionuclídeo em um compartimento é governada por todas as taxas de entrada e de saída. Taxas individuais de entrada e de saída dependem de vários mecanismos associados aos valores de $\mathbf{R_e}$ e \mathbf{k} .

1.4 Propriedades dos radionuclídeos

O movimento e concentração dos radionuclídeos nos vários compartimentos do ecossistema são governados por uma série de fatores que dependem em grande parte das propriedades físicas e químicas do próprio nuclídeo.

Cada elemento da tabela periódica apresenta propriedades químicas semelhantes, enquanto que radioisótopos de um mesmo elemento, geralmente, apresentam meias-vidas e esquemas de decaimento diferentes. Essas diferenças implicam um comportamento ambiental diferente para cada radioisótopo ao longo do tempo.

A maioria dos radionuclídeos se comporta, pelo menos qualitativamente, como seu análogo nutriente essencial. Portanto, os radionuclídeos que se encontram na forma solúvel e são quimicamente análogos a elementos nutrientes essenciais, tendem a seguir os mesmos caminhos nos vários compartimentos do ecossistema.

1.5 Comportamento de grupos específicos de radionuclídeos

O comportamento dos radionuclídeos no ecossistema costuma ser específico, pois depende basicamente de suas características físico-químicas. Entretanto, alguns grupos de radionuclídeos podem apresentar um comportamento ecológico similar devido às suas propriedades químicas.

Os isótopos de rádio pertencem ao grupo dos metais alcalinos terrosos, que apresentam estado de oxidação +2, são altamente reativos e, raramente, encontram-se no estado livre. Formam sais de carbonato, sulfato e cloreto. Existem quatro isótopos naturais do rádio presentes no ambiente: ^{226}Ra produto de decaimento do ^{238}U , ^{228}Ra e ^{224}Ra produto de decaimento do Th e ^{223}Ra da série de decaimento do ^{235}U . Desses isótopos, o ^{226}Ra é emissor alfa e gama com uma meia-vida de 1620 anos, o ^{228}Ra é um emissor beta e gama com uma meia-vida de 5,75 anos e o ^{224}Ra e ^{223}Ra apresentam meia-vida de dias. Por serem isótopos do mesmo elemento químico, apresentam comportamento similar na natureza. Todos são bastante lábeis no meio ambiente e devido à sua similaridade química com o cálcio, tendem a se concentrar nos ossos. Os produtos de decaimento de meia-vida curta do ^{226}Ra e ^{228}Ra podem crescer até atingir o equilíbrio secular dentro do osso hospedeiro, contribuindo substancialmente para a dose de radiação. O impacto radiológico do rádio é devido à sua exposição direta e à exposição de seus produtos de decaimento, em particular, a exalação do ^{222}Rn , produto de decaimento do ^{226}Ra e do ^{220}Rn , produto de

decaimento do ^{224}Ra , a partir do solo, materiais de construção e produtos NORM.

Os isótopos de radônio pertencem ao grupo dos gases nobres. Este grupo é também conhecido como dos gases inertes, pois é constituído de gases que, devido à sua configuração eletrônica, não se combinam quimicamente com outros elementos. Os gases nobres, portanto, existem como moléculas monoatômicas. Todos os gases nobres ocorrem naturalmente na atmosfera, como isótopos estáveis, com exceção do Rn que é instável e radioativo. O isótopo de Rn de meia-vida mais longa é o ^{222}Rn , com meia-vida de 3,8 dias, formado pelo decaimento direto do ^{226}Ra presente nas rochas e solos. Os gases nobres não se concentram na cadeia alimentar e tampouco nos tecidos biológicos. Uma exceção é o Rn que pode ser encontrado nos tecidos gordurosos, se formado dentro do organismo pelo decaimento do ^{226}Ra . A principal via de exposição é a imersão na nuvem radioativa e consequente irradiação externa. O ^{220}Rn e ^{222}Rn são importantes quando inalados, pois seus produtos de decaimento de meia-vida longa irradiam os tecidos dos pulmões, podendo induzir câncer.

O U e Th pertencem ao grupo dos actinídeos, que inclui também os elementos transurânicos que são produzidos artificialmente. Todos os actinídeos podem existir em vários estados de oxidação, sendo o mais comum o +3. No caso do Th, o estado de oxidação +4 é mais estável e o U apresenta maior estabilidade no estado +6. A maioria dos actinídeos emite partículas alfa, o que aumenta o risco de irradiação interna. Além do mais, alguns elementos, tais como U-238 e Th-232, apresentam uma massa suficiente para torná-los quimicamente tóxicos. De uma maneira geral, os actinídeos formam compostos insolúveis no meio ambiente e não são considerados biologicamente móveis. Normalmente, acumulam-se nos solos e sedimentos. A saída deste compartimento ocorre por meio de processos geológicos como erosão, e algumas vezes, por lixiviação. O uptake dos ac-

tinídeos do solo para as plantas é bastante baixo, com exceção do urânio, que se acumula em algumas plantas de tal forma que elas funcionam como bioindicador de depósitos de U. No caso de animais terrestres, os actínídeos são assimilados via ingestão e inalação.

Referências Bibliográficas

MAZZILLI, B.C. MÁDUAR, M. F.; CAMPOS, M.P. *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental*. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/pos-graduacao/arquivos/201103311026310-Apostila%20TNA-5754%20abr-2011.pdf. Acesso em: 05/01/2016.