

Modelagem Matemática de Atividade

Microbiana*

Laís Luz Rodrigues Neto⁽¹⁾ e Elaine Cristina Catapani Poletti⁽²⁾

30 de abril de 2012

Resumo

Processos de recuperação de áreas contaminadas ocorrem pela degradação de compostos poluidores através da utilização de seres vivos ou seus componentes. Este processo, denominado biorremediação, emprega micro-organismos ou suas enzimas para degradar compostos poluentes. Para se avaliar o consumo de oxigênio ou, no caso deste trabalho, a geração de gás carbônico, utiliza-se um método indireto de quantificação, denominado respirometria. Além de avaliar a eficiência do processo de descontaminação do solo, o método aponta as condições do solo que devem melhorar para uma boa eficiência do meio. Dentro deste contexto situa-se este estudo, cujo propósito foi o desenvolver um modelamento matemático da atividade microbiana do solo a fim de se compreender o comportamento do fenômeno, bem como se determinar o valor assintótico a que se destina a geração de CO_2 .

Palavras Chave: Microbiologia, Modelagem Matemática, Ecologia Matemática.

Introdução

O processo de biorremediação consiste em recuperar águas ou solos contaminados utilizando micro-organismos, fungos, plantas, algas verdes ou suas enzimas. Ou seja, processo baseia-se no emprego de um produto novo, totalmente natural, para que o ambiente contaminado tenha condições de retornar à sua condição original.

*Trabalho realizado como parte de iniciação científica, fomentada pelo CNPQ-PIBIC.

Email: ⁽¹⁾laisluzrn@gmail.com.br . Graduada do curso de Tecnologia de Controle Ambiental, Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP.

⁽²⁾elainec@ft.unicamp.br . Professora Doutora do Departamento de Disciplinas Básicas e Complementares e do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP.

A Biorremediação pode ser empregada para atacar contaminantes específicos no solo e águas subterrâneas. Um exemplo de sua utilização é a adição de fertilizantes de nitrato ou de sulfato para facilitar a decomposição de óleo pela ação de bactérias presentes no meio. Como os micro-organismos utilizam substratos orgânicos e inorgânicos como fonte de alimentação, os contaminantes presentes no solo são convertidos em CO_2 (dióxido de carbono), H_2O (água) e biomassa.

É um processo natural que promove um tratamento com custo relativamente baixo quando comparado a outras alternativas convencionais de tratamento de resíduos sólidos. Entretanto, para se otimizar o processo é necessário determinar quais as condições que favorecem as atividades microbianas no meio, fato que pode ser avaliado pelo método da respirometria.

Desta forma, o método respirométrico tem como objetivo avaliar a atividade microbiana no solo ao quantificar o consumo de O_2 ou a geração de CO_2 proveniente da respiração microbiológica ao degradar compostos presentes no solo.

O objetivo deste estudo foi modelar matematicamente a geração de CO_2 , num processo de landfarming, através da atividade microbiana no solo, a fim de se compreender o comportamento do fenômeno, bem como verificar a existência de um valor assintótico a que se destina a geração de CO_2 .

1 O Processo de Modelagem

Os processos de modelagem matemática têm sido amplamente discutidos em diversos grupos de pesquisa, com intuito de se favorecer entendimentos sobre fenômenos específicos, bem como estudos de naturezas hipotéticas, onde se tem por propósito estudos de estratégias e ações remediadoras ou não.

São diversos os instrumentos utilizados, vão desde estudos de matemática discreta, tal como o modelo de equações de diferenças utilizado pela principal agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA) e em institutos europeus de pesquisa para estudo de concentração de poluentes na água, até estudos de matemática contínua, utilizando-se equações ou sistemas de equações diferenciais [1][2][3][4].

O processo de modelagem matemática abordado neste trabalho baseou-se em dados obtidos numa pesquisa¹ desenvolvida na FT-UNICAMP sobre biodegradação de borras oleosas, ou seja, resíduos de refinarias de petróleo. Na referida pesquisa foram realizadas as medições do CO₂ gerado², em laboratório, em diferentes condições a partir do método da respirometria de Bartha.

Seguindo a lógica, quando há aumento de alimento disponível, há aumento da massa biológica, portanto, há mais respiração e então se é gerado mais CO₂. Se não houver uma reposição destes compostos, como é o caso de um experimento respirométrico, a oferta de alimento diminui e, conseqüentemente, há redução da massa biológica e da geração de CO₂ [6].

As condições laboratoriais de, por exemplo, temperatura, pH e umidade submetidas aos testes são ótimas. A princípio, os testes respirométricos inferem em relação à biodegradabilidade do composto sob condições ótimas [7]. Após uma conclusão positiva, são realizados mais testes fazendo-se variações tais como a de concentração do resíduo aplicado na amostra, com intuito de determinar a melhor eficiência da biodegradabilidade no solo.

Em geral, a respirometria detecta uma possível toxicidade do composto na comunidade microbiana, estima o tempo levado para degradação do composto e determina as taxas de aplicação mais adequadas do resíduo no solo, segundo [6].

O respirômetro de Bartha, esquematizado na Figura 1, é um frasco específico destinado à realização da respirometria. Sua composição garante que o CO₂ contabilizado seja proveniente apenas da biodegradação dos resíduos. No Brasil, as normas que padronizam o método respirométrico de Bartha são a Norma CETESB L6.350/1990 e NBR 14.283/1999, da ABNT. No controle da disposição e tratamento de resíduos de borras oleosas, o landfarming, a respirometria de Bartha é um experimento fundamental.

¹ Pesquisa desenvolvida sob a coordenação da Professora Doutora Cassiana Maria Reganhan Coneglian da FT-UNICAMP que gentilmente disponibilizou os dados para o desenvolvimento da modelagem.

² Para maiores detalhes o leitor poderá remeter-se à [5].

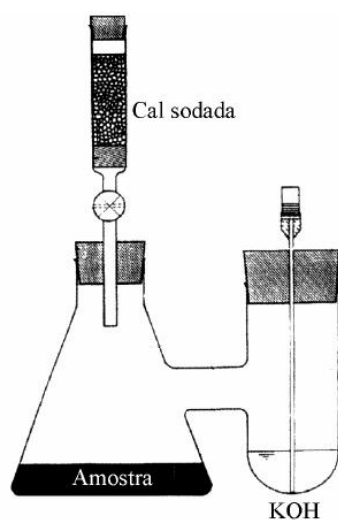


Figura 1. Esquemática do Respirômetro de Bartha [7].

Os dados apresentados na Tabela 1 indicam os valores medidos de CO₂ gerado na atividade microbiana da amostra Controle, ou seja, na amostra do solo sem adição de resíduos.

Tabela 1: Geração de CO₂ acumulado (mg/L) conforme o passar dos dias.

Dias (x)	Controle (y)	Dias (x)	Controle (y)	Dias (x)	Controle (y)
0	0,00	18	55,12	46	95,21
1	9,87	19	55,37	49	103,61
2	11,67	20	59,41	51	106,77
3	15,17	21	62,50	53	107,02
5	19,33	22	63,57	55	115,34
7	22,28	24	67,10	57	116,42
8	25,00	26	69,66	59	118,15
9	26,92	28	74,47	62	120,42
10	28,00	30	78,37	64	122,10
11	32,87	32	78,73	67	125,61
12	33,21	34	81,12	70	130,89
13	33,54	36	84,41	73	141,71
14	38,80	38	85,97	76	146,99
15	44,54	40	86,74	78	157,86
16	46,54	42	86,97	80	159,77
17	48,43	44	89,81		

Os dados da Tabela 1 estão representados no gráfico de dispersão, apresentado na Figura 2.

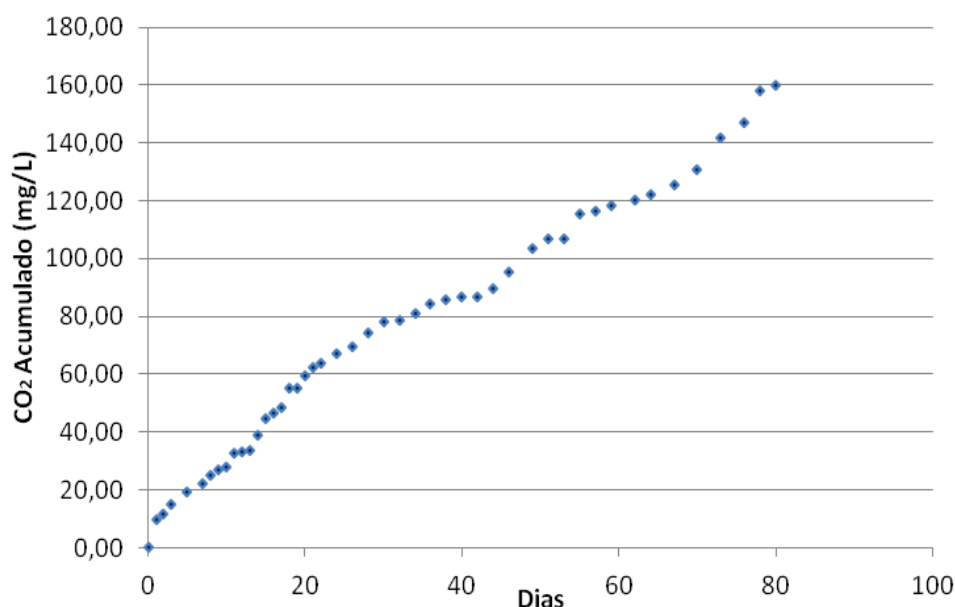


Figura 2. Plotagem dos dados obtidos através da respirometria – Controle [5].

De acordo Nuvolari (1996), de fato, a geração de CO₂ resultante da atividade microbiana diminui à medida que a quantidade de compostos na amostra de solo também diminui. Tal fenômeno é observado na Figura 2: as medições realizadas indicam que a geração total de CO₂ na amostra do controle tende a se estabilizar com o passar dos dias, entretanto não apresenta, claramente, qual é o valor limite de CO₂ gerado a que tende.

Desta forma, a pergunta que se faz é sobre este comportamento assintótico dos dados: sabendo-se, à partir da literatura, que a geração de CO₂ à partir de atividade microbiana no solo tende a se estabilizar, quanto tempo levaria, aproximadamente, em medições laboratoriais, para se obter o valor limite da geração de CO₂? Qual é este valor limite?

Através da aplicação do Método de Ford-Walford, um método de cálculo de valor assintótico, e de um ajuste linear de modelo exponencial, foi possível responder à estas perguntas conforme segue.

1.1 O Ajuste Linear de Ford-Walford

Para o cálculo do valor assintótico e aplicação do método Ford-Walford, foi tomado como base os passos descritos por [8] no Documento Técnico da FAO, bem como [9], desta forma, para maiores detalhes o leitor pode buscar pelas referências.

A geração de CO₂ em mg/L, denominada por $L(t)$, é determinada através da equação (1):

$$L(t) = L_{\infty} [1 - \exp(-K(t - t_0))] \quad (1)$$

onde:

- L_{∞} $\equiv$ o valor assintótico e
- K $\equiv$ a taxa de geração de CO₂ por dia.
- t $\equiv$ tempo em dias

Após manipulações algébricas, escreve-se a equação (2), utilizada no processo de modelagem Ford-Walford.

$$L(t + \Delta t) = a + bL(t) \quad (2)$$

onde:

- $a = L_{\infty}(1 - b)$ e
- $b = \exp(-K\Delta t)$.

Escrevendo-se L_{∞} e K em termos a e b , tem-se, respectivamente:

$$K = -\frac{1}{\Delta t} \ln b, \quad L_{\infty} = \frac{a}{1 - b} \quad (3)$$

De acordo com [9], precede-se com os termos a e b , adicionando-se a coluna y_{i+1} à Tabela 1, equivalente ao termo $L(t + \Delta t)$ descrita em (2).

Desta forma, tomando-se os valores y e y_{i+1} , define-se a linha de tendência linear, dada por: $y = 1,0101x + 2,742$, apresentada na Figura 3.

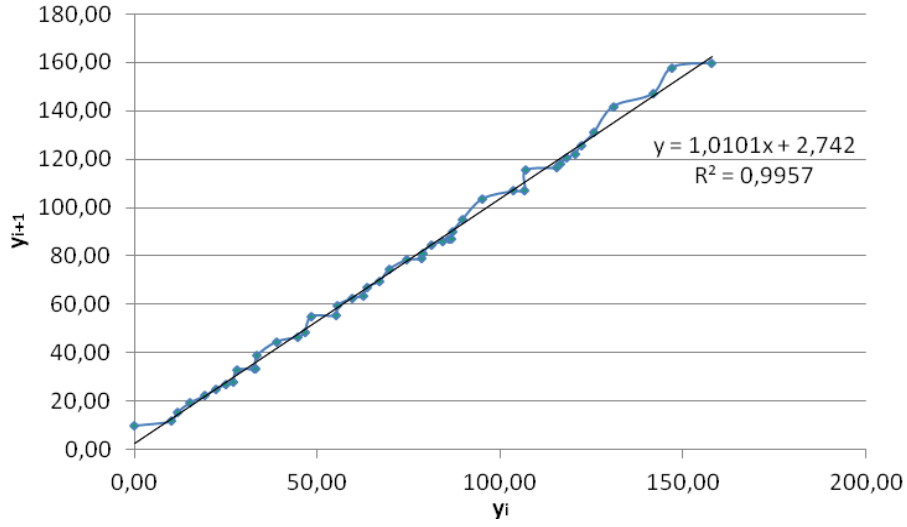


Figura 3. Gráfico $y_{i+1} \times y_i$, plotado para obtenção da linha de tendência.

Comparando a função obtida $y_{i+1} = 1,0101y + 2,742$ com a equação (2), encontram-se os termos a e b , sendo $a = 2,742$ e $b = 1,0101$.

A partir destes valores é possível determinar os valores de L_∞ e de K , com $\Delta t = 1$, tem-se que:

$$K = -\frac{1}{1} \ln 1,0101 \quad (4)$$

$$L_\infty = \frac{2,742}{1 - 1,0101} \quad (5)$$

Assim, tem-se $|K| = 0,010049$, $|L_\infty| = 271,4851$, e $b > 1$.

2 Resultados e Discussão

De acordo com dados apresentados na Tabela 1, $t_0 = 0$. Ao substituir os valores obtidos L_∞ , K e t_0 na equação (1), obtém-se a função que modela o fenômeno:

$$L(t) = 271,4851[1 - \exp(-0,010049t)] \quad (6)$$

Desta forma, tem-se a Figura 4 que confronta os dados apresentados na Tabela 1 com os valores obtidos a partir do modelo construído, dado pela equação (6).

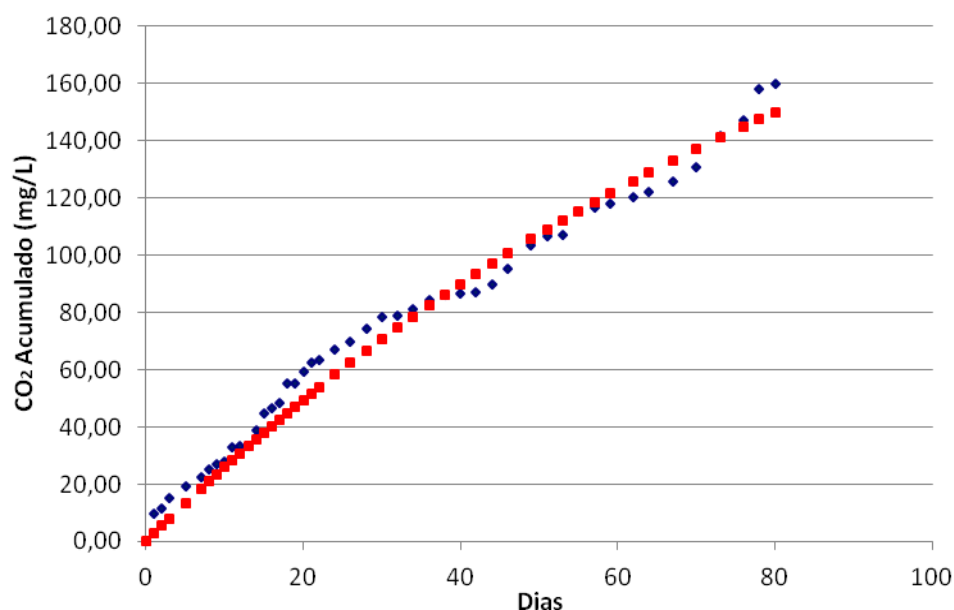


Figura 4. Comparação entre os dados Práticos (em azul) e Teóricos (vermelho).

O modelo apresentado figura qualitativamente os dados obtidos nas medições laboratoriais e indica o comportamento assintótico dos dados, com limite de aproximadamente 271,4851 mg/L.

Vale ressaltar que a última avaliação realizada em laboratório, com 80 dias de atividade microbiana no solo, indicou a geração de 159,77 mg/L de CO₂, com aspecto crescente ainda, porém já inibido.

De acordo com o modelo construído, seriam necessários aproximadamente 100 dias de avaliação do experimento para se verificar o comportamento estabilizado da geração de CO₂.

Discussões realizadas com o grupo que realizou a pesquisa de campo indicaram que o comportamento teórico, o modelo, é satisfatório, pois os valores obtidos estavam próximos dos valores medidos a partir das análises laboratoriais realizadas. Assim, avalia-se, qualitativamente, o método Ford-Walford como um procedimento eficiente de modelagem matemática para o referido caso, que, como sabido teoricamente, apresentava um comportamento assintótico.

3 Conclusão

O intuito deste trabalho foi o de desenvolver a modelagem matemática de um conjunto de dados que apresentam a geração de CO₂ por microrganismos num processo de biorremediação, método que consiste em recuperar áreas degradadas.

Para a modelagem utilizou-se o método Ford-Walford, o qual possibilitou a construção do modelo, bem como o estabelecimento de um valor assintótico, ressaltando que a geração de CO₂ diminui a medida que também diminui a quantidade de compostos na amostra.

Desta forma, conclui-se que o método representou o conjunto de dados satisfatoriamente, tendo-se em vista avaliações qualitativas a respeito do comportamento do fenômeno.

Referências

- [1] POLETTI, E. C. C.; MEYER, J. F. C. A.; CONEGLIAN, C. M. R.. Dispersão de infecção por *Toxoplasma gondii*: modelagem matemática e simulação numérica. In: *Biomatemática*. v. 20, p. 37 – 46, 2010.
- [2] POLETTI, E. C. C.; MEYER, J. F. C. A.. Dispersão de poluentes em sistema de reservatório: modelagem matemática via lógica fuzzy e aproximação numérica. In: *Biomatemática*. v. 19, p. 57 – 68, 2009.
- [3] INFORZATO, N. F. *Dispersão de poluentes num sistema ar-água: modelagem matemática, aproximação numérica e simulação computacional*. 2008. 109 f. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Gráfica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [4] MEYER, J. F. C. A. & DINIZ, G.. Pollutant dispersion in wetland systems: Mathematical modelling and numerical simulation. In: *Ecological Modelling*, n.200, p. 360 – 370, 2007.
- [5] CONEGLIAN, C. M. R.; SIVIERO, A. R.; POLETTI, E. C. C.; VENDEMIATI, J. A. de S.; DRAGONI, G. S.; RIBEIRO, M. S.; ANGELIS, D. F.; FURLAN, L. T.; GONÇALVES, R. A.. Avaliação da Biodegradação no solo de Resíduos Gerados em refinaria de Petróleo. In: *HOLOS Environment (Online)*. v. 6, n. 2, p. 106 - 117, 2006.

- [6] NUVOLARI, A.. *Aplicação de Lodo de Esgotos Municipais no Solo: ensaios de respirometria para avaliar a estabilidade do lodo*. 1996. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [7] MARIANO, A. P.. *Avaliação do Potencial de Biorremediação de Solos e de Águas Subterrâneas Contaminados com Óleo Diesel*. 2006. 147 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- [8] SPARRE, P. & VENEMA, S. C.. Introdução à avaliação de mananciais de peixes tropicais. Parte I: Manual. *FAO Documento Técnico sobre as Pescas*. Roma, FAO, n. 306/1, p. 47 – 66, 1997.
- [9] BASSANEZI, R. C.. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia*. São Paulo: Contexto, 2002.