

# USO DE MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL PESADO E DE CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB ADUBAÇÃO DE COMPOSTO DE LIXO URBANO

## **Fábio César da SILVA**

Pesquisador, Embrapa /CNPTIA/Campinas-SP.  
E-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br

## **Laércio Luis VENDITE**

Professor doutor, UNICAMP/IMECC/ Campinas- SP.  
E-mail: vendite@ime.unicamp.br

## **Alessandra Fabíola BERGAMASCO**

Bolsista Fapesp, Zootecnista, Embrapa /CNPTIA.  
E-mail: afb@cnptia.embrapa.br

## **1. RESUMO**

A pesquisa aborda o manejo de composto de lixo na cana-de-açúcar como fertilizante alternativo e como solução social e ambiental ao acúmulo de resíduos, utilizando-se 2 modelos matemáticos para apoio à decisão, visando o estabelecimento de critérios e procedimentos para seu uso, limitado pela quantidade de metais pesados e riscos ambientais existente. Primeiro foi construído um Modelo Compartimental, inédito, que descreveu a transferência de metais pesados no sistema solo-raiz-parte aérea da cana, demonstrando que o metal mais preocupante é o Ni, pois demora aproximadamente 3 anos para ser atenuado no solo e chegou em maior quantidade na parte aérea, e quanto aos fatores argila, óxidos e pH do solo, notou-se que nos solos de maior poder tampão, a passagem da maioria dos metais foi mais lenta, cujas conclusões foram obtidas a partir de softwares de simulação onde foram testados os modelos. O Modelo de Crescimento de Índice de Área Foliar foi retirado da literatura e adaptado à esse estudo de cana-de-açúcar adubada com CL, através do ajuste não linear pelo software SAS, posterior simulação e validação, demonstrando um ponto máximo de crescimento próximo aos 180 dias, e não diferenciação no crescimento com as diferentes dosagens de CL adicionadas.

### ***Palavras-chave***

Composto de lixo, Cana-de-açúcar, Modelo matemático, Meio ambiente

## **2. INTRODUÇÃO**

Os lixos urbanos, causam diversos prejuízos à população e ao meio ambiente, tornando-se um problema governamental, que está se agravando devido ao crescimento populacional e a rápida urbanização. Uma maneira de solucionar esse problema é através da compostagem do lixo domiciliar, do qual origina-se o composto de lixo (CL), sendo o uso na agricultura a melhor opção para sua disposição final, como fertilizante e/ou condicionador das propriedades físicas do solo, pois estes são fontes de nutrientes e de matéria orgânica. Mas devemos estar

atentos para o fato de que este CL pode vincular metais pesados, fator limitante de seu uso, pois podem entrar gradualmente e acumular-se na cadeia alimentar chegando até ao homem (Kabata - Pendias & Pendias, 1986).

A informatização de processos de suporte à decisões sobre o uso do CL nas diversas culturas e, em especial, pelo emprego de Modelos Matemáticos em cana-de-açúcar, podem minimizar riscos ambientais, os custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade do planejamento agrícola, sem prejudicar o ambiente. Isso ocorre porque os modelos permitem visualizar, por simulação numérica, as melhores opções de taxas, áreas e de uso do composto sobre a produtividade.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados 3 experimentos com cana-de-açúcar adubando-a com CL, sendo 2 em condições controladas e 1 em campo, e em todos eles, os solos foram separados em classes de acordo com os teores de óxidos de Fe e Al, teor de argila e pH, com objetivo do estudo da interferência desses fatores nas concentrações de metais pesados e simular modelos dentro de variáveis homogêneas.

O experimento 1 estudou a disponibilidade de metais pesados no tempo incubando-se CL (0, 25, 50 e 100 T/ha), em 5 períodos (0, 16, 32, 64 e 100 dias). O Experimento 2 estudou a dinâmica de metais pesados no sistema solo-planta incubando-se CL enriquecido com 5 níveis de metais pesados. O Experimento 3 estudou o desenvolvimento da cana-de-açúcar sob adubação de CL + PK.

#### 3.1. MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE METAL PESADO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

Na modelagem matemática do sistema solo-planta, foi construído um modelo de transferência de metais pesados, com base nos modelos compartimentais (Bassanezi & Ferreira, 1988), para o qual foi necessário a criação de hipóteses suplementares em relação as taxas de passagem do metal pesado pelos compartimentos, os quais foram: o solo, a raiz e a parte aérea (colmos + folhas). Considerou-se um simples modelo determinístico de equações diferenciais lineares para descrever a dinâmica da disponibilidade de cada metal (Cd, Cu, Ni e Pb) no solo e o grau de absorção desse metal pela raiz:

$$dM_1/dt = -\lambda.M_1 - \alpha.M_1$$

$$dM_2/dt = + \alpha.M_1 - \beta.M_1$$

$$dM_3/dt = + \beta.M_1$$

M → Fonte de metal pesado (Composto de lixo)

M<sub>1</sub> → concentração do metal pesado no solo no instante t;

M<sub>2</sub> → concentração do metal pesado na raiz no instante t;

M<sub>3</sub> → concentração do metal pesado na parte aérea da cana-de-açúcar no instante t;

λ → velocidade do decaimento do metal pesado (taxa constante);

α → taxa de translocação do metal do solo para a raiz (taxa de absorção da raiz);

β → taxa de translocação do metal da raiz à parte aérea.

E com a seguintes condições iniciais:

$$M_1(0) = C, M_2(0) = 0, M_3(0) = 0, C = \text{Quantidade do metal no CL, mg/kg}$$

**Solução 1:**  $M_1(t) = C \cdot e^{-(\lambda+\alpha)t}$

**Solução 2:**  $M_2(t) = \frac{\alpha \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot [e^{-(\lambda+\alpha)t} - e^{-\beta \cdot t}]$

**Solução 3:**  $M_3(t) = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\beta} \right) e^{-\beta \cdot t} - \left( \frac{1}{\lambda} + \alpha \right) e^{-(\lambda+\alpha)t} \right] + \frac{\alpha \cdot C}{\lambda + \alpha}$

Para estimativa dos parâmetros do modelo ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\lambda$ ) foram utilizados os dados reais obtidos nos experimentos 1 e 2, realizado-se um ajuste pelo SAS. Os valores iniciais necessários à convergência dos parâmetros foram obtidos através do parâmetro  $b$  do modelo linear:  $X=M_1$  e  $Y=M_2$ , indicando a taxa de passagem do metal do solo para a raiz, e o valor de  $b$  do modelo linear:  $X=M_2$  e  $Y=M_3$ , indicando a taxa de passagem do metal da raiz à parte aérea da cana, cujos valores são, respectivamente,  $\alpha$  e  $\beta$  do modelo. Quanto ao parâmetro “ $\lambda$ ”, este valor inicial foi conseguido através do Experimento 1, com modelos lineares:  $Y = \text{teor de metal no solo}$  e  $X = \text{tempo de incubação do metal no solo}$ , cujo valor “ $b$ ” deste modelo linear indica a taxa de decaimento do metal no solo. Como primeiro passo foram determinados valores para  $\lambda + \alpha$ , através da Solução 1:

$$M_1(t) = C \cdot e^{-(\lambda+\alpha)t} \longrightarrow \lambda + \alpha = \chi \longrightarrow \chi = \frac{(\ln(C) - \ln(M_1))}{t}$$

Após obtidos os valores de  $X$ , chegou-se a um modelo de  $M_3$  em função da variável  $M_2$  (Solução 4), para estimativa do parâmetro  $\alpha$ ; e para estimativa de  $\beta$ , resolveu-se a equação de  $M_2$  (solução 5):

**Solução 4:**  $M_3 = \left( \frac{\alpha \cdot C}{\lambda + \alpha} \right) (1 - e^{-(\lambda+\alpha)t}) - M_2$

**Solução 5:**  $M_2(t) = \frac{\alpha \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot [e^{-(\lambda+\alpha)t} - e^{-\beta \cdot t}] \rightarrow \beta = \frac{(\lambda + \alpha) \cdot M_2 + \alpha \cdot C \cdot e^{-(\lambda+\alpha)t}}{M_2 + \alpha \cdot C \cdot t}$

### 3.2. MODELO DE CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADA COM CL

A variável de crescimento ajustada, foi o índice de área foliar (IAF), que é um ótimo indicativo de crescimento e produtividade da cana-de-açúcar, pois após a germinação inicia-se o desenvolvimento das folhas, que são as responsáveis diretas pela

transformação da energia solar em energia química através da fotossíntese (Barbieri, 1993).

A determinação do IAF foi realizada para cada tratamento através da equação:

$$IAF (m^2/m^2) = \text{área foliar de uma cana } (m^2) * \text{perfilhos } (m^2)$$

$$AF = (\text{área da amostra} * \text{peso total das folhas}) / \text{peso de uma amostra}$$

Com os dados de temperatura máxima e mínima calculou-se os valores de graus-dia para cada período de 24 horas, pelas seguintes equações (Inman-Bamber, 1993):

- Para  $T_m > T_b$ :  $GD = ((T_{máx} + T_m)/2) - T_b$

Para  $T_m \leq T_b$ :  $GD = (T_{máx} - T_b)^2 / (2 * (T_{máx} - T_m))$ ,

Sendo: GD = graus-dia;  $T_{máx}$  = temperatura máxima;  $T_m$  = temperatura mínima;  $T_b$  = temperatura base

A equação do modelo aqui proposto é:  $IAF = e^a * (\Sigma GD)^b * e^{c * \Sigma GD}$

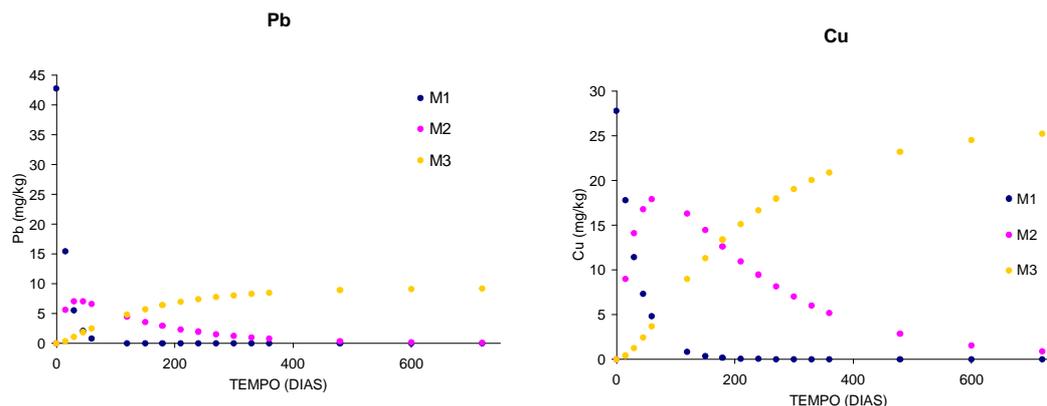
Onde, IAF = Índice de área foliar ( $m^2/m^2$ );  $a$ ,  $b$  e  $c$  = parâmetros do modelo;  $\Sigma GD$  = somatório de graus-dia

Esse modelo foi ajustado utilizando-se o procedimento não linear do SAS, fornecendo-se valores dos IAF (Experimento 3) para cada somatório de graus-dia, resultando em valores de parâmetros para cada um dos 16 tratamentos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE METAL PESADO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

Com os valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\lambda$ , foram realizadas simulações para determinação de valores preditos de  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$  em várias épocas (t), para estimativa do comportamento do metal pesado no tempo (Figura 1).



**Figura 1.** Modelo compartimental de transferência de metal pesado no sistema solo planta para os metais Chumbo e Cromio, em solos A, sob adubação do nível 1 de CL.

**Primeiro Ponto Crítico:** Extinção de  $M_1$ , quando  $t \rightarrow \infty$   $M_1 \rightarrow 0$

A curva para os teores de Pb nos solos A possui uma rápida queda, chegando a extinção antes de 200 dias após ser adubado, e nos solos da classe B, essa queda é mais lenta, ficando entre 200 dias e 1 ano. O metal Ni, possui uma queda acentuada apenas quando o solo é adubado com nível 1, chegando este teor a extinção no compartimento solo antes de um ano após a adubação, enquanto que nos outros níveis, esse tempo ultrapassa os 3 anos, assim como o Cd. Para o Cu, a queda de  $M_1$  foi mais lenta quando utilizado o nível 5 nos solos classe B, chegando a zero próximo de 600 dias.

**Segundo Ponto Crítico:** Ponto máximo de  $M_2$

O tempo onde ocorre o maior valor de metal na raiz da planta é dado por:  $t^* = \frac{\ln\left(\frac{\beta}{\lambda + \alpha}\right)}{-\beta + \alpha + \lambda}$

Quanto ao teor de Pb, o ponto máximo ocorre em média, aos 49 dias após a adubação para os solos da classe A e aos 60 dias para os solos classe B. Para o Ni, os solos B mostraram um crescimento mais lento de metal na raiz, sendo que o ponto máximo ocorreu, em média, aos 234 dias e nos solos A, 128 dias. Também para o metal Cd, os solos B mostraram um crescimento mais lento. Nos níveis 1 ocorre uma maior velocidade de transferência de Cd para a raiz, chegando ao ponto máximo em 48 dias nos solos A e 85 nos solos B, e em todos os casos,  $M_2$  só chega a 0 após aproximadamente 2 anos, então, ao final do ciclo de cana de ano e meio, ainda existiria metal disponível para a parte aérea.

**Terceiro Ponto Crítico:** Ponto em que  $M_3$  se estabiliza

$M_3 \Rightarrow$  é crescente e se estabiliza em  $\frac{\alpha.C}{\lambda + \alpha}$  Quando:  $t \rightarrow \infty$   $M_3 \rightarrow \frac{\alpha.C}{\lambda + \alpha}$

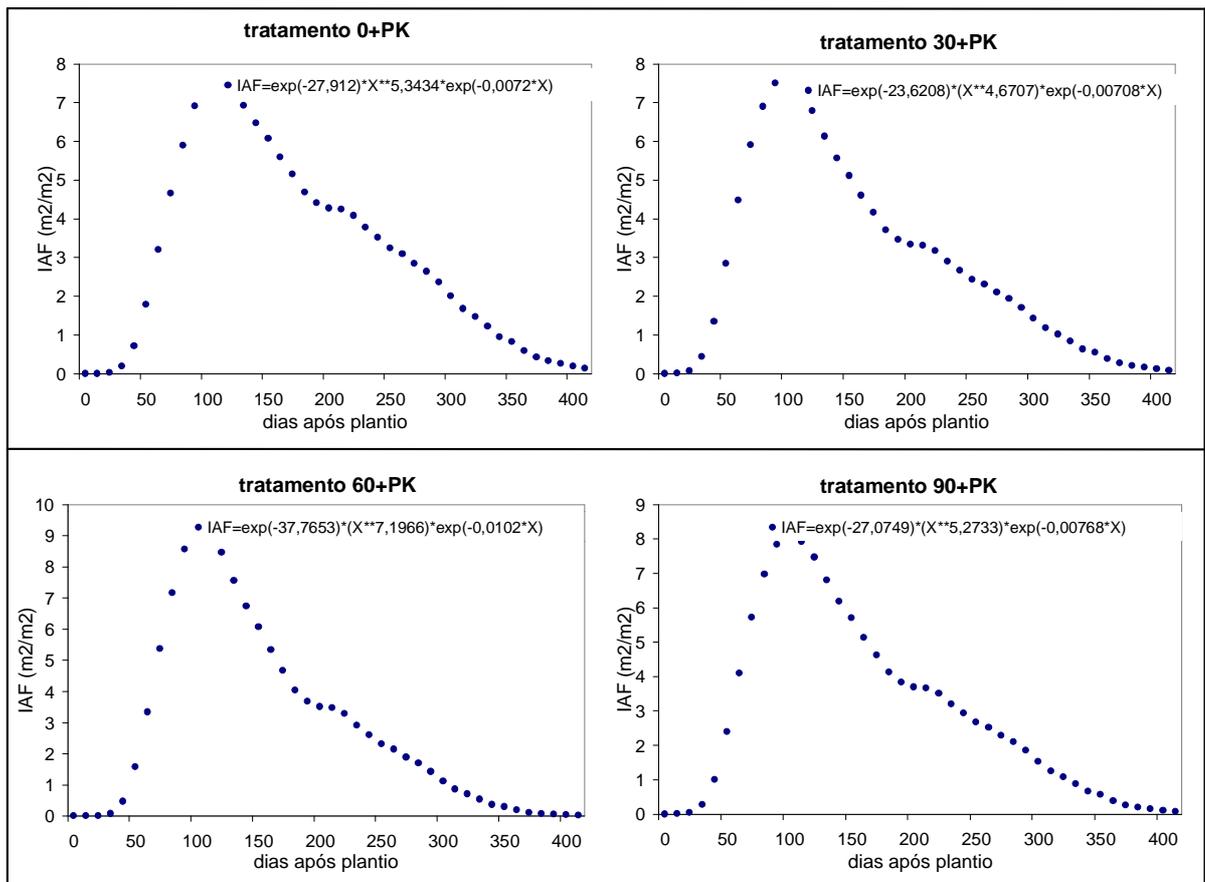
Entre os níveis de Pb adicionado ao CL e utilizados como adubos, não foram encontradas diferenças significativas através dos modelos quanto ao comportamento deste metal na parte aérea da cana-de-açúcar, cujo teor cresce com o aumento desse e em todos eles, quando a cana completa um ano de idade, o teor de Pb na parte aérea ( $M_3$ ), já está praticamente estabilizado. Já no Ni, quando aplicado o nível 1, o crescimento de  $M_3$  é rápido, se estabilizando próximo a 400 dias, isto é, quando está no momento de corte. A quantidade de Cd na parte aérea da cana, nos níveis 1 dos

solos A e B, foi bem baixo, , nos níveis 2 do solo A, e 4 e 5 dos solos B, esse teor na parte aérea chega a 99% de C. O teor de Cu na parte aérea é preocupante, pois ele se estabiliza próximo a 99% do teor adicionado, e o cuidado deve ser maior ainda, pois esse compartimento atinge esses altos teores, próximo aos 365 dias, que é a época de corte da cana-de-açúcar.

## 4.2. MODELO DE CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB ADUBAÇÃO DE CL

Os modelos de crescimento da cana-de-açúcar, com o valor dos parâmetros obtidos para cada tratamento foram simulados e estão demonstrados na Figura 2 abaixo.

O vigor vegetativo mais elevado foi encontrado em cana adubada com CL suplementado com PK e nas dosagens de 0 e 60 t/há, com o IAF atingindo valores entre 7,5 e 9,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, sendo que, com um somatório de menos de 400 GD já ocorreu um IAF maior que 4, o suficiente para interceptar pelo menos 95% da radiação solar e o IAF se mantém maior que 4 por um maior período (maior que 250 dias) na cana sem aplicação de CL, apenas PK. O IAF máximo atingido foi mais precoce na cana que recebeu tratamento com CL e com alguma suplementação, ficando esse ponto máximo em torno dos 90 dias (aproximadamente 600 GD).



**Figura 2.** Modelo de crescimento da cana-de-açúcar para os tratamentos de 0, 30, 60 e 90 t/há de CL suplementados com PK

## 5. CONCLUSÕES

- Quanto ao teor de metal no solo, o mais preocupante é o Ni, pois, com exceção do nível 1, demora aproximadamente 3 anos para este teor ser extinto do solo (atingindo assim a cana soca), e o que possui decaimento mais rápido é o Chumbo;
- Quanto ao teor na raiz, o Cobre é o que apresenta maior ponto máximo, mas o que atinge esse ponto mais rápido é o Pb, e o que demora mais a atingi-lo é, também, o Ni;
- Na parte aérea, o metal que chegou em maior quantidade foi o Ni, e por último o Pb, mas o metal que mostrou o crescimento mais acentuado foi o Pb, chegando próximo a seu máximo antes do momento de corte da cana, quando analisado o modelo matemático;
- Quanto a interferência dos teores de argila, óxidos e pH do solo na transferência desses metais no sistema, notou-se que nos solos classificados como B, com maior poder tampão, a passagem da maioria dos metais pelos compartimentos foi mais lenta, assim como a queda de seus teores no solo e na raiz.
- O vigor vegetativo mais elevado foi encontrado em cana adubada com CL suplementado com PK e nas dosagens de 0 e 60 t/ha.
- O IAF máximo atingido foi mais tardio na cana que recebeu tratamento com CL sem suplementação mineral, ficando esse ponto por volta de 120 dias (aproximadamente 800 GD).
- Os modelos matemáticos aqui descritos podem servir como base à formulação de normas de uso do CL, podendo estimar quantidades de cada metal em cada parte da planta nos diversos cenários estudados e prever o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIERI, V. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Piracicaba/SP, 1993. 142p. Tese (Doutorado) – ESALQ.
- BASSANEZI, R. C. & FERREIRA, W. C. Jr. Equações Diferenciais com aplicações. Ed. Harbra, 1988. 572 p.
- INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crops Research*, 36:41-51. 1993.
- KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, CRC Press, 1986. 315 p