



## Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias

<http://rccp.udea.edu.co>

RCCP

### Estimación de la degradabilidad efectiva en el rumen mediante métodos numéricos <sup>□</sup>

*Estimation of effective degradability in rumen through numeric methods*

*Estimação da degradabilidade efetiva no rúmen mediante métodos numéricos*

Héctor J Correa Cardona<sup>1\*</sup>, Zoot, MSc.

<sup>1</sup>Departamento de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín.

(Recibido: 15 noviembre, 2007; aceptado: 22 enero, 2008)

#### Resumen

*La estimación correcta de la degradabilidad ruminal efectiva en el rumen (DE) de las distintas fracciones nutricionales de los alimentos es fundamental para el desarrollo de programas eficientes de alimentación para rumiantes. La propuesta clásica para estimar la degradabilidad efectiva en el rumen de la fracción potencialmente degradable ( $DEb = bKd / (Kd + Kp)$ ), sin embargo, no es correcta ya que se basa en la presunción de que las constantes de la cinética de la degradabilidad (Kd) y del pasaje ruminal (Kp) representan la velocidad de fermentación y de pasaje ruminal, respectivamente, cuando estas realmente representan la relación constante entre la aceleración y la velocidad de degradación y de pasaje. Se propone, entonces, una nueva propuesta coherente con las bases matemáticas de la cinética de la degradación y el pasaje ruminal de la fracción potencialmente degradable en el rumen (b) que requiere el uso de métodos numéricos para despejar el tiempo "t" de la expresión  $1 = e^{-kd^*t} + e^{-kp^*t}$ , que al reemplazarlo en la expresión  $b^*e^{-kd^*t}$ , permite calcular la DEb. La estimación de la DEb por este método permite obtener datos confiables y coherentes con las bases matemáticas de la cinética de la degradación y el pasaje ruminal de las fracciones nutricionales.*

**Palabras clave:** cinética ruminal, degradabilidad efectiva, modelos matemáticos.

#### Summary

*In order to develop efficient feeding programs for ruminants, it is required to make a correct estimation of the effective ruminal degradability (ED) of the nutritional fractions. The classical calculation of ED ( $DEb = bKd / (Kd + Kp)$ ) lacks precision, because it erroneously assumes that the kinetic constants Kd and Kp represent fermentation velocity and velocity of passage through the rumen, respectively. In reality, Kd actually represents the constant relationship between acceleration and degradation velocity, while Kp represents the relationship between acceleration and velocity of passage. Considering this information,*

□ Para citar este artículo: Correa Cardona HJ. Estimación de la degradabilidad efectiva en el rumen mediante métodos numéricos. Rev Colomb Cienc Pecu 2009; 22:19-24.

\* Autor para correspondencia: Calle 59A No 63 - 20, Bloque 50, oficina 323. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Email: [hjcorreac@unal.edu.co](mailto:hjcorreac@unal.edu.co)

*a new proposal is being presented that takes into account the correct mathematical interpretation of the ruminal degradation and passage kinetics.*

**Key words:** *effective degradability, mathematical models, rumen kinetics.*

### Resumo

*A estimação confiável da degradabilidade efetiva no rúmen (DE) das diferentes frações nutricionais dos alimentos é fundamental para o desenvolvimento de programas eficientes de alimentação para ruminantes. A proposta clássica para estimar a degradabilidade efetiva no rúmen da fração potencialmente degradável ( $DEb = bKd/(Kd + Kp)$ ), embora não seja corretíssima, já que baseia-se na presunção de que as constantes de cinética de degradabilidade ( $Kd$ ) e da passagem ruminal ( $Kp$ ) representam a velocidade de fermentação e a passagem ruminal, respectivamente, quando estas realmente representam a relação constante entre a aceleração e a velocidade de degradação e de passagem. Neste trabalho se apresenta uma nova proposta coerente com as bases matemáticas da cinética da degradação e da passagem ruminal da fração potencialmente degradável no rúmen ( $b$ ) que necessita o uso de métodos numéricos para despejar o tempo "t" da expressão  $I = e^{-kd*t} + e^{-kp*t}$ , onde a expressão  $b*e^{-kd*t}$ , permite calcular a DEb. A estimação da DEb por este método permite obter dados confiáveis e coerentes com as bases matemáticas da cinética da degradação e a passagem ruminal das frações nutricionais.*

**Palavras chave:** *cinética ruminal, degradabilidade efetiva, modelos matemáticos.*

### Introducción

La estimación de la degradabilidad efectiva (DE) de la fracción potencialmente degradable en el rumen ( $b$ ) (DEb) es quizá el cálculo más importante en el estudio de la cinética ruminal de los alimentos dado que permite establecer la proporción de fracciones nutricionales que son degradadas y aquellas que escapan a la degradación ruminal (1, 8, 9). La estimación correcta de este parámetro es necesaria para un adecuado manejo nutricional de los rumiantes y, en consecuencia, para una mejor utilización de los nutrientes (1).

Ørskov y McDonald (9) describieron un modelo exponencial no lineal para estimar la degradabilidad ruminal de los nutrientes en función del tiempo de permanencia en el rumen, con base en datos obtenidos por la técnica de degradación *in situ* de donde se obtiene que:  $DRbt = b*(1 - e^{-kd*t})$ , donde DRbt es la degradabilidad ruminal de la fracción  $b$  en el tiempo  $t$ ,  $b$  es la fracción potencialmente degradable en el rumen,  $e$  es la base neperiana,  $kd$  es una constante y  $t$  es el tiempo de permanencia en el rumen. Grovum y Williams (6), por su parte, propusieron un modelo exponencial similar para estimar el pasaje ruminal de la fracción  $b$  en el tiempo  $t$  ( $PRbt = b*(1 - e^{-kp*t})$ ) que incluye la estimación de la constante  $kp$  cuyas características matemáticas son similares a las de la  $kd$ .

La  $kd$  y la  $kp$  fueron incorporadas por Ørskov y McDonald (9) en una ecuación aritmética para estimar la DEb que es correcta en el caso en el que estas constantes hagan referencia a velocidades. Sin embargo, recientemente fue demostrado que estas constantes no hacen referencia a la velocidad si no al cociente entre la aceleración y la velocidad de degradación y de pasaje (3), respectivamente. La interpretación matemática de la  $kd$  en el modelo de Ørskov y McDonald (6), es (3):

dada la ecuación  $DRbt = b*(1 - e^{-kd*t})$ ,

al calcular la primera derivada, se tiene,

$$DRbt' = kd*b*e^{-kd*t} = v = \text{velocidad}$$

y al calcular la segunda derivada, se tiene,

$$DRbt'' = -kd^2*b*e^{-kd*t} = a = \text{aceleración};$$

con lo que,

$$DRbt''/DRbt' = (-kd^2*b*e^{-kd*t})/(kd*b*e^{-kd*t}) = a/b = -kd,$$

que corresponde al cociente entre la aceleración y la velocidad de degradación denominándose correctamente, como constante de la cinética de

degradación ruminal (3). Esta demostración es similar para la  $k_p$  en el modelo de Grovum y Williams (6).

El objetivo de este trabajo fue demostrar que las bases matemáticas de la ecuación aritmética propuesta por Ørskov y McDonald (9) para estimar la DEb son incorrectas. Así mismo, fue objetivo de este trabajo proponer un nuevo modelo para estimar la DEb coherente con las bases matemáticas de los modelos exponenciales de Ørskov y McDonald (9) y el de Grovum y Williams (6), para estimar la DRbt y el pasaje ruminal (PRbt), respectivamente.

La estimación clásica de la degradabilidad ruminal efectiva.

Ørskov y McDonald (9) propusieron que la DEb podía ser estimada a partir de la expresión

$$DEb = b \cdot kd / (kd + kp), \quad (A)$$

en la que tanto la  $kd$  como la  $k_p$  hacen referencia, de manera errónea, a las velocidades de degradación y de pasaje ruminal, respectivamente, como se demuestra a continuación.

Cuando la velocidad es constante, el espacio ( $s$ ) recorrido puede calcularse como:

$$s = v \cdot t, \quad (B)$$

Si en esta expresión el espacio  $s$  es reemplazado por la DRbt y la velocidad  $v$  es reemplazado por la  $kd$  (asumiendo que se trata de la velocidad de degradación), la degradación ruminal de la fracción  $b$  (DRbt) en cualquier tiempo se podría estimar como:

$$DRbt = kd \cdot t, \quad (C)$$

y si la  $k_p$  expresa la velocidad de pasaje, el pasaje ruminal de la fracción  $b$  (PRbt) en cualquier tiempo se podría estimar como:

$$PRbt = k_p \cdot t \quad (D)$$

Dado que la degradación y el pasaje ruminal son las únicas fuerzas responsables de la desaparición de la fracción  $b$  en el rumen, debe existir un tiempo tal en el que la suma de la degradación y del pasaje ruminal que se presenten a ese tiempo, hayan determinado la desaparición total de la fracción  $b$ .

Al despejar dicho tiempo en la expresión (C), es posible estimar la DEb. Así, al igualar la suma de las expresiones (C) y (D) a la fracción  $b$ , se tiene:

$$b = DRbt + PRbt = kd \cdot t + k_p \cdot t \quad (E)$$

Al despejar por el factor común, la expresión (E) queda como:

$$b = t \cdot (kd + k_p) \quad (F)$$

Al despejar  $t$  en esta expresión, se tiene:

$$t = b / (kd + k_p), \quad (G)$$

Que al reemplazar en la expresión (C) queda la expresión (A) indicando que esta ecuación tiene validez únicamente en el caso en el que las constantes  $kd$  y  $k_p$  hagan referencia a velocidades de degradación y de pasaje ruminal constantes. Dado que no es el caso de la cinética que siguen las fracciones nutricionales a su paso por el rumen como se demostró anteriormente (3), es de prever que los resultados obtenidos mediante tal propuesta sean erróneos y seguramente han sido una de las principales causas de la ausencia de respuesta a la suplementación con fracciones nutricionales que no se degradan en el rumen.

Una nueva propuesta para estimar la degradabilidad ruminal efectiva

Como fue demostrado previamente (3), la cinética de la degradación y de pasaje de las fracciones nutricionales en el rumen es similar a la de los cuerpos que se desplazan con una velocidad y aceleración variable y no a una velocidad constante. Por lo tanto, es necesario apelar a otro tipo de análisis para calcular la DEb.

Como se indicó anteriormente, la ecuación para estimar el pasaje ruminal de la fracción  $b$ , según Grovum y Williams (6), es:

$$PRbt = b \cdot (1 - e^{-k_p \cdot t}) \quad (H)$$

donde  $b$  y  $t$  ya fueron definidas y  $k_p$  corresponde a la constante de la cinética de pasaje ruminal.

Ahora, y dado que como se mencionó arriba, las únicas fuerzas que determinan la desaparición de la

fracción b desde el rumen son la degradación (DRbt) y el pasaje ruminal (PRbt), la suma de la desaparición de la fracción b a causa de estas dos fuerzas, es:

$$b = DRbt + PRbt, \quad (I)$$

o, lo que es lo mismo:

$$b = b \cdot e^{-kd \cdot t} + b \cdot e^{-kp \cdot t} \quad (J)$$

que resolviendo se obtiene:

$$b = b \cdot (e^{-kd \cdot t} + e^{-kp \cdot t})$$

$$1 = e^{-kd \cdot t} + e^{-kp \cdot t} \quad (K)$$

Al calcular t en esta expresión y reemplazarlo en la expresión  $DRbt = b \cdot (1 - \exp(-kd \cdot t))$ , se obtiene la DEb. Sin embargo, la expresión (K) es una expresión trascendente que no tiene solución algebraica para despejar el tiempo t. Gettys *et al* (5) afirman que a menudo resulta difícil resolver problemas cinemáticos en los que la aceleración no es constante y que solo en algunos casos especiales

es posible una solución analítica. Este no es el caso de la solución para la expresión (K), lo que exige tener que apelar a procedimientos numéricos. Aunque existen muchas alternativas, es posible estimar el t en el que esta expresión se cumple mediante programas como DERIVE (7) o la función SOLVER del programa Excel de Microsoft Office (2). Aunque es posible aplicar una solución gráfica, esta es menos precisa que la que se obtiene con el uso de programas de cómputo (5).

### Ejemplo ilustrativo

Para ilustrar la necesidad de calcular correctamente la DEb, se compararon los valores calculados con el modelo de Ørskov y McDonald (9) y aquellos obtenidos con el procedimiento que se propone en este documento utilizando los parámetros de cinética ruminal de la proteína cruda para dos muestras de pasto kikuyo (identificadas como kikuyo1 y kikuyo2), semilla de algodón y un suplemento comercial (véase Tabla 1) publicados por Galvis *et al* (4).

**Tabla 1.** Parámetros de cinética ruminal para la proteína cruda (PC) de los alimentos utilizados en el trabajo de Galvis *et al* (3).

Parámetros de cinética ruminal <sup>1</sup>	Kikuyo1	Kikuyo2	Semilla de algodón	Suplemento comercial
			% de la PC	
a	19.4	18.9	31.0	29.8
b	54.4	44.9	34.0	30.2
kd	0.067	0.057	0.122	0.108

Asumiendo que, la kp es de 0.05-h, los valores de DEb obtenidos con el modelo de Ørskov y McDonald (9) y aquellos obtenidos con el procedimiento que aquí se propone, utilizando la función SOLVER del programa Excel de Microsoft Office, se muestran en la tabla 2 (véase cálculo de la DEb mediante la función Solver del programa Excel de Microsoft Office).

Como se puede apreciar en la tabla 2, las DEb estimadas por el procedimiento propuesto aquí fueron entre 2.0 y 8.34% más bajas que las calculadas con el modelo de Ørskov y McDonald (9) indicando que, efectivamente, con este último modelo se cometen errores de estimación de la DEb que pueden alterar significativamente la valoración nutricional de alimentos para rumiantes.

**Tabla 2.** DEb calculadas con el modelo de Ørskov y McDonald (6) y aquellos obtenidos con el procedimiento que se propone en este documento.

Procedimiento	Kikuyo1	Kikuyo2	Semilla de algodón	Suplemento comercial
			% de la PC	
Ørskov y McDonald (6)	31.1	24.0	24.1	20.6
Propuesto	29.9	23.5	22.1	19.0
Diferencia, %	-3.83	-2	-8.34	-7.75

Cálculo de la DEb mediante la función Solver del programa Excel de Microsoft Office

En las casillas A1 hasta A7 de una hoja de Excel se colocan en orden las expresiones b, kd, kp, t, DEb, PEb y DEb + PEb (véase Figura 1)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	b	30.2						
2	kd	0.108						
3	kp	0.05						
4	t	9.22						
5	DEb	19.04						
6	PEb	11.16						
7	DEb+PEb	30.20						
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								

Figura 1. Hoja de Excel para calcular la DEb mediante la función SOLVER.

En las casillas B1, B2 y B3 se colocan los valores correspondientes a la fracción b, la constante kd y la constante kp, respectivamente (véase Figura 1 para el ejemplo del suplemento comercial). La casilla B4 corresponde al tiempo t que será calculado mediante la función Solver. En la casilla B5 se calcula la DEb colocando la expresión “=B1\*(1-EXP(-B2\*B4))” mientras que en la casilla B6 se calcula la PEb mediante la expresión “=B1\*(1-EXP(-B3\*B4))”. En la casilla B7 se suman los valores de las casillas B5 y B6 escribiendo la expresión “=B5+B6”.

A continuación se activa la función Solver. Para ello se debe abrir la opción Herramientas, buscar esta función y activarla. En caso de no estar instalada, es necesario abrir la función Complementos en Herramientas y buscar la función Solver e instalarla.

Una vez activada la función Solver, se escribe “\$B\$7” en la Celda objetivo y en Valores de la celda objetivo se activa la opción Valores de colocando el valor correspondiente a la fracción b, es decir, el mismo valor que se colocó en la casilla B1 (véase

Figura 1). Con estas instrucciones se le está ordenando a la función Solver que la suma de la DEb (casilla B5) y la PEb (casilla B6) sea igual a la fracción b. A continuación, en la opción Cambiando las celdas se escribe \$B\$4 y finalmente se activa la opción Resolver. Con estas últimas instrucciones se está pidiendo que cambie el valor de t en las ecuaciones para calcular DEb y PEb hasta que la suma de estos dos parámetros sea igual a la fracción b. Así, el valor hallado en la casilla B5 corresponde a la DEb.

### Conclusiones

Queda demostrado que el modelo de Ørskov y McDonald (9) para el cálculo de degradabilidad efectiva en el rumen de la fracción b (DEb) está basado en el supuesto de que las constantes de la cinética de degradación (kd) y de pasaje ruminal (kp) hacen referencia a velocidades de degradación y pasaje ruminal, respectivamente. Sin embargo, al haberse demostrado previamente que estas constantes realmente hacen referencia al cociente entre la aceleración y la velocidad de degradación y pasaje ruminal (3), queda explícito que el modelo

de Ørskov y McDonald (9) para el cálculo de la DEb es incorrecto. La propuesta aquí planteada para el cálculo de la DEb es coherente con las bases matemáticas de la cinética de la degradación y el pasaje ruminal de las fracciones nutricionales y, por lo tanto, permite obtener datos confiables de DEb.

### Referencias

1. Bach A, Stern MD, Merchen NR, Drackley JK. Evaluation of selected mathematical approaches to the kinetics of protein degradation in situ. *J Anim Sci* 1998; 76:2885-2893.
2. Correa HJ. Rumenal: procedimiento para estimar los parámetros de cinética ruminal mediante la función Solver de Microsoft Excel®. *Rev Col Cienc Pec* 2004; 17:250-254.
3. Correa HJ. Origin and comprehensive study of Thünen's model to analyze data from in situ rumen degradability technique. *Rev Col Cienc Pec* 2005; 18:80-87.
4. Galvis RD, Correa HJ, Ramírez NF. Interacciones entre el balance nutricional, los indicadores del metabolismo energético y proteico y las concentraciones plasmáticas de Insulina, e IGF-1 en vacas en lactancia temprana. *Rev Col Cienc Pec* 2003; 16:237-248.
5. Gettys WE, Keller FJ, Skove MJ. Física clásica y moderna. Madrid: McGraw-Hill; 1991.
6. Grovum WL, Williams VJ. Rate of passage of digesta in sheep. 4. Passage of marker through the alimentary tract and the biological relevance of rate constants derived from changes in concentration of marker in faeces. *British Journal of Nutrition* 1973; 30:313-329.
7. Kutzler B. Improving Mathematics Teaching with DERIVE: a guide for teachers. Lancashire, UK: Chartwell-Yorke; 1996.
8. National Research Council. The nutrient requirements of dairy cattle. 7th ed. Washington DC: National Academy Press; 2001.
9. Ørskov ER, McDonald I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *J Agr Sci* 1979; 92:499-503.

### Agradecimientos

A los profesores Fernando Puerta y Jorge Cossio (Departamento de Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín), por su orientación matemática.