

MODELOS MATEMÁTICOS PARA EVALUAR LA TASA DE DIGESTIÓN *in vitro* DEL ALMIDÓN^a

Germán David Mendoza Martínez^b
María Esther Ortega Cerrilla^b
Raúl Ricalde Velasco^c
José Antonio Martínez García^c

RESUMEN

Mendoza MGD, Ortega CME, Ricalde VR, Martínez GJA. *Téc Pecu Méx* 2000;38(1)51-65. El objetivo fue comparar varios modelos matemáticos para describir la tasa de digestión del almidón. Se analizó la información de la degradación ruminal del almidón de sorgo rolado, maíz rolado, maíz con alto contenido de humedad y trigo, proveniente de tres experimentos *in vitro*. Los modelos comparados con base en la suma de cuadrados de los residuales y a la interpretación biológica, fueron: el de cinética de primer orden (CPO), primer orden con fase de retraso (CPO-R) y con fracción indigestible (CPO-I), dos modelos compartamentales y el de cinética de saturación (CS). No se pudieron usar los modelos compartamentales. En términos generales los modelos investigados permiten detectar las diferencias en la tasa de digestión del almidón. El modelo de CS presentó los menores valores residuales, seguido por el de CPO. El modelo de CS estimó algunos parámetros sin significado biológico. La inclusión de la fase de retraso (CPO-R) o la fracción indigestible (CPO-I) presentaron mayores desviaciones. Se concluye que el modelo de cinética de primer orden es el más adecuado para describir la digestión ruminal del almidón.

PALABRAS CLAVE: Almidón, Tasa de digestión, Modelos matemáticos, Rumen.

Un modelo es una serie de suposiciones ordenadas, basadas en fenómenos observados que proveen alguna base para describir y entender un sistema⁽¹⁾. Los modelos matemáticos son ecuaciones que

describen ciertos fenómenos biológicos y pueden considerarse de varios tipos: empíricos, teóricos y mixtos. Para entender los procesos de digestión en el rumen, es importante la comprensión de ciertos modelos básicos dinámicos de digestión ruminal, los cuales se empezaron a desarrollar con forrajes⁽²⁾ y pueden ser aplicados en la digestión del almidón.

La digestión ruminal de la pared celular y sus fracciones (celulosa y hemicelulosa) puede ser descrita matemáticamente considerando varios componentes⁽³⁾. En el caso del almidón, los componentes más importantes son la tasa de digestión, la

a Recibido el 24 de marzo de 1999 y aceptado para su publicación el 16 de junio de 2000.

b Especialidad de Ganadería IREGEP. Colegio de Postgraduados Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo Edo. de México. Tel. 01(595)20200 ext. 1716 E-mail gmendoza@colpos.colpos.mx. Fax 01(595)20259. Correspondencia y solicitud de separatas.

c Departamento de Producción Agrícola y Animal. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco.

extensión de la digestión y la tasa de pasaje⁽⁴⁾.

Se ha sugerido que la tasa de digestión del almidón puede ser descrita por una cinética de primer orden⁽⁵⁾, con una tasa fraccional constante⁽⁶⁾; sin embargo, si consideramos que la estructura del almidón es compleja⁽⁷⁾, es posible que se puedan utilizar distintos modelos para describir su tasa de digestión. El objetivo de este trabajo fue el de comparar varios modelos matemáticos para describir la tasa de digestión del almidón.

Se utilizaron los resultados de la degradación ruminal del almidón de sorgo rolado, maíz rolado, maíz con alto contenido de humedad y trigo, de tres incubaciones *in vitro*, realizadas por Sindt⁽⁸⁾ quien estuvo caracterizando las diferencias de digestibilidad del almidón de los cuatro granos, para comparar varios modelos de digestión. Esta metodología de incubación consistió en el uso de inóculo colectado de dos novillos alimentados con una ración a base de grano (80% de la materia seca) aproximadamente 16 h post-alimentación, mezclando una cantidad semejante de líquido ruminal de cada animal y manteniendo en separadores (500 ml) gaseados con CO₂ a 39°C por 20 minutos. Posteriormente separó la fracción sedimentada y el líquido se combinó con saliva artificial McDougall con urea (1 g/litro) en una relación de 2:1. Las fermentaciones fueron detenidas con buffer acetato (1.0 molar) saturado con ácido benzoico, y la determinación de almidón se realizó con base en la concentración de glucosa al tratar los residuos con la enzima termoestable Termamyl y con amiloglucosidasa⁽⁹⁾.

Los resultados fueron analizados por regresión lineal⁽¹⁰⁾. Con excepción del modelo de cinética de saturación que es un modelo no lineal, a continuación se describen los modelos utilizados:

A) Modelo de cinética de primer orden

Para obtener los parámetros de este modelo se hace una regresión entre el tiempo y el logaritmo natural del porcentaje de almidón residual con la siguiente ecuación⁽¹¹⁾:

$$AR = -k t + R_0$$

donde:

- AR: logaritmo natural del porcentaje de almidón residual;
- k: pendiente, tasa de degradación;
- t: tiempo de incubación;
- R₀: almidón residual al tiempo cero.

B) Modelo de cinética de primer orden con fase de retraso

Este modelo es una modificación del anterior, al incluirse una fase de retraso, la cual se calcula de acuerdo al procedimiento descrito por Mertens y Loften⁽¹²⁾, y también se obtuvo por una regresión entre el tiempo y el logaritmo natural del porcentaje de almidón residual. El modelo se expresa con la ecuación⁽¹⁾:

$$AR = -k (t - L) + R_0$$

donde:

- AR: logaritmo natural del porcentaje de almidón residual;
- k: pendiente, tasa de degradación;
- t: tiempo de incubación;
- L: fase de retraso;
- R₀: almidón residual al tiempo cero;

C) Modelo de cinética de primer orden con fracción indigestible.

En este modelo se estima la fracción potencialmente digestible, la cual es determinada por la substracción de la fracción indigestible del total remanente en cada tiempo de fermentación⁽⁶⁾. Para el caso de almidón se consideró la fracción indigestible en el rumen como la cantidad de almidón presente a las 48 h de incubación *in vitro*. Los parámetros se estimaron con la siguiente ecuación:

$$AR = D e^{-k t} + U$$

donde:

- AR: porcentaje de almidón residual;
- D: almidón potencialmente digestible en el rumen;
- e: 2.718;
- k: pendiente, tasa de degradación;
- t: tiempo de incubación;
- U: almidón no degradado en el rumen.

D) Modelos compartamentales

Se consideró la posibilidad de que la digestión del almidón pudiera describirse con una fracción de rápida digestión (amilipectina), una de lenta (amilosa) y una fracción indigestible. Se usaron dos modelos de análisis compartamental con dos y tres compartimentos⁽¹³⁾ con las siguientes ecuaciones:

$$AR = D_1 e^{-k_1 t} + D_2 e^{-k_2 t}$$

$$AR = D_1 e^{-k_1 t} + D_2 e^{-k_2 t} + U$$

donde:

- AR: porcentaje de almidón residual;
- D₁: fracción de almidón rápidamente degradable;

e: 2.718;

-k₁: tasa de degradación de la fracción rápida;

D₂: fracción de almidón lentamente degradable;

-k₂: tasa de degradación de la fracción lenta;

t: tiempo de incubación;

U: almidón no degradado en el rumen.

Para probar estos modelos se siguieron los procedimientos usados por Nocek y English⁽¹¹⁾ para determinar la cinética de degradación de la fibra detergente neutro potencialmente digestible.

E) Modelo de cinética de saturación

Se utilizó el modelo de cinética de saturación desarrollado por Mercer *et al.*⁽¹⁴⁾ que se basa en la ecuación de Michaelis-Menten modificada por Hill⁽¹⁶⁾ con la adición del parámetro *n* (orden cinético de la reacción) con la siguiente ecuación:

$$DA = \frac{b (K_{.5})^n + D_{max} (T)^n}{(K_{.5})^n + (T)^n}$$

donde:

- DA = digestión de almidón, %;
- b = Intercepto sobre la ordenada (fase de retraso, h);
- K_{.5} = Tiempo requerido para alcanzar la mitad de la D_{max};
- D_{max} = Digestibilidad máxima teórica;
- T = Tiempo de incubación, h;
- n = Orden de cinética aparente.

Para estimar los parámetros del modelo se utilizó la metodología descrita por

Germán David Mendoza Martínez, *et al.*

Figura 1. Digestión *in vitro* del almidón de los granos

MODELOS MATEMATICOS PARA EVALUAR LA TASA DE DIGESTION *in vitro* DEL ALMIDON

Mercer⁽¹⁵⁾; que permite estimar los cambios de digestión en los distintos tiempos de incubación. Se obtuvo el coeficiente de determinación de cada modelo y se hizo una comparación entre los valores observados y predichos, con el objeto de poder calcular la suma de cuadrados residuales de los modelos.

En la Figura 1 se presentan los valores de digestión del almidón *in vitro* de tres incubaciones. En los Cuadros 1, 2 y 3 se presentan los parámetros estimados con los modelos estudiados por Sindt⁽⁸⁾. Las diferencias entre experimentos muestran la importancia de repetir los procesos de incubación en estudios *in vitro*, que aún bajo condiciones de estandarización de manejo de inóculo, dieta y animales, se manifiestan en la digestión de los granos.

En términos generales, podemos observar que los modelos permiten detectar las diferencias en la tasa de digestión de los granos. No se presenta ninguna información sobre los modelos compartamentales ya que en ningún caso los modelos describieron el evento observado.

El intercepto a tiempo cero en los primeros modelos de cinética de primer orden teóricamente debería ser 100%, sin embargo, hay una sobreestimación, la cual es mayor para los modelos con fase de retraso y fracción indigestible; esta sobreestimación se debe a que la fracción de retraso afecta la linealidad de la respuesta (Figura 2). El modelo de cinética de saturación también sobreestima la digestibilidad máxima por valores superiores al 100%.

Cuadro 1. Parámetros estimados con los distintos modelos de digestión de almidón (Incubación 1)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
Tasa de digestión, %/h	7.05	6.62	13.43	13.66
Intercepto ^a	122.00	113.50	152.20	144.90
R ²	.96	.94	.92	.96
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
Tasa de digestión, %/h	8.04	7.25	15.53	15.51
Intercepto ^a	144.92	126.64	218.94	199.89
Fase de retaso, h	2.14	1.51	2.34	2.07
R ²	.99	.94	.94	.99
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
Tasa de digestión, %/h	12.30	12.09	11.91	14.63
Intercepto ^a	116.41	102.35	127.58	139.11
R ²	.84	.88	.94	.94
<i>Cinética de saturación</i>				
n	2.67	5.34	3.42	2.83
K ₅ ^b	13.56	10.16	10.58	9.61
Dmax ^c	97.11	74.10	99.10	102.04
<i>Tasa de digestión, %/h</i>				
4 h	2.31	0.51	2.77	5.16
8 h	5.11	6.98	8.30	8.46
12 h	5.52	7.04	6.59	5.47
16 h	3.85	2.12	3.25	2.80
20 h	2.50	0.60	1.51	1.43
24 h	1.58	0.20	0.74	0.78

^a Expresado como % de almidón digestible residual.

^b K₅ = tiempo requerido para alcanzar la mitad de la digestibilidad máxima teórica.

^c Dmax = digestibilidad máxima teórica.

Cuadro 2. Parámetros estimados con los distintos modelos de digestión de almidón (Incubación 2)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
Tasa de digestión, %/h	6.64	11.50	12.00	12.30
Intercepto ^a	101.73	122.86	92.01	100.25
R ²	.99	.97	.99	.99
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
Tasa de digestión, %/h	6.50	12.50	11.60	12.40
Intercepto ^a	103.20	146.78	85.71	100.48
Fase de retraso, h	0.22	1.41	0.60	0.01
R ²	.99	.98	.98	.99
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
Tasa de digestión, %/h	14.60	14.10	17.70	17.20
Intercepto ^a	102.89	123.81	105.37	112.25
R ²	.94	.94	.94	.94
<i>Cinética de saturación</i>				
<i>n</i>	1.46	1.49	1.14	1.24
K ₅ ^b	117.40	11.80	6.13	7.01
Dmax ^c	105.86	127.22	115.43	116.31
<i>Tasa de digestión, %/h</i>				
4 h	4.46	5.43	4.02	4.48
8 h	3.21	3.98	2.38	2.69
12 h	2.29	2.82	1.55	1.75
16 h	1.66	2.04	1.08	1.21
20 h	1.24	1.52	0.79	0.88
24 h	1.24	1.52	0.79	0.88

^aExpresado como % de almidón digestible residual.

^bK₅ = tiempo requerido para alcanzar la mitad de la digestibilidad máxima teórica.

^cDmax = digestibilidad máxima teórica.

Cuadro 3. Parámetros estimados con los distintos modelos de digestión de almidón (Incubación 3)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
Tasa de digestión, %/h	7.90	10.08	11.10	12.09
Intercepto ^a	117.37	121.44	105.05	115.05
R ²	.93	.96	.99	.98
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
Tasa de digestión, %/h	8.70	11.05	11.35	12.79
Intercepto ^a	134.85	143.70	110.03	129.91
Fase de retraso, h	1.59	1.52	0.39	0.95
R ²	.93	.97	.99	.98
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
Tasa de digestión, %/h	9.49	11.97	15.24	13.56
Intercepto ^a	101.96	114.39	112.44	110.46
R ²	.90	.93	.94	.97
<i>Cinética de saturación</i>				
<i>n</i>	2.98	3.56	2.21	0.91
K ₅ ^b	17.33	13.16	12.21	19.99
Dmax ^c	110.63	98.30	107.39	177.15
<i>Tasa de digestión, %/h</i>				
4 h	0.82	0.93	3.00	6.15
8 h	2.74	4.11	4.21	4.25
12 h	4.16	5.37	3.46	3.18
16 h	4.09	3.67	2.38	2.49
20 h	3.17	1.99	1.57	2.01
24 h	2.20	1.04	1.04	1.67

^aExpresado como % de almidón digestible residual.

^bK₅ = tiempo requerido para alcanzar la mitad de la digestibilidad máxima teórica.

^cDmax = digestibilidad máxima teórica.

Los valores de fase de retraso determinados con el modelo de cinética de primer orden son menores a las tres horas, y podrían ser el resultado artificial. No se detectó el equivalente como intercepto en la ordenada con el modelo de cinética de saturación.

En los Cuadros 4, 5 y 6, se presenta la diferencia entre los valores observados en los experimentos y los estimados por regresión con los modelos, y en el Cuadro 7 se presentan las sumas de cuadrados residuales, que muestran que las estimaciones más cercanas son realizadas por el modelo de cinética de saturación, seguidas por el de cinética de primer orden. La inclusión de fase de retraso o fracción indigestible a esta última resulta en una mayor desviación en la estimación.

Las pendientes estimadas en el modelo de cinética de saturación, permiten definir en qué tiempos de incubación ocurren los

principales cambios en la digestión del almidón en los distintos granos.

De acuerdo a lo anterior se puede considerar lo siguiente:

A) Modelo de cinética de primer orden

El modelo de cinética de primer orden (Figura 2) ha sido usado para describir la digestión de las paredes celulares^(2,6,7) y del almidón^(5,8). Algunas de las relaciones dinámicas de los componentes descritos para la digestión de la fibra^(19,20) pueden ser aplicados a la digestión del almidón⁽⁴⁾. Por lo tanto, la extensión de la digestión del almidón estaría directa y positivamente relacionada con su tasa de digestión, mientras que la tasa de pasaje tendría una influencia negativa en la extensión de la digestión.

La cinética de primer orden ha permitido conocer los factores que pueden alterar la

Figura 2. Modelo de cinética de primer orden con o sin fase de retraso

Cuadro 4. Diferencias entre los valores observados y los valores estimados con los modelos (Incubación 1)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
4 h	-4.22	-4.54	-1.29	-8.85
8 h	-10.13	-17.37	-21.34	-14.14
12 h	-8.26	1.97	-5.67	-3.76
16 h	-0.13	7.66	-1.85	-3.37
20 h	2.52	-3.08	-4.03	-0.05
24 h	-0.09	0.39	2.60	1.28
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
4 h	8.79	2.82	27.48	14.94
8 h	-3.42	-13.72	-10.60	-4.79
12 h	-5.45	3.27	-2.06	-0.63
16 h	0.35	-7.54	-1.34	-2.81
20 h	1.69	-4.01	-4.59	-0.40
24 h	0.35	-0.94	1.81	0.72
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
4 h	3.79	5.77	7.54	10.92
8 h	14.72	22.56	20.68	15.18
12 h	12.79	2.60	2.05	3.50
16 h	2.26	-5.83	-2.83	1.97
20 h	-3.68	1.41	-0.85	-2.22
24 h	-6.38	-5.61	-7.34	4.18
<i>Cinética de saturación</i>				
4 h	-0.13	4.2	3.83	-0.21
8 h	1.04	-0.77	-2.76	-0.43
12 h	-1.67	0.48	2.71	1.75
16 h	0.91	1.13	-0.05	-2.11
20 h	0.70	-5.21	-3.92	-0.10
24 h	-0.67	3.89	2.73	0.91

Cuadro 5. Diferencias entre los valores observados y los valores estimados con los modelos (Incubación 2)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
4 h	-1.65	-0.99	1.50	0.30
8 h	-2.47	-6.58	-0.13	-0.15
12 h	2.03	-4.89	0.84	-1.10
16 h	1.63	-3.05	2.41	1.46
20 h	1.91	0.80	-0.14	0.29
24 h	-0.79	1.15	-0.46	-0.09
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
4 h	-1.07	10.37	-1.72	0.18
8 h	-2.46	-1.68	-1.69	-0.40
12 h	1.70	-3.16	0.14	-1.35
16 h	1.11	-2.79	2.15	1.25
20 h	1.31	0.46	-0.20	0.12
24 h	-1.41	0.63	-0.43	0.22
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
4 h	0.36	1.59	-2.09	-0.85
8 h	8.78	8.96	4.16	3.85
12 h	4.66	6.46	2.73	4.36
16 h	2.28	3.03	-0.76	0.01
20 h	-1.85	-2.44	-0.20	-0.68
24 h	-3.09	-4.16	1.15	-1.83
<i>Cinética de saturación</i>				
4 h	1.19	0.59	0.69	0.35
8 h	-2.08	-0.83	-1.80	-0.54
12 h	0.93	0.15	0.17	-0.90
16 h	0.30	-0.09	2.35	1.84
20 h	1.00	1.28	-0.24	0.26
24 h	-1.05	-0.93	-1.07	-0.93

Cuadro 6. Diferencias entre los valores observados y los valores estimados con los modelos (Incubación 3)

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo
<i>Cinética de primer orden</i>				
4 h	9.07	6.68	5.36	4.92
8 h	-10.28	-12.67	-2.97	-4.63
12 h	-8.27	-7.11	-3.84	-4.76
16 h	-7.50	-3.19	-1.56	-2.51
20 h	-0.29	-0.10	0.96	-0.45
24 h	4.01	2.10	0.34	1.28
<i>Cinética de primer orden con fase de retraso</i>				
4 h	18.73	18.21	7.63	11.91
8 h	-5.46	-7.16	-2.05	-1.64
12 h	-6.27	-4.84	-3.59	-3.71
16 h	-7.13	-2.58	-1.61	-2.34
20 h	-0.79	-0.27	0.79	-0.64
24 h	3.10	1.61	0.17	1.00
<i>Cinética de primer orden con fracción indigestible</i>				
4 h	6.90	5.10	6.02	3.20
8 h	-11.34	-14.31	-5.99	-6.06
12 h	-7.51	-7.48	-6.51	-5.06
16 h	-4.73	-1.88	-2.54	-1.54
20 h	4.41	2.83	1.87	1.62
24 h	10.43	6.42	2.93	4.22
<i>Cinética de saturación</i>				
4 h	0.90	-4.35	-0.11	0.96
8 h	-2.22	-1.49	0.45	-1.82
12 h	2.47	1.72	-0.63	0.03
16 h	-1.42	-0.87	-0.08	1.29
20 h	0.09	-0.84	1.01	0.69
24 h	0.22	0.86	-0.61	-1.02

tasa de digestión de los granos tales como las características físico-químicas del grano (tipo de grano, procesamiento), las características de la población microbiana (actividad amilolítica, presencia de protozoarios), y las condiciones del ambiente ruminal (pH, presión osmótica, etc)⁽²¹⁾. El uso de cinética de primer orden no está exento de problemas; en ocasiones las diferencias biológicas en la digestión de almidón no se detectan en la pendiente y sí se detectan al analizar los datos de digestibilidad de almidón por cada tiempo de incubación.

B) Modelo de cinética de primer orden con fase de retraso

La fase de retraso ha sido definida como el tiempo en que se inicia la digestión

como una cinética de primer orden (Figura 2) y representa el tiempo en que se adhieren las bacterias para iniciar la digestión⁽¹⁾, y se puede considerar como el período en el cual la concentración de las enzimas está limitando la digestión⁽²²⁾. Una vez que las enzimas están en exceso, la digestión es proporcional a la concentración de sustrato, siguiendo una cinética de primer orden⁽³⁾.

En el caso del almidón, la fase de retraso representaría el inicio de la colonización del grano. Se han mencionado valores de fase de retraso exclusivamente para la pared celular de los granos⁽²²⁾, y posiblemente no pueda ser detectada una fase de retraso para la digestión del almidón. Los valores obtenidos en este estudio para fase de retraso son biológicamente cuestionables, ya que no se hicieron determinaciones de

Cuadro 7. Suma de cuadrados residuales de los modelos

Modelo	Sorgo seco rolado	Maíz seco rolado	Maíz con alto contenido de humedad	Trigo	Media
<i>Incubación 1:</i>					
Cinética de primer orden (CPO)	198.44	392.44	515.63	305.40	352.98
CPO con fase de retraso	121.76	280.70	897.89	254.27	388.66
CPO con fracción indigestible	453.98	616.46	551.32	388.21	502.49
Cinética de saturación	5.65	62.02	52.45	8.58	32.18
<i>Incubación 2:</i>					
CPO	19.87	79.45	9.01	3.55	27.97
CPO con fase de retraso	15.02	128.74	10.68	3.64	39.52
CPO con fracción indigestible	117.10	156.98	32.02	38.37	86.12
Cinética de saturación	8.80	3.57	10.47	5.54	7.10
<i>Incubación 3:</i>					
CPO	328.96	270.30	55.79	76.44	182.87
CPO con fase de retraso	480.68	415.62	78.55	165.19	285.01
CPO con fracción indigestible	383.21	339.50	133.03	95.27	237.75
Cinética de saturación	13.91	26.30	2.01	7.42	12.41
<i>Medias</i>					
CPO	182.42	247.70	193.48	128.46	187.94
CPO con fase de retraso	205.82	275.02	329.04	141.03	237.73
CPO con fracción indigestible	318.10	370.98	238.79	173.95	275.45
Cinética de saturación	9.46	0.63	21.64	7.18	17.23

desaparición de almidón en las primeras 2 horas de incubación.

C) Modelo de cinética de primer orden con fracción indigestible

La fracción potencialmente digestible está determinada por la substracción de la fracción indigestible del total remanente en cada tiempo de fermentación⁽⁶⁾ y su digestión sigue una cinética de primer orden (Figura 3). Para el caso de almidón, se consideró la fracción indigestible en el rumen, a la cantidad de almidón presente a las 48 horas de incubación *in vitro*. A pesar de que existe poca información acerca de la presencia de una fracción indigestible del almidón en los granos, es posible que existan fracciones muy pequeñas indigestibles las cuales pudieran estar asociadas a las características de la estructura del almidón; por ejemplo, algunas variedades de sorgo tienen una digestión ruminal de 50%⁽²³⁾ mientras que otras pueden llegar al 80%⁽²¹⁾. A pesar de que en teoría podría

existir la fracción indigestible del almidón, la inclusión de la misma en el modelo de cinética de primer orden no mejoró la estimación, posiblemente porque se requería de tiempos de incubación mayores, o porque dicha fracción es insignificante. Vale la pena mencionar que en el análisis de otras curvas de digestión de almidón⁽²⁴⁾ la inclusión de tiempos de fermentación hasta las 48 h, las tasas de digestión estimadas no reflejaban las diferencias en la digestión entre granos como el sorgo y la cebada.

D) Modelos compartamentales

Considerando que el almidón es un polímero de condensación de glucosa formado por amilosa y amilopectina, y que los granulos de almidón tienen regiones amorfas y cristalinas⁽²⁵⁾ sería posible que la tasa de digestión se pudiera expresar con un modelo de dos compartimientos (Figura 4).

El análisis compartamental ha sido usado para describir la digestión ruminal de la

Figura 3. Modelo de cinética de primer orden o fracción indigestible

fibra^(1,11,26), en virtud de que reconoce dos fracciones de fibra con propiedades de digestión diferentes. Los modelos de dos o tres compartimientos empleados en este estudio con la información disponible para el almidón, no se ajustaron para los valores de ninguno de los granos. A pesar de que el almidón está compuesto de amilosa y amilopectina, o inclusive de otras fracciones tales como las muestran los resultados de Manners⁽⁷⁾, la digestión, tal y como se interpreta en la metodología *in vitro*, se manifiesta como una sola fracción.

E) Modelo de cinética de saturación

El mejor ajuste de valores observados en este estudio con el modelo de cinética de saturación, se debe principalmente a que este modelo se ajusta por medio de una serie de procesos iterativos, donde se cambian los valores de los parámetros hasta

obtener la menor suma de cuadrados residuales⁽¹⁴⁾. La desventaja de este modelo, es que se pueden obtener valores de cinética de digestión que no tienen significado biológico (por ejemplo una cinética de quinto orden), los cuales se presentan porque la magnitud de los cambios en la curva de digestión son muy drásticos en relación con el tiempo de fermentación, particularmente en las primeras horas de incubación.

El tiempo requerido para alcanzar la mitad de la digestibilidad máxima teórica ($K_{.5}$) del modelo de cinética de saturación (Figura 5), puede obtenerse a partir de la cinética de primer orden como el tiempo medio de digestión⁽²⁷⁾. El $K_{.5}$ es análogo a la constante de Michaelis-Menten y representa la afinidad del almidón a la digestión microbiana. Esta información podría ser considerada en la formulación

Figura 4. Modelo compartamental

basada en la degradación de los ingredientes^(28,29). Además, el modelo de cinética de saturación permite obtener una mayor información en relación a los cambios de la pendiente durante la fermentación, y estos pueden ser útiles como indicadores de las diferencias de degradación entre el almidón de los distintos granos.

Las menores diferencias entre valores observados y calculados corresponden al modelo de cinética de saturación, y podría tener una mejor capacidad de predicción, si el valor de n es repetible. Una desventaja de este modelo es que requiere un número mayor de tiempos de incubación por el número de parámetros estimados.

Es importante mencionar que no existe una metodología estadística definida para la comparación de modelos. En este

estudio, los valores de R^2 son poco útiles ya que hubo transformaciones de valores, por lo que es mejor comparar los modelos en base al análisis de residuales⁽³⁰⁾ y a la interpretación biológica del modelo. Desde este punto de vista, sugerimos que el investigador presente sus resultados de digestión de almidón con el modelo elegido, y al mismo tiempo con los datos analizados por hora de fermentación, de tal manera que el lector tenga la oportunidad de utilizar el modelo que a su juicio juzgue adecuado.

También es importante tener presente que los valores de digestión obtenidos en sistemas *in vitro*, tienen ciertas limitaciones en su representatividad respecto a lo que sucede en el rumen, donde existen otros factores (tasa de pasaje, niveles de consumo, frecuencia de alimentación, otros

Figura 5. Modelo de cinética de saturación

constituyentes dietarios, etc.), por lo que la aplicación o capacidad descriptiva de los modelos debe de evaluarse con sistemas *in vivo*.

En conclusión, la digestión ruminal del almidón es un proceso que puede ser expresado con varios modelos de cinética de primer orden, con excepción del modelo de dos compartimentos. La inclusión de la fase de retraso o de la fracción indigestible no se justifica en los modelos de primer orden, para la digestión del almidón. El modelo de cinética de saturación puede aportar información importante en el análisis de las curvas de fermentación, sin embargo, debe tenerse precaución en la interpretación de los parámetros, cuando los valores no tengan significado biológico. Es justificable desde el punto de vista matemático y biológico

el uso de modelos de cinética de primer orden para describir la digestión ruminal del almidón.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Robert Britton[>] de la Universidad de Nebraska, Lincoln, US, sus valiosas opiniones sobre los modelos, y al Dr. Mike Sindt por los datos proporcionados para la comparación de los modelos. Extendemos nuestro agradecimiento al Dr. Preston Mercer del Departamento de Bioquímica de la Escuela de Medicina de la Universidad de Tulsa, Oklahoma, US, sus comunicaciones sobre el modelo de cinética de saturación y el programa computacional proporcionado.

MATHEMATICAL MODELS TO EVALUATE *in vitro* RATE OF STARCH DIGESTION

ABSTRACT

Mendoza MGD, Ortega CME, Ricalde VR, Martínez GJA. *Téc Pecu Méx* 2000;38(1)51-65. The objective was to compare mathematical models to describe ruminal starch digestion. Information of ruminal starch degradation *in vitro* from sorghum, corn, high moisture corn and wheat were analyzed. The first order kinetic model (FOM), with lag time (FOM-L), with indigestible fraction (FOM-I), two compartmental models, and the saturation kinetics model (SKM) were compared by analyses of residual sum squares and the biological meaning of the parameter derived. Compartmental models did not fit the data and the rest of the models detected the differences of the rate of starch digestion of the grains. The SKM had the lowest residual sum of squares followed by the FOM. However, SKM estimated some parameters without biological meaning. The inclusion of lag time and indigestible fraction did not improve the estimation of the FOM. It was concluded that the first order model is the most appropriate to describe ruminal starch digestion.

KEY WORDS: Starch, Rate of digestion, Mathematical model, Rumen.

LITERATURA CITADA

1. Mertens DR. Applications of theoretical mathematical models to cell wall digestion and forage intake in ruminants [tesis doctoral] Ithaca, New York, US. Cornell University; 1973.
2. Waldo DR, Smith LW, Cox EL. Model of cellulose disappearance from the rumen. *J Dairy Sci* 1972;(55)125-132.
3. Mertens DR. Dietary fiber components: relationship to the rate and extent of digestion. *Fed Proc* 1977;(36)187-192.
4. Mendoza MGD, Ricalde VR. Alimentación del ganado bovino con dietas altas en granos. 1ª ed. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, México. 1993.
5. Ewing DL, Johnson DE. Corn particle passage and size reduction in the rumen of beef steers: A dynamic model. *J Anim Sci* 1986;(64)1194-1204.
6. Mertens DR, Ely LO. Relationship of rate and extent of digestion to forage utilization. A dynamic model evaluation. *J Anim Sci* 1982;(54)895.
7. Manners DJ. Recent developments in our understanding of amylopectin structure. *Carbohydrate Polymers* 1989;(11)87-90.
8. Sindt MH. Factors affecting the utilization of high moisture corn [tesis maestría] Lincoln, Nebraska, US. University of Nebraska; 1987.
9. Wester TJ. Evaluation of starch and protein of grain sorghum hybrids for finishing ruminants [tesis maestría]. Lincoln, Nebraska, US. University of Nebraska; 1989.
10. Drapper N, Smith H. Applied regression analysis. New York, US: John Wiley & Sons. 1981.
11. Nocek JE, English JE. *In situ* degradation kinetics: Evaluation of rate determination procedure. *J Dairy Sci* 1986;(69)77-85.
12. Mertens DR, Lofton JR. The effect of starch on forage fiber digestion kinetics *in vitro*. *J Dairy Sci* 1980;(63)1437-1446.
13. Jacquez JA. Compartmental analysis in biology and medicine. 2nd ed. Ann Arbor, Michigan, US: The University of Michigan Press. 1983.
14. Mercer PL, Farnell K E, Morgan PH, Longenecker, Jr. HE, Lewis JR. Mathematical analysis of nutrient-response data. *Nutr Rep Int* 1977; 15:1.
15. Hill SS, Conrad HR, Hibbs JW. 1969. Relative rate of *in vitro* cellulose disappearance as a possible estimator of digestible dry matter intake. *J Dairy Sci* 1969;(52)1687-1694.
16. Mercer LP. Mathematical models in nutrition. *Nutr Rep Int* 1980; (21)180-198.
17. Smith LW, Goering HK, Waldo DR, Gordon CH. *In vitro* digestion rate of forage cell wall components. *J Dairy Sci* 1972;(54)71-82.
18. Ewing DL, Johnson DE, Rimpler WV. Corn particle passage and size reduction in the rumen of beef steers. *J Anim Sci* 1986;(63)1509-1515.
19. Mertens DR. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *J Anim Sci* 1987;(64)1548-1558.
20. Allen MS, Mertens DR. Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes. *J Nutr* 1988;(118)261-270.
21. Mendoza MGD. Site and extent of starch digestion in ruminants fed high grain diets. I. Role of ruminal protozoa. II. Mixtures of high moisture corn and dry rolled sorghum III. Duodenal infusions of Casein [tesis doctoral]. Lincoln, Nebraska, US. University of Nebraska, 1991.

MODELOS MATEMATICOS PARA EVALUAR LA TASA DE DIGESTION *in vitro* DEL ALMIDON

22. Varga GA. Factors which affect estimation of lag time in the rumen. In: Agricultural Experiment Station Oklahoma State University editors. Symposium Proceedings: Feed Intake by Beef Cattle. 1986;70-80.
23. Britton RA, Stock RA. Acidosis, rate of starch digestion and intake. In: Agric Exp Sta, Oklahoma State University editors. Symposium Proceedings: Feed Intake by Beef Cattle. 1986;137.
24. Olivares RL. Efecto de la combinación de distintas fuentes de proteína y almidón en el comportamiento de becerros Holstein [tesis maestría]. Chapingo Edo. de Méx. Colegio de Postgraduados; 1991.
25. Rooney LW, Pflugfelder RL. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. J Anim Sci 1986;(63)1607-1623.
26. Van Milgen J. Models describing ruminal *in situ* digestion as affected by the lag process and fractionation of substrate [tesis doctoral]. Urbana-Champaign, Illinois, US. University of Illinois; 1992.
27. Riquelme VE. Efectos asociativos en dietas basadas en subproductos agrícolas. Rev Mex Prod Anim 1984;(16)13-24.
28. Bórquez GJL. Formulación de dietas completas para rumiantes en base a las tasas de degradación *in vitro* de los ingredientes [tesis maestría]. Chapingo, Edo. de México. Colegio de Postgraduados; 1980.
29. Tovar GMR. Sincronización de la degradación ruminal de diferentes fuentes de energía y nitrógeno [tesis maestría]. Chapingo, Edo. de México Colegio de Postgraduados; 1990.
30. Beauchemin KA, Buchanan-Smith JG. Evaluation of markers, sampling sites and models for estimating rates of passage of silage or hay in dairy cows. Anim Feed Sci Technol 1989;(27) 59-75.

Germán David Mendoza Martínez, *et al.*