

LA VALORACIÓN NUTRICIONAL DE LOS ALIMENTOS PARA ANIMALES: GÉNESIS DE LA INFORMACIÓN

Francisco Maroto Molina^a, Augusto Gómez Cabrera^{ab}, J. Emilio Guerrero Ginel^b, Ana Garrido Varo^b y Dolores C. Pérez Marín^b

^aServicio de Información sobre Alimentos. ^bDepartamento de Producción Animal Universidad de Córdoba, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3)

1.- INTRODUCCIÓN

La eficiencia de los sistemas productivos ganaderos se muestra, en el actual contexto de competencia global de los mercados agroalimentarios, como uno de los elementos clave para su supervivencia. Dicha eficiencia no debe considerar sólo aspectos económicos, sino también medioambientales, de seguridad alimentaria, de bienestar animal, etc.

La alimentación animal tiene mucho que decir en relación a la construcción de una ganadería eficiente. En este sentido, desde una óptica económica, es necesario diseñar sistemas de alimentación que maximicen la respuesta productiva con un coste de los insumos lo más bajo posible. Asimismo, desde las perspectivas del medio ambiente, la seguridad alimentaria y el bienestar animal, las metas son reducir tanto las sustancias contaminantes, como aquellas que puedan afectar a la salud humana y animal.

En cualquier caso, independientemente del objetivo primario, la utilización óptima de los alimentos para animales requiere de un conocimiento preciso de sus características. En una situación ideal, las materias primas y piensos se valorarían en base a la respuesta productiva alcanzada por los animales. Sin embargo, dada la dificultad de estandarizar dicha respuesta, los actuales sistemas de valoración de alimentos emplean el concepto de valor nutricional como una combinación de la composición en nutrientes de un alimento y

del modo en que estos nutrientes son asimilados por los diferentes tipos de animales (en resumen, digestibilidad, metabolismo e ingestión). Las principales características de muchos de estos sistemas de valoración se han presentado en diferentes cursos de especialización FEDNA (Sainz et al., 1994; Doorenbos et al., 2004; Noblet et al., 2004; Tybirk, 2004).

Tanto la composición en nutrientes, como el grado de aprovechamiento de los mismos, no son ni mucho menos constantes para cada tipo de alimento. En efecto, en productos como los forrajes y subproductos industriales, la variabilidad es enorme. Por ello, es necesario caracterizar adecuadamente los alimentos que estamos empleando en cada momento.

2.- NIVELES DE INFORMACIÓN

Existen modos muy diferentes de obtener la información sobre el valor nutritivo de los alimentos, si bien, *a priori*, cabe distinguir entre datos medidos y datos estimados.

Entendemos como datos de valor nutritivo medidos aquellos que se han obtenido en experimentos *in vivo*, que, en principio, suponen la mejor aproximación a la respuesta productiva real de los animales. Esta información, pese a su gran valor, es cada día más escasa, debido al alto coste y consumo de trabajo y tiempo que supone su obtención. Además, la normativa relacionada con los animales de experimentación es cada vez más restrictiva, dada la creciente conciencia social en torno al bienestar animal.

De este modo, se hace necesario recurrir a estimas de los valores *in vivo*. Los métodos de estima disponibles son muy diversos y todos ellos presentan algunas ventajas e inconvenientes (Adesogan, 2002). A continuación se describen algunos de los más habituales:

Digestibilidad *in situ*: la técnica de las bolsas de nylon implementada por Orskov et al. (1980) resulta adecuada para estimar la digestibilidad *in vivo* y tiene la ventaja de ser una de las pocas capaces de describir la cinética de degradación. Sin embargo, no tiene en cuenta la cinética de tránsito de las partículas en el rumen, pues éstas se encuentran confinadas en una bolsa. Por otro lado, esta técnica comparte muchos de los inconvenientes de los ensayos *in vivo*, en especial la necesidad de disponer de animales de experimentación, en este caso fistulados en el rumen. Además, los resultados obtenidos son

altamente variables debido a la influencia de factores como la dieta del animal, el lugar de incubación de la bolsa, las técnicas de lavado y secado de la misma, etc.

Digestibilidad *in vitro*: tradicionalmente, el método de Tilley y Terry (1963) se ha considerado como uno de los más útiles para predecir la digestibilidad *in vivo*. Sin embargo, esta técnica también requiere animales fistulados, en este caso para la obtención de líquido ruminal. En consecuencia, gran parte de sus inconvenientes son los mismos que los de los métodos *in situ* e *in vivo*, incluida la poca consistencia de los resultados, que se ven afectados por factores como la dieta, la hora de muestreo del líquido, la salud ruminal, etc y, sobre todo, por las diferencias entre las condiciones ambientales entre un tubo de ensayo y el rumen.

Con posterioridad han surgido métodos que sustituyen el líquido ruminal por celulasas y otras enzimas obtenidas de cultivos de hongos como *Trichoderma viride* y *Aspergillus niger* (Jones y Hayward, 1975; Roughan y Holland, 1977; Dowman y Collins, 1982, De Boever et al., 1988). Sin embargo, pese a que estas técnicas eliminan el problema de los animales fistulados, se mantiene la cuestión de la variabilidad de los resultados entre series, dado que la actividad de las enzimas es también variable.

La escasa consistencia entre diferentes series de análisis que muestran tanto las técnicas *in situ* como *in vitro*, supone que los datos obtenidos con ellas son poco útiles si se consideran como valores absolutos, no así como valores relativos (que muestras dentro de una misma serie son más o menos digestibles). Este inconveniente se puede corregir, en gran parte, mediante la inclusión en cada serie de análisis de muestras patrón con valor *in vivo* conocido.

Estimas en base a la composición química: múltiples investigadores han publicado relaciones, fundamentalmente ecuaciones de regresión, entre los valores nutritivos (digestibilidad, ingestión, metabolismo,...) y diferentes parámetros de composición química. El uso de estas ecuaciones tiene un coste mucho menor que los métodos anteriores, pues las medidas químicas son, en su mayoría, fáciles de establecer como análisis de rutina en los laboratorios.

Noblet (1994) recoge algunos inconvenientes de estas ecuaciones de predicción, señalando que su validez está muy ligada a las condiciones experimentales en que fueron obtenidas (peso de los animales, representatividad de las dietas, etc) y a la precisión de los análisis de los alimentos. Además, en muchas ocasiones, los parámetros incluidos en las ecuaciones no tienen en cuenta aspectos tan importantes como la naturaleza de las paredes

celulares (nivel de lignificación) o el grado de insaturación de las grasas, lo que conduce a una sub- o sobreestimación del valor nutritivo.

Por su parte, Coleman y Henry (2002) destacan la importancia del número y tipo de muestras empleadas para la calibración de la ecuación (normalmente se usan pocas muestras). Además, señalan el hecho de que las ecuaciones son muchas veces simples relaciones empíricas en las que la relación causa-efecto no es clara. En consecuencia, es posible que su uso esté limitado a la población de muestras en la que se ha desarrollado el modelo. Un paso indispensable para contrastar esto es la validación de las ecuaciones con datos externos, pero en la práctica rara vez se produce.

Tablas de alimentos: los datos tabulados no pueden ser considerados estimas en un sentido estricto. A pesar de ello, se han incluido aquí como referencia al nivel más bajo de información en la escala descrita (se trata de los valores más alejados de la respuesta productiva real). Como gran ventaja de estos datos tenemos su coste, prácticamente nulo para el usuario final. Sin embargo, no hay que olvidar que esta información no considera la variabilidad intrínseca a los alimentos, lo que puede llevar a cometer grandes errores tanto por defecto como por exceso.

Es posible que el lector de este trabajo eche de menos en la lista propuesta los datos estimados en base a medidas con sensores ópticos, fundamentalmente los derivados de la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS). Dadas las peculiaridades de este tipo de información, se ha decidido abordar la cuestión con mayor profundidad más adelante.

3.- LA SITUACIÓN REAL EN LA INDUSTRIA DE LA ALIMENTACIÓN ANIMAL

En las fábricas de piensos y plantas de mezclas, la información relativa a la composición química y el valor nutritivo de las materias primas se maneja casi exclusivamente desde programas informáticos de racionamiento. Estos programas permiten calcular combinaciones de alimentos que suplen las necesidades de los animales bajo diferentes criterios, principalmente el de mínimo coste.

El tipo de información que manejan los programas de racionamiento podría enmarcarse en los dos niveles más bajos de la escala descrita en el apartado anterior: tablas y estimas en base a la composición química. Así, dichos programas suelen incorporar una matriz de datos de composición química y valor nutritivo para cada uno de los alimentos (en definitiva una tabla). En la mayor parte de los casos, los valores por defecto de estas

matrices son editables por el usuario, si bien no siempre los cambios realizados modifican automáticamente los valores nutritivos finales (Baumont et al., 1999).

En cualquier caso, la realidad práctica es que, normalmente, los nutricionistas no adaptan las matrices de datos a las características nutricionales de los alimentos disponibles con la frecuencia que sería deseable. Esto obliga a asumir un cierto nivel de seguridad durante la formulación, ya que, el considerar solamente los datos medios de composición química y valor nutritivo, supone quedarse por debajo de las necesidades en el 50% de los casos. Por otro lado, es frecuente que, si hacen modificaciones de la matriz de datos químicos precargada por el programa, los nutricionistas recurran total o parcialmente a su experiencia personal para ajustar los valores nutritivos.

En definitiva, a modo de resumen, podríamos decir que el uso actual de la información sobre alimentos se caracteriza por su estaticidad, así como por cierto nivel de empirismo.

4.- LAS BASES DE DATOS DE ALIMENTOS

Las bases de datos relativas a la composición y el valor nutritivo de los alimentos para animales son poco numerosas en la actualidad. Sin embargo, como se explica a continuación, pueden ser muy útiles para solucionar algunos de los problemas citados en este documento.

Con este convencimiento, el Servicio de Información sobre Alimentos (SIA) de la Universidad de Córdoba trabaja desde hace años en el desarrollo de bases de datos colaborativas a partir de la información generada diariamente en los laboratorios españoles de nutrición animal. Para ello, emplea conceptos recientes relacionados con la gestión y análisis de información heterogénea, como los metadatos y la minería de datos (Maroto Molina et al., 2011).

A continuación se relacionan algunas áreas donde creemos que la disponibilidad de bases de datos de alimentos podría mejorar la situación actual:

VALIDACIÓN DE ECUACIONES DE PREDICCIÓN

Como se ha comentado previamente, las ecuaciones de predicción del valor nutritivo están en la base de la alimentación animal actual. Sin embargo, se trata de un área poco estandarizada, pues múltiples investigadores han obtenido ecuaciones muy diversas

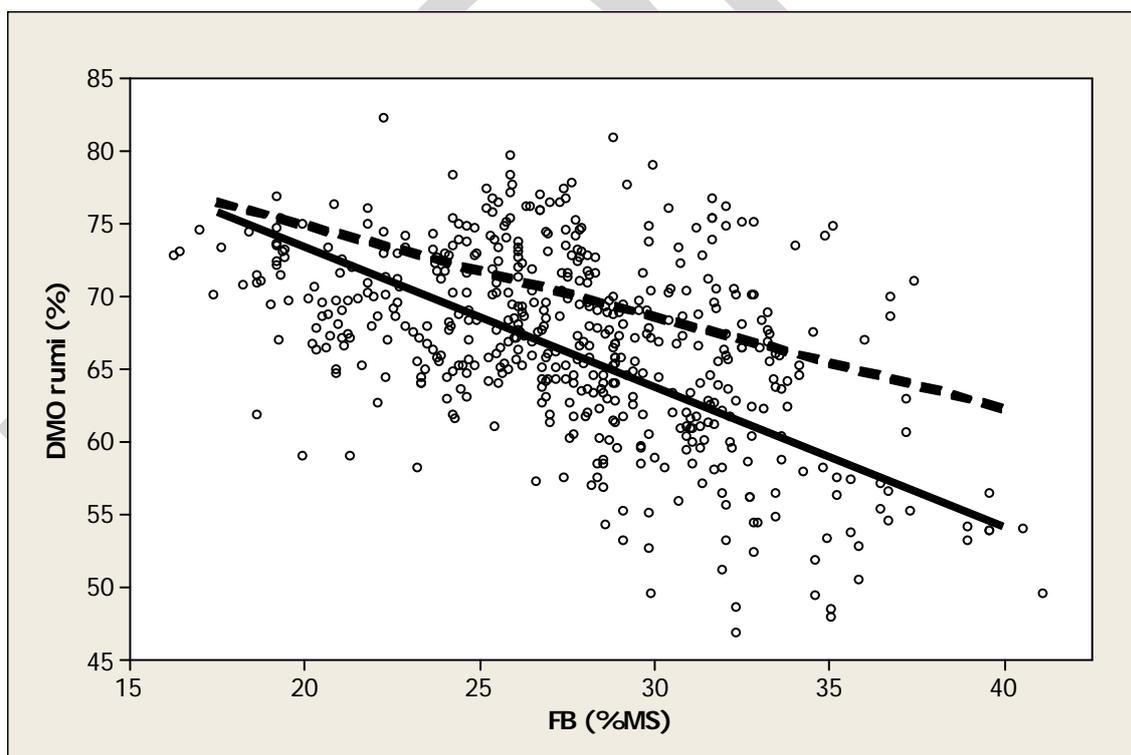
para la estima de los mismos parámetros. Además, dado que la mayor parte de las ecuaciones disponibles sólo indican algunos estadísticos de calibración (casi nunca de validación), resulta muy difícil saber *a priori* qué ecuación es la más adecuada para un determinado propósito.

Por otro lado, las bases de datos acumulan una cantidad importante de información que podría ser utilizada para la validación externa de estas ecuaciones de la bibliografía con datos distintos a los empleados para su obtención. La figura 1 muestra como ejemplo la comparación de las dos ecuaciones siguientes, elaboradas para la estima de la digestibilidad de la materia orgánica (DMO rumi) de forrajes a partir del contenido en fibra bruta (FB):

$$\text{DMO rumi (\%)} = 92,60 - 0,96 \cdot \text{FB (\%MS)} \text{ (McMeekan, 1943)}$$

$$\text{DMO rumi (\%)} = 87,45 - 0,63 \cdot \text{FB (\%MS)} \text{ (Hallsworth, 1949)}$$

Figura 1.- Comparación de dos ecuaciones para la estima de DMO rumi de forrajes

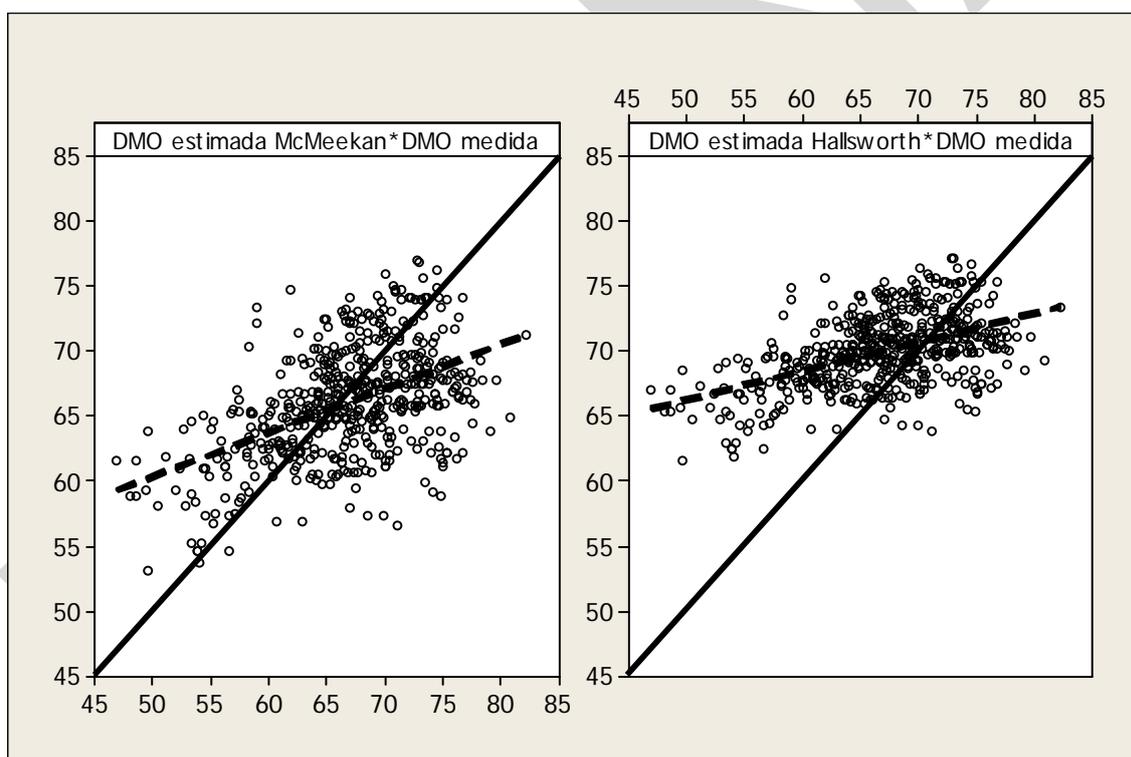


Nota: como línea continua la ecuación de McMeekan (1943) y como discontinua la de Hallsworth (1949).

La nube de puntos de la figura 1 corresponde a los datos de todas las muestras de forraje contenidas en las bases de datos del SIA que disponen de información sobre DMO rumi y FB ($n = 503$).

A simple vista no es posible decidir que ecuación es más precisa, aunque parece que la de McMeekan se ajusta mejor a la nube de puntos, a pesar de ser más antigua. En este sentido, para una mejor visualización, se ha seguido en la figura 2 la estrategia descrita por Olfert (2003), representando, en el eje de abscisas, los valores de digestibilidad *in vivo* medidos y, en el de ordenadas, los valores de digestibilidad estimados con cada una de las dos ecuaciones. Se representan, además, las regresiones lineales entre ambos conceptos.

Figura 2.- Relación entre la digestibilidad medida y estimada a partir de las ecuaciones de McMeekan (1943) y Hallsworth (1949)



Si las ecuaciones de la bibliografía respondieran a la realidad de las muestras incluidas en la base de datos, la regresión entre valores estimados y medidos debería aproximarse a la bisectriz (línea continua en la figura 2). No ocurre así, presentando ambas ecuaciones una desviación, tanto en el origen como en la pendiente, si bien, en el caso de la ecuación de McMeekan, el sesgo en el origen es inferior.

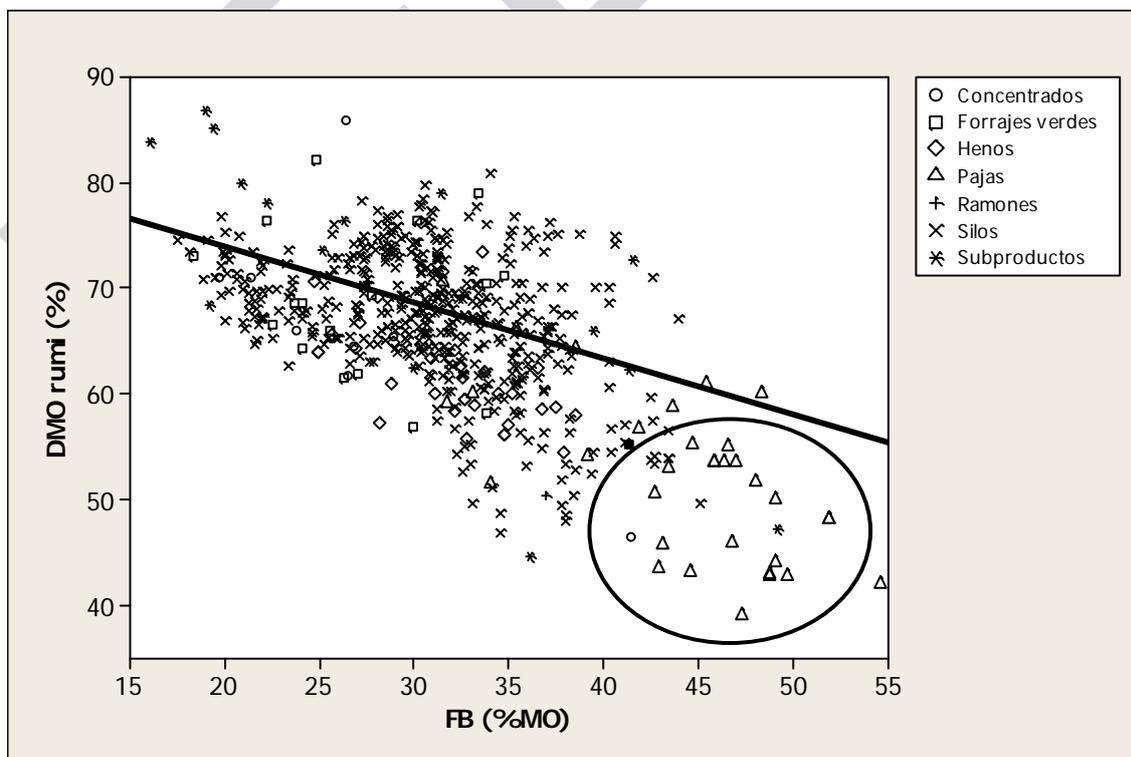
Por otro lado, la figura 3 muestra una forma diferente de entender la validación de ecuaciones de predicción, más allá de una simple clasificación de las mismas o de la caracterización de los errores cometidos cuando se usan fuera del colectivo de muestras de calibración. En dicha figura se aborda el análisis de una de las ecuaciones genéricas de Aufrère y Michalet-Doreau (1988) para la estima de la digestibilidad de la materia orgánica:

$$\text{DMO rumi (\%)} = 84,5 - 0,54 \cdot \text{FB (\%MO)}$$

Dichos investigadores obtuvieron varias ecuaciones en base a los datos de un conjunto de 24 muestras que incluía granos de cereales y leguminosas, harinas vegetales, subproductos industriales, forrajes y pajas.

En este caso, la línea continua de la figura representa la ecuación obtenida por Aufrère y Michalet-Doreau, mientras que la nube de puntos se refiere a las muestras contenidas en las bases de datos del SIA que disponen de la información necesaria para aplicar dicha ecuación: DMO rumi, FB y CEN, ya que la fibra se expresa como porcentaje de la materia orgánica (n = 552).

Figura 3.- Validación de una ecuación de Aufrère y Michalet-Doreau (1988) para la estima de DMO rumi de alimentos en general



A simple vista se puede observar que, en general, el ajuste de la ecuación a los datos medidos es pobre. Sin embargo, cabe destacar un grupo de muestras, correspondiente a paja de cereales y leguminosas, para las que los datos estimados son sistemáticamente superiores a los medidos *in vivo*. En consecuencia, podemos llegar a la conclusión de que el funcionamiento de la ecuación con esta tipología de alimentos no es adecuado, pese a estar representada en el colectivo de calibración.

TABLAS DINÁMICAS

Como se ha comentado anteriormente, en la actualidad los programas de racionamiento suelen utilizarse como simples tablas de alimentos (datos estáticos), pese a que lo habitual es que sea posible modificar manualmente la información precargada. Las ecuaciones de predicción del valor nutritivo incorporan cierto dinamismo a este sistema, especialmente si están programadas para adaptar los datos de valor nutritivo de forma automática.

Aún así, creemos que las bases de datos pueden aportar mayor dinamismo a la presente situación. A continuación se discuten algunas de las posibles aproximaciones.

Ecuaciones de regresión: uno de los problemas habituales al utilizar programas de racionamiento que adaptan los valores nutritivos a la composición de los alimentos de forma automática es el desconocimiento por parte del usuario final de las ecuaciones empleadas y de la precisión de las mismas. Independientemente de que, como se ha explicado en el apartado anterior, las bases de datos pueden ayudar a seleccionar las ecuaciones más adecuadas para un determinado uso, lógicamente, también sería posible obtener nuevas ecuaciones de predicción del valor nutritivo con la información incluida en dichas bases de datos, usando un mayor número de muestras que cualquier ecuación publicada en la bibliografía. Pero, además, es posible utilizar dicha información para obtener relaciones entre parámetros químicos que rara vez aparecen en la literatura científica. Se puede ver su utilidad con el ejemplo siguiente:

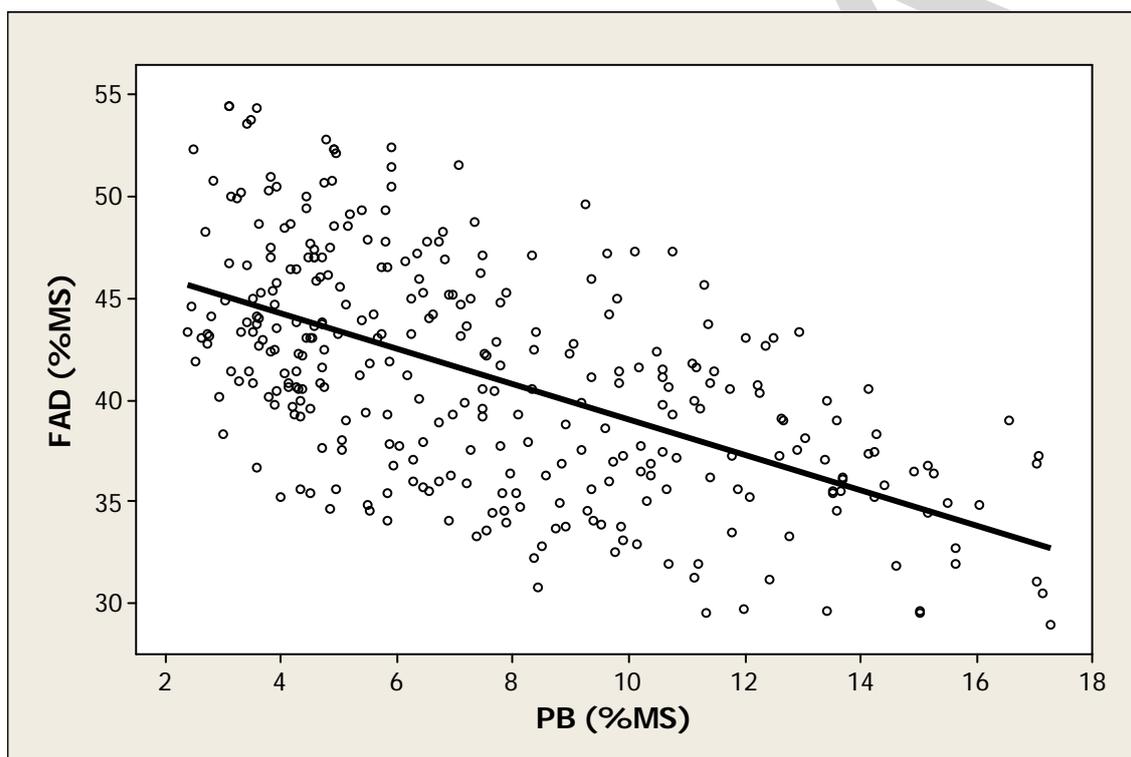
En el caso del heno de gramíneas, las tablas del INRA (2007) recomiendan la siguiente ecuación para estimar la digestibilidad de la materia orgánica:

$$\text{DMO rumi (\%)} = 104,90 + 0,14 * \text{PB (\%MS)} - 1,27 * \text{FAD (\%MS)}.$$

Esto supone que, para los valores medios de las tablas (proteína 16,0% y fibra ácido 31,2%) la digestibilidad es del 67,51%.

Imaginemos que recibimos en nuestra planta de mezclas un heno de raigrás de poca calidad, con un 10% de proteína. Si corregimos el valor de DMO rumi según la ecuación anterior (manteniendo el valor de FAD) obtenemos una digestibilidad del 66,67 %. Sin embargo, en este tipo de materias primas, sabemos que si disminuye la proteína debe aumentar la fibra pero, ¿en qué cuantía? Podemos contestar a esta pregunta utilizando la información disponible en las bases de datos del SIA (n = 319) tal y como muestra la figura 4.

Figura 4.- Regresión entre proteína y fibra ácido detergente para heno de gramíneas



Nota: $FAD (\%MS) = 47,74 - 0,86 * PB (\%MS)$; $R^2 = 32,8\%$; $RSD = 4,50$.

Empleando esta relación, un contenido en proteína del 10% equivale a un valor de FAD de 39,14%. Ambos datos, usados en la ecuación del INRA, proporcionan un valor de DMO rumi de 56,59%, casi 11 puntos inferior al obtenido si sólo cambiamos la proteína.

Estadística multivariante: disponer de bases de datos con información abundante y completa permitiría avanzar en la predicción del valor nutritivo de los alimentos en lo que se refiere a la complejidad de los análisis estadísticos, pues hoy día existen técnicas de predicción más potentes que la regresión. Actualmente, el SIA está trabajando en el estudio del comportamiento de algoritmos como las componentes principales (PCA), la

regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), los árboles de clasificación y regresión (CART) o los análisis de clustering con este tipo de información.

Mención especial merece la estadística local. En teoría, considerando cada muestra como un punto de un espacio n-dimensional (n variables medidas por muestra), podríamos asignar a un alimento de características desconocidas valores similares a los de los más cercanos en dicho espacio. Este tipo de algoritmos, como el de “k vecinos más cercanos” (KNN), resultan especialmente adecuados para propiedades no lineales.

Asimismo, conviene destacar que la mayor parte de los algoritmos multivariantes permiten la consideración de propiedades no numéricas de las muestras (metadatos), como pueden ser el estado vegetativo, el procesamiento o la variedad comercial, en los modelos de predicción de una forma operativa. De este modo, aunque no se incorporen resultados en este apartado, las pruebas llevadas a cabo hasta el momento muestran la extrema importancia recoger esta información durante la construcción de las bases de datos, con el fin de sacar el máximo partido posible a la información acumulada.

5.- LOS VALORES IN VITRO Y LA TECNOLOGÍA NIRS

Jean Noblet, en el X Curso de Especialización FEDNA (1994), señalaba que “*la utilización de tablas de valores nutritivos o de ecuaciones que sólo consideran la composición química es, a menudo, insuficiente. Los avances en este campo vendrán esencialmente de las propuestas relativas a las técnicas in vitro y físico-químicas.*”

En el cuadro 1 se recogen algunos ejemplos de los resultados obtenidos por diversos autores en la estima de la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica de diferentes alimentos, utilizando tanto parámetros químicos, como datos *in vitro* y NIRS.

Los estadísticos de calibración obtenidos por los diferentes autores son muy variables, pero hay tener en cuenta que una comparación adecuada de los mismos requeriría conocer el número de muestras empleadas, la desviación estándar de los valores de digestibilidad, los errores de laboratorio asociados a los parámetros predictores, etc. Sin embargo, se observa que, de forma general, los modelos de predicción en base a parámetros químicos presentan menores porcentajes de varianza explicada y errores más elevados que los basados en datos de digestibilidad *in vitro*. Del mismo modo, predominan los casos en los que la digestibilidad *in vitro* obtenida por el método de Tilley y Terry ofrece mejores resultados que las técnicas enzimáticas, tanto pepsina-celulasa como neutro detergente-celulasa.

Cuadro 1.- Predicción de la DMO rumi empleando diferentes métodos

Publicación	Alimento/s	Estimador/es	Nº de muestras	R ² calibración	RSD calibración	R ² validación	RSD validación
Aufière y Michalet-Doreau, 1988	Concentrados, forrajes y subproductos	FND	24	0,62	9,20	-	-
		FND LAD		0,79	6,90	-	-
		DvitMS TT		0,87	5,40	-	-
		DenzMO pc		0,94	3,20	-	-
Givens et al., 1989*	Ensilado de hierba	FND	86	0,45	6,77	-	-
		FADM	124	0,55	6,08	-	-
		DvitMO TT	117	0,74	5,00	-	-
		DenzMO pc	55	0,68	4,80	-	-
		DenzMO ndc	85	0,58	5,90	-	-
		LAD		0,52	4,40	-	-
Barber et al., 1990	Ensilado de hierba	DsituMO 48h	122	0,68	3,60	-	-
		DvitMO TT		0,74	3,20	-	-
		DenzMO pc		0,55	4,20	-	-
		NIRS		0,85	3,38	0,73	3,94
		CP		0,37	2,08	-	-
Aufière et al., 1992	Forraje verde de maíz	DvitMO TT	118	0,39	2,06	-	-
		DenzMO pc		0,44	1,96	-	-
		FB		0,50	2,01	-	-
		FB CEN		0,57	1,89	-	-
		DenzMS pc		0,51	1,99	-	-
		DM		0,31	5,25	-	-
Givens et al., 1995*	Ensilado de maíz	FB	106	0,46	4,63	-	-
		FADM		0,46	4,63	-	-
		DenzMO ndc		0,64	3,81	-	-
		FAD		0,59	1,70	-	-
		DvitMO TT		0,65	1,50	-	-
De Boever et al., 1997	Ensilado de maíz	DenzMO pc	50	0,67	1,50	-	-
		NIRS		-	-	0,37	2,81
		NIRS		-	-	0,55	2,00

*Estos trabajos predicen el contenido en materia orgánica digestible (MOD rumi).

Cuadro 1.- Predicción de la DMO rumi empleando diferentes métodos (continuación)

Publicación	Alimento/s	Estimador/es	Nº de muestras	R ² calibración	RSD calibración	R ² validación	RSD validación
Adesogan et al., 1998*	Forraje verde de trigo	CP	12	0,43	3,33	-	-
		DenzMO ndc		0,36	4,32	-	-
		CP	14	0,29	4,45	-	-
		DsituMO		0,33	4,45	-	-
		DvitMO TT		0,39	4,18	-	-
		DenzMO ndc		0,37	4,20	-	-
NIRS	26	0,87	2,10	-	-		
Flores et al., 2003	Ensilado de hierba	FND	197	0,44	5,19	0,43	5,24
		PB FB		0,58	4,53	0,56	4,59
		DvitMO TT	133	0,70	3,79	0,69	3,86
		DenzMO ndc		0,63	4,03	0,62	4,07
		NIRS		0,81	3,30	0,81	3,65
		LAD		0,22	2,76	0,16	2,86
Deaville et al., 2009*	Forraje verde de cereal	LAD PB	65	0,38	2,49	0,31	2,59
		DvitMO TT		0,48	2,25	0,45	2,31
		DenzMO pc	50	0,20	2,80	0,15	2,88
		DenzMO ndc		0,18	2,84	0,12	2,91
		NIRS		0,47	2,27	0,47	2,44
		CEN		0,23	3,58	-	-
DvitMO TT	49	0,28	3,45	-	-		
DenzMO ndc		0,23	3,56	-	-		
NIRS (espectro medio)	94	0,39	2,89	-	3,05		
NIRS (espectro doble)		0,82	1,71	-	1,85		

*Estos trabajos predicen el contenido en materia orgánica digerible (MOD rumi).

En lo referente a las estimas NIRS, en la mayoría de los casos se obtienen resultados comparables e incluso superiores a los obtenidos con ensayos *in vitro*. No obstante, cabe destacar la importancia del número de muestras del colectivo de calibración. Así, en el trabajo de De Boever et al. (1997) se observa que la ecuación NIRS obtenida con 50 muestras sólo explica el 37% de la varianza asociada a la digestibilidad *in vivo* (30 puntos menos que la explicada por la digestibilidad enzimática en el mismo estudio). Sin embargo, cuando se recalcula dicha ecuación aumentando el número de muestras hasta 101, el valor de R^2 aumenta considerablemente (55%). Un fenómeno análogo se describe en el trabajo de Deaville et al. (2009), que recogieron dos espectros por muestra valorada *in vivo*, de forma que el cálculo de la calibración NIRS en base a estos dos espectros por separado, en lugar del espectro medio, supuso aumentar la varianza explicada desde el 39% al 82%. En cualquier caso, ambos trabajos adolecen de aspectos metodológicos esenciales en el desarrollo de calibraciones NIRS robustas en productos agroalimentarios, como son el empleo de un elevado número de muestras y una adecuada validación externa (Garrido et al., 1996). De hecho, autores como Flores et al. (2003), han demostrado que con un número elevado de muestras, la calibración NIRS proporciona mejores resultados que cualquier otro método.

Según lo anterior, las técnicas NIRS resultan adecuadas para predecir parámetros nutritivos como la digestibilidad, siendo su gran limitación la necesidad de disponer de suficientes muestras de referencia valoradas *in vivo*. En consecuencia, es necesario que no se pierda ni una sola muestra valorada *in vivo* en los laboratorios españoles de nutrición animal, siendo un factor imprescindible su conservación en condiciones adecuadas. En el SIA, el sistema adoptado para la conservación de las muestras supone su envasado al vacío en bolsas policapa en base a polietileno y aluminio (Sacoliva, RSI 39-04521/CAT) y su almacenamiento en condiciones controladas en cámara de refrigeración de 4°C.

Por otro lado, entre sus tareas, el SIA está trabajando en el desarrollo de una red de intercambio de muestras, de forma que, partiendo de las bases de datos desarrolladas, sea posible conocer la existencia de muestras valoradas para un determinado parámetro y, en su caso, el laboratorio donde se encuentran y sus condiciones de uso.

Mientras el número de muestras valoradas a nuestra disposición no sea suficiente, una posible forma de abordar la cuestión es la propuesta por Djadi et al. (1995). Dichos autores sugieren una estrategia basada en la predicción NIRS, no de la digestibilidad *in vivo* medida, sino de la digestibilidad *in vivo* estimada a partir de la digestibilidad *in vitro* mediante la inclusión de patrones valorados en cada serie de análisis. Dichos investigadores aplicaron esta técnica sobre una colección de 286 muestras de harina de girasol, entre las que seleccionaron 7 muestras representativas para obtener los datos de

digestibilidad *in vivo*. Estas 7 muestras se incluyeron en todas las series de análisis *in vitro*, calculándose, a partir de sus valores, los datos de digestibilidad *in vivo* estimada para un colectivo de muestras mucho mayor (90). Con estos últimos, se obtuvieron regresiones con parámetros de composición química y con datos NIRS, obteniéndose un porcentaje de varianza explicada mayor (74% frente a 55%) y un error estándar menor (0,97 frente a 1,35) en el caso de la técnica NIRS.

En resumen, como se ha explicado, este método permite multiplicar el número de muestras con datos de digestibilidad.

6.- PERSPECTIVA DE FUTURO

Como hemos visto, tras el desarrollo de los métodos de fraccionamiento de la composición química de los alimentos, su valoración se ha basado fundamentalmente en la estima de los parámetros nutritivos en base a dichas fracciones. Posteriormente, se han desarrollado diversos métodos *in vitro* y en la actualidad se está asistiendo a la sustitución paulatina de las estimas citadas por la medida directa con tecnología NIRS y similares.

Estas tecnologías pueden predecir con mayor rapidez y precisión, y menor coste que los métodos clásicos, diferentes valores nutritivos, por ejemplo la ingestión potencial por un determinado tipo de animales (Goodchild and Treacher, 1993).

Siendo así, cabe esperar que sea posible predecir la respuesta animal resultante del consumo de un determinado alimento. En este sentido, Deaville y Flinn (2000) señalan que los sistemas de evaluación de forrajes y demás alimentos para animales están poniendo el énfasis cada vez más en la caracterización del suministro individual de nutrientes, y no tanto en actual sistema de energía y proteína (poco específico). Por supuesto, esta aproximación requiere de métodos de evaluación más complejos, por lo que según dichos autores, su uso sólo podrá ser general si es posible predecir el flujo de nutrientes con la tecnología NIRS o similares. Por otro lado, investigadores del USDA están estudiando la correlación de la respuesta productiva en condiciones de pastoreo y la señal espectroscópica obtenida de radiómetros portátiles colocados en diferentes puntos de las praderas (Starks et al., 2005). Zhao et al. (2007) han publicado los primeros resultados de este trabajo, mostrando la capacidad de la técnica para predecir biomasa y nutrientes disponibles en el pasto. Este método permite conocer, sin necesidad de muestreo, el momento óptimo de aprovechamiento de una pradera, la carga ganadera o la necesidad de suplementación de un determinado nutriente.

Aún es pronto para señalar el alcance de esta línea de trabajo, pero es posible que en el futuro los sistemas de valoración que venimos utilizando se vean asistidos, cuando no desplazados, por medidas directas como la espectroscopía NIRS, como ya indicaban Garrido et al. (1993; 1996) y Noblet (1994). Desde nuestras primeras aportaciones acerca de la necesidad de colaboración para desarrollar bancos de muestras valoradas han transcurrido ya más de 15 años. En ese tiempo, e incluso menos, otros países como Australia, Irlanda o Finlandia han realizado este mismo esfuerzo, con financiación tanto pública como privada, y son muchos los industriales y ganaderos que ya se benefician de ello a través de la existencia de calibraciones NIRS, para la predicción de datos químicos y nutritivos, construidas con cientos o miles de muestras.

7.- REFERENCIAS

- ADESOGAN, A.T., OWEN, E. y GIVENS, D.I. (1998) *Anim. Feed Sci. Technol.* 74, 259-272.
- ADESOGAN, A.T. (2002) En: *Proceedings of the 13th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium*, pp. 33-47.
- AUFRERE, J. y MICHALET-DOREAU, B. (1988) *Anim. Feed Sci. Technol.* 20, 203-218.
- AUFRÈRE, J., GRAVIOU, D., DEMARQUILLY, C., ANDRIEU, J., EMILE, J.C., GIOVANNI, R. y MAUPETIT, P. (1992) *Anim. Feed Sci. Technol.* 36, 187-204.
- BARBER, G.D., GIVENS, D.I., KRIDIS, M.S., OFFER, N.W. y MURRAY, I. (1990) *Anim. Feed Sci. Technol.* 28, 115-128.
- BAUMONT, R., CHAMPCIAUX, P., AGABRIEL, J., ANDRIEU, J., AUFRERE, J., MICHALET-DOREAU, B. y DEMARQUILLY, C. (1999) *INRA Productions Animales* 12(3), 183-194.
- COLEMAN, S.W. y HENRY, D.A. (2002) *Nutritive value of herbage. Sheep Nutrition*, editado por M. Freer y H. Dove. CABI Publishing, pp. 1-26.
- DE BOEVER, J.L., COTTYN, B.G., ANDRIES, J.I., BUYSSE, J.X. y VANACKER, J.M. (1988) *Anim. Feed Sci. Technol.* 66, 31-45.
- DE BOEVER, J.L., COTTYN, B.G., DE BRABANDER, D.L., VANACKER, J.M. y BOUCQUÉ, C.V. (1997) *Anim. Feed Sci. Technol.* 66, 211-222.
- DEAVILLE, E.R. y FLINN, P.C. (2000) En: *Forage evaluation of ruminant nutrition*, pp. 301-320.
- DEAVILLE, E.R., HUMPHRIES, D.J. y GIVENS, D.I. (2009) *Anim. Feed Sci. Technol.* 149, 114-124.
- DJADI, A., GÓMEZ CABRERA, A. y GARRIDO VARO, A. (1995) *ITEA Producción Animal* 1(6), 63-65.

- DOORENBOS, J., RIJNEN, M., VAN LAAR, H. y FLORES MIÑAMBRES, A. (2004) En: *Actas XX Curso de Especialización FEDNA*, pp. 27-48.
- DOWMAN, M. y COLLINS, F. (1982) *J. Sci. Food and Agric.* 33, 689-696.
- FLORES, G., CASTRO, P. y GONZÁLEZ-ARRÁEZ, A. (2003) En: *Actas XIX Curso de Especialización FEDNA*, pp. 111-131.
- GARRIDO VARO, A., GUERRERO GINEL, J.E. y GÓMEZ CABRERA, A. (1993) En: *Nuevas fuentes de alimentos para la alimentación animal IV*, pp. 243-255.
- GARRIDO VARO, A., GÓMEZ CABRERA, A., GUERRERO GINEL, J.E. y FERNÁNDEZ CABANÁS, V. (1996) En: *Actas XII Curso de Especialización FEDNA*, pp. 275-303.
- GIVENS, D.I., EVERINGTON, J.M. y ADAMSON, A.H. (1989) *Anim. Feed Sci. Technol.* 24, 27-43.
- GIVENS, D.I., COTTYN, B.G., DEWEY, P.J.S. y STEG, A. (1995) *Anim. Feed Sci. Technol.* 54, 55-64.
- GOODCHILD, A.T. y TREACHER, T.T. (1993) En: *Nuevas fuentes de alimentos para la producción animal IV*, pp. 317-323.
- HALLSWORTH, E.G. (1949) *J. Agric. Sci.* 39, 254-258.
- INRA (2007) *Alimentation des bovins, ovins et caprins : besoins des animaux - valeurs des aliments*. Quae Editions. 308 pp.
- JONES, D. y HAYWARD, M. (1975) *J. Sci. Food Agric.* 26, 711-718.
- MAROTO MOLINA, F., GÓMEZ CABRERA, A., GUERRERO GINEL, J.E., GARRIDO VARO, A. y PÉREZ MARÍN, D.C. (2011) *J. Anim. Sci.* 89(3), 882-888.
- McMEEKAN, C.P. (1943) *New Zealand J. Sci. Technol.* 258, 152.
- NOBLET, J. (1994) En: *Actas X Curso de Especialización FEDNA*, pp. 99-117.
- NOBLET, J., SEVE, B. y TRAN, G. (2004) En: *Actas XX Curso de Especialización FEDNA*, pp. 63-75.
- OLFERT, K.A.G. (2003) *Predicting forage nutritive value from height and maturity of alfalfa in Saskatchewan, Canada*. Master thesis. University of Saskatchewan. <http://library2.usask.ca/theses/available/etd-09162003-090836/unrestricted/olfter.pdf>
- ORSKOV, E.R., HOVELL, F.D.D. y MOULD, F. (1980) *Tropical Anim. Prod.* 5, 195-213.
- ROUGHAN, P.G. y HOLLAND, R. (1977) *J. Sci. Food and Agric.* 28, 1057-1064.
- SAINZ, R.D., FERNÁNDEZ, C. y BALDWIN, R.L. (1994) En: *Actas X Curso de Especialización FEDNA*, pp. 227-239.
- STARKS, P.J., BROWN, M.A. y PHILLIPS, W.A. (2005) *A quick way to gauge forage nutrition*. <http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/sep05/forage0905.htm?pf=1>
- TILLEY, J.M.A. y TERRY, R.A. (1963) *J. Br. Grassland Soc.* 18, 104-111.
- TYBIRK, P. (2004) En: *Actas XX Curso de Especialización FEDNA*, pp. 51-59.

ZHAO, D., STARKS, P.J., BROWN, M.A., PHILLIPS, W.A. y COLEMAN, S.W. (2007)
Grassland Science 53(1), 39-49.

FEDNA