

MODELLIZZAZIONE DEI PROCESSI DIGESTIVI DEI RUMINANTI CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'INTESTINO

Antonello Cannas

INTRODUZIONE

Scopo della modellizzazione dei processi digestivi è di migliorare la capacità di previsione delle modalità di conversione dei nutrienti degli alimenti zootecnici in alimenti umani e dell'efficienza con cui avvengono questi processi. In particolare, il miglioramento della capacità di previsione delle modalità con cui i bovini utilizzano gli alimenti consente di migliorarne le prestazioni produttive, riducendo le risorse utilizzate e, allo stesso tempo, le escrezioni fecali ed urinarie e quindi l'impatto ambientale.

La modellizzazione dei processi digestivi storicamente ha determinato lo sviluppo di sistemi di alimentazione (ad es. INRA, 1988; CSIRO, 1990; NRC, 1996; NRC, 2001) che legano l'utilizzazione digestiva degli alimenti ai fabbisogni degli animali. Questi sistemi nel tempo hanno avuto una notevole evoluzione, sia per quanto riguarda la stima del valore nutritivo che quella dei fabbisogni.

Inizialmente i sistemi di alimentazione erano meramente empirici, dotati di scarsa capacità esplicativa e basati su equazioni di regressione che si basavano su semplici relazioni input-output. Un esempio di equazioni di regressione empiriche è dato dalle relazioni, sovente citate in letteratura, che stimano la digeribilità di un alimento sulla base delle sue analisi chimiche:

Alimento → ??? → Feci

Il limite principale di questi sistemi è la loro scarsa flessibilità, cioè capacità di adattarsi a situazioni diverse da quelle nelle quali sono stati sviluppati.

Nell'ultimo decennio sono stati pubblicati alcuni sistemi di alimentazione (ad es. CNCPS, 2000; NRC, 2001) che invece hanno un approccio più meccanico, simulando, almeno in alcune loro componenti, i processi biologici che avvengono negli animali. Prendendo ad esempio il caso prima citato della digeribilità, questi sistemi simulano le modalità con cui avviene la degradazione degli alimenti nel rumine e quindi la digestione dei nutrienti nello stomaco e nell'intestino:

Alimento → RUMINE → STOMACO → INTESTINO → Feci

I sistemi meccanici in genere sono più complessi di quelli empirici e richiedono più informazioni di *input* ma hanno il vantaggio di avere una maggiore capacità esplicativa e di essere più flessibili, e quindi di adattarsi meglio alle specifiche situazioni aziendali, senza fare riferimento alle condizioni "medie" nell'ambito delle quali erano stati sviluppati i sistemi empirici.

In questa presentazione verrà considerata la modellizzazione dei processi digestivi da parte di sistemi fortemente empirici e di sistemi più recenti, che invece hanno almeno alcune componenti meccaniche. I processi digestivi considerati sono quelli ruminali ed intestinali a carico di proteine, aminoacidi ed amidi.

STIMA DELLA QUANTITÀ DI PROTEINA DEGRADATA NEL RUMINE E DELLA PROTEINA DIGERIBILE NELL'INTESTINO.

Lo studio della modellizzazione dei processi digestivi che riguardano le proteine è stato qui basato sull'analisi ed il confronto di due diversi sistemi alimentari, quello INRA (1988), fortemente empirico, e quello CNCPS, che invece è un sistema con diverse componenti meccaniche.

La quantità di proteina vera digerita nell'intestino, chiamata PDI dal sistema INRA (1988), di seguito chiamato semplicemente INRA, e proteina metabolizzabile (MP) dal sistema CNCPS (2000), di seguito chiamato semplicemente CNCPS, è data dalla somma di tre componenti:

- proteina alimentare non fermentata nel rumine (chiamata anche proteina *by-pass* o *escape*) e digeribile nell'intestino;
- proteina microbica (soprattutto batterica) digeribile nell'intestino;
- proteina endogena; quest'ultima, vista la sua relativamente limitata importanza quantitativa, non è considerata dai sistemi INRA e CNCPS.

Stima della proteina alimentare non fermentata nel rumine e digerita nell'intestino

Nel sistema INRA, la quantità di proteina fermentata nel rumine è stimata dividendo le proteine alimentari in due frazioni (Tabella 1). Una frazione solubile (frazione A), completamente fermentata nel rumine, ed una frazione insolubile (frazione B), parzialmente fermentata nel rumine. La degradazione ruminale di quest'ultima è stimata come rapporto fra la sua velocità di degradazione ruminale e la somma della sua velocità di degradazione e velocità di transito (K_p). La velocità di degradazione dipende dalla fonte proteica considerata, mentre la K_p è considerata pari al 6 %/h per tutti gli alimenti e per tutte le categorie e specie animali. Nel sistema INRA la proteina alimentare che arriva all'intestino è pari alla proteina ingerita meno quella degradata nel rumine. La digeribilità intestinale della proteina alimentare varia in funzione dell'alimento considerato. L'INRA riporta la digeribilità intestinale per un gran numero di materie prime.

Nel sistema CNCPS, invece, le proteine sono divise in cinque frazioni a seconda della velocità con cui vengono degradate nel rumine (Tabella 2). Una di queste frazioni (frazione C) è considerata completamente indigeribile sia nel rumine che nell'intestino. La percentuale di ciascuna delle 4 frazioni proteiche potenzialmente fermentescibili effettivamente degradata nel rumine è stimata come rapporto fra la velocità di degradazione di questa frazione proteica e la somma della sua velocità di degradazione e velocità di transito. A differenza del sistema francese INRA, la velocità di transito non è considerata fissa ma variabile. Per i foraggi il CNCPS stima una Velocità di transito che aumenta al crescere del livello di ingestione della SS (kg SS ingerita/peso metabolico) e della percentuale di foraggi nella razione. Per i concentrati considera una velocità di transito pari a quella dei foraggi aumentata di circa il 30%. Nel sistema CNCPS la velocità di transito è influenzata anche dalla lunghezza di trinciatura degli alimenti. Un esempio dell'effetto della velocità di transito sulla digeribilità ruminale della farina di soia è riportato in Tabella 3. E' chiaro al variare della velocità di transito la degradazione ruminale della soia varia in misura notevole, passando dal 77% della proteina ingerita per basse velocità di transito, tipiche di animali con basso livello di ingestione (ad es. vacche in asciutta), al 59% della proteina ingerita in animali con elevate K_p , come vacche al picco di lattazione. Anche nel sistema CNCPS la proteina alimentare che arriva all'intestino è pari alla proteina ingerita meno quella degradata nel rumine. La digeribilità intestinale della proteina alimentare varia a seconda della frazione proteica considerata, essendo pari al 100% per le frazioni proteiche A, B1 e B2, all'80% per la frazione B3, allo 0% per la frazione C.

Stima della proteina microbica digeribile nell'intestino

Il sistema INRA stima la quantità di proteina microbica digeribile nell'intestino in funzione della quantità di proteine batteriche prodotte nel rumine e della loro digeribilità intestinale.

La quantità di proteine batteriche prodotte nel rumine viene stimata con due equazioni differenti, a seconda del fatto che nel rumine l'azoto sia presente in eccesso rispetto ai fabbisogni proteici dei batteri o sia carente. Nel primo caso la quantità di proteine grezze batteriche prodotte nel rumine è considerata pari a 145 g di proteina batterica per kg di sostanza organica fermentata nel rumine. Nel secondo caso la proteina grezza batterica prodotta nel rumine è pari alla quantità di proteine fermentate nel rumine moltiplicata un coefficiente di captazione pari al 90% (nell'ipotesi, quindi, che il 10% della proteina fermentata nel rumine non sia usata dai batteri). In entrambi i casi, la quantità di amino acidi batterici è considerata pari all'80% della proteina grezza batterica, mentre la digeribilità intestinale delle proteine batteriche è ritenuta pari all'80%.

Il sistema CNCPS usa un approccio completamente diverso e più meccanico per stimare la quantità di proteine batteriche prodotte nel rumine e quindi digerite nell'intestino. Questo sistema, infatti, separa i batteri ruminali in due classi, quella che utilizza come substrato principale i carboidrati non strutturali (batteri NSC) e quella che usa preferenzialmente i carboidrati strutturali (batteri SC) (Tabella 4). Le due classi differiscono nei loro fabbisogni azotati ed in quelli energetici di mantenimento, con i batteri SC che hanno fabbisogni energetici di mantenimento tre volte inferiori a quelli dei batteri NSC (Tabella 4). La quantità di batteri prodotta nel rumine è pari alla quantità di carboidrati fermentati nel rumine moltiplicata l'efficienza batterica nell'utilizzare ciascun grammo di carboidrato fermentato. Questa efficienza, a sua volta, diminuisce al crescere dei costi energetici di mantenimento, ed aumenta al crescere della velocità di

degradazione del substrato. Essa, inoltre, è influenzata negativamente dal pH ruminale, stimato dal CNCPS sulla base della quantità di fibra ruminabile (effettiva) apportata dalla razione, e da eventuali carenze ruminali di N stimate dal modello. Il fabbisogno azotato dei batteri è ritenuto pari a 10 g di N per ogni 100 g di carboidrati fermentati. Il CNCPS tiene conto anche della disponibilità di peptidi nel rumine (Tabella 4). Qualora essi siano presenti in quantità inadeguate, si riduce la quantità di proteine batteriche derivate dai batteri NSC, che hanno uno specifico fabbisogno in peptidi. Il flusso dei batteri dal rumine all'intestino è stimato sulla base della Kp dei liquidi. La quantità di proteine batteriche è ritenuta pari al 62,5% del peso dei batteri. Di questa proteina, il 60% è proteina vera, l'altra è costituita da N associato alle pareti cellulari batteriche e da N degli acidi nucleici. Entrambi sono considerati indigeribili o digeribili ma totalmente escreti nelle urine. La digeribilità intestinale delle proteine batteriche è ritenuta dal CNCPS pari all'80%.

Confronto tra sistema INRA e CNCPS

I sistemi INRA e CNCPS differiscono in maniera notevole per le modalità di stima della proteina degradata nel rumine e quindi anche per la stima della proteina alimentare *escape*.

La differenza maggiore riguarda il fatto che il sistema INRA usa un valore fisso, per qualunque dieta o alimento, della Kp, mentre il sistema CNCPS considera un valore di Kp che varia in funzione delle caratteristiche degli alimenti e delle caratteristiche degli animali. L'effetto di questo differente approccio è chiaramente evidenziato dagli esempi riguardanti la farina di estrazione di soia riportati nelle tabelle 1 e 3. Infatti, mentre il sistema francese prevede per questa fonte proteica una degradazione ruminale pari al 69.3% e una quota *escape* pari al 30.7%, il sistema CNCPS prevede una degradazione ruminale che oscilla, a seconda del Kp considerato, dal 77% al 59%, ed una corrispondente quota *escape* che varia dal 23% al 41% della proteina totale della soia. E' chiaro che i valori previsti dal CNCPS comportano effetti, soprattutto in termini di bilancio azotato del rumine e di apporto di aminoacidi alimentari nell'intestino, notevolmente diversi rispetto a quelli previsti dal sistema INRA. Siccome è ormai ampiamente e indiscutibilmente assodato che la Kp degli alimenti non è costante ma varia notevolmente in funzione degli effetti suddetti, il considerare valori fissi di Kp porta a previsioni poco accurate in tutte quelle situazioni nelle quali gli alimenti hanno Kp diverse da quelle previste dal sistema INRA. In effetti, questa frazione potrebbe essere inclusa nei diversi coefficienti di digeribilità intestinale.

Un'altra differenza tra i due sistemi riguarda il fatto che, al di là della numerosità di frazioni considerate, non tiene conto dell'esistenza di una frazione proteica infermentescibile ed indigeribile, la cosiddetta frazione C del CNCPS. Siccome la quota C della proteina è tutta *escape*, a parità di materia prima considerata, la presenza di percentuali variabili di C può determinare un errore nell'INRA.

La percentuale di proteina alimentare *escape* digerita nell'intestino è stimata in maniera molto diversa dai due sistemi. Mentre il sistema INRA usa valori specifici per ciascun alimento, frutto di determinazioni sperimentali, il sistema CNCPS stima la digeribilità intestinale della proteina alimentare sulla base delle frazioni proteiche da essa contenute (ovviamente diverse, nelle proporzioni rispetto alla proteina totale dell'alimento ingerito, a causa della diversa degradazione che ciascuna frazione subisce nel rumine) e della loro digeribilità intestinale (Tabella 2). Di fatto, quindi, il CNCPS ipotizza che la digeribilità intestinale complessiva delle proteine di un qualunque alimento vari in funzione dell'entità della degradazione subita nel rumine (che determina una diversa proporzione fra le varie frazioni proteiche della proteina *escape* a seconda del Kp considerato), il sistema francese considera un unico valore per ciascun specifico alimento, a prescindere dalle condizioni in cui esso è utilizzato.

Un'altra grande differenza riscontrabile tra i due sistemi riguarda l'efficienza microbica, cioè la quantità di batteri prodotti nel rumine per quantità di substrato fermentato. Le numerose determinazioni sperimentali effettuate per stimare l'efficienza microbica dimostrano come essa vari notevolmente a seconda delle condizioni. Ad esempio, Subba (1987) riporta oscillazioni da 80 a 375 g di PG microbica/kg di SO fermentata nel rumine. Nonostante ciò, il sistema INRA, come la maggior parte dei sistemi alimentari sinora pubblicati (inclusivo quello dello CSIRO, 1990), adotta un valore fisso di efficienza. Il CNCPS, invece, tiene conto di almeno una parte dei fattori di variabilità che notoriamente condizionano l'efficienza batterica, quali l'esistenza di diverse classi batteriche, la velocità di degradazione del substrato rispetto ai fabbisogni di mantenimento dei batteri, la quantità di peptidi presenti nel rumine, il pH ruminale, la disponibilità di N nel rumine.

I due sistemi differiscono anche riguardo alla quantità di proteine vere contenute nelle proteine batteriche (INRA = 80%; CNCPS = 60%) e alla loro digeribilità intestinale (INRA = 80%; CNCPS = 100%). Tuttavia, la quantità di proteine vere digeribili nell'intestino (proteine vere contenute nelle proteine

batteriche x loro digeribilità intestinale) è stimata con valori simili dai due sistemi (INRA = 80% x 80% = 64% della proteina batterica; CNCPS = 60% x 100% = 60% della proteina batterica).

FLUSSO DI AMINO ACIDI ESSENZIALI NELL'INTESTINO E LORO DIGERIBILITÀ

Il flusso di amino acidi (AA) essenziali e non essenziali nell'intestino è stimato dall'INRA con delle procedure descritte in dettaglio da Ralquin et al. (2001). Sostanzialmente, la quantità di ciascuno degli AA di origine alimentare che arriva nell'intestino è stimata moltiplicando la PDIA per la concentrazione in AA della proteina degli alimenti di partenza, ipotizzando che la stessa sia uguale alla concentrazione in AA della PDIA (e cioè che gli AA alimentari siano degradati nel rumine in maniera proporzionalmente uguale) (Tabella 6). Gli AA microbici digeriti nell'intestino sono stimati moltiplicando la quantità di PDI di origine batterica (PDIME o PDIMN; Tabella 1) per la sua concentrazione di ciascun AA. La concentrazione in AA dei batteri è considerata costante per tutte le specie batteriche e deriva da misurazioni effettuate su batteri della fase liquida (Tabella 5). Ralquin et al. (2001) hanno validato le stime sul flusso di AA ottenute con questa procedura, confrontandole con determinazioni sperimentali. Sulla base delle differenze fra valori previsti ed osservati gli stessi autori hanno calcolato delle equazioni di regressione empiriche, specifiche per ogni AA, che consentono di migliorare le stime del modello (Tabella 5).

L'approccio utilizzato dal CNCPS è sostanzialmente simile (Tabella 6), salvo che:

- a) la composizione in AA delle proteine alimentari che non vengono degradate nel rumine ed arrivano nell'intestino è considerata diversa da quella dell'alimento intero, per cui per ogni alimento il sistema considera composizioni in AA della quota *escape* diverse dalla composizione in AA dell'alimento intero;
- b) la stima degli AA batterici assorbiti nell'intestino è basata sulla concentrazione in AA del citoplasma batterico e non quella di tutte le proteine batteriche. Ciò perché il CNCPS considera gli AA associati alle pareti cellulari come indigeribili;
- c) non vengono effettuate correzioni empiriche sulle stime prodotte dal modello.

Confronto tra sistema INRA e CNCPS sulla modellizzazione del flusso di amino acidi essenziali nell'intestino e della loro digeribilità

Nel sistema INRA la concentrazione in AA dell'alimento è misurata sull'alimento intero mentre nel sistema CNCPS sulla sua quota *escape*. E' difficile dire quale dei due sistemi sia più corretto. In effetti, gli stessi Ralquin et al. (2001) hanno evidenziato come l'incubazione nel rumine di farine proteiche porti ad una degradazione più spinta di alcuni AA. Tuttavia, questi autori ritengono che non vi siano informazioni sufficienti per adottare profili aminoacidi della quota indegradata diversi da quelli dell'alimento intero. Recenti lavori del gruppo Cornell (Tedeschi et al, 2001) hanno comunque evidenziato come, almeno nei foraggi, le differenze in concentrazione AA tra alimento intero e sua quota *escape* siano molto limitate.

Un'altra importante differenza tra i due sistemi riguarda la stima dell'apporto di AA batterici, che è riferita alla composizione AA del citoplasma batterico per il CNCPS, ai batteri "interi" per l'INRA. Per alcuni AA le differenze tra AA citoplasmatici e della parete cellulare sono rilevanti (Tabella 7) e probabilmente meritano di essere considerate. In ogni caso, entrambi i sistemi considerano la composizione in AA dei batteri costante, benché sia noto come la composizione in AA dei batteri vari notevolmente in funzione delle condizioni ruminali e delle specie batteriche prevalenti. Tuttavia, non esistono dati sufficienti per portare ad un modello di previsione specifico.

Un'altra limitazione di entrambi i sistemi riguarda il fatto che la composizione di AA dei batteri usata nei due modelli fa riferimento a dati ottenuti prevalentemente sui batteri liberi nella fase liquida, che tuttavia non costituiscono più di un terzo del totale dei batteri ruminali. Questo per la difficoltà che indubbiamente esiste nello separare i batteri che aderiscono alle particelle alimentari dalle stesse particelle. Inoltre, nessuno dei due sistemi considera l'apporto in AA che deriva dalla digestione intestinale di protozoi ruminali.

Infine, i sistemi INRA e CNCPS non considerano l'apporto di AA derivante dalla digestione delle proteine endogene, che secondo il sistema NRC (2001) hanno invece una certa importanza quantitativa.

Il sistema più diffuso per stimare la quantità di amidi che fermentano nel rumine e la quota *escape* che raggiunge l'intestino è sicuramente quello che si basa sulla ripartizione dell'amido stesso in una frazione solubile ed in una insolubile. Questo sistema è stato ripreso, tra gli altri, da Nocek e Tamminga (1991) e da Sauvant et al. (1994). In questa pubblicazione verrà confrontata la metodologia proposta da Sauvant et al. (1994). Con questa metodologia la quantità di amido fermentata nel rumine, e di conseguenza la sua quota *escape*, può essere stimata se si conosce la percentuale di amido solubile ed insolubile e la velocità di degradazione di quest'ultima frazione (Tabella 8). I dati relativi alle diverse fonti amilacee necessari per i calcoli sono frutto di sperimentazioni condotte *in situ* (nel rumine) utilizzando la tecnica dei *nylon bags*. La Kp considerata da questi autori è generalmente pari al 6%, anche se volendo si possono usare valori specifici per ciascuna situazione. Per tener conto delle sensibili sottostime osservate confrontando la metodologia *in situ* con i dati *in vivo* relativi a fonti amilacee a bassa fermentescibilità (Nocek e Tamminga, 1991; Sauvant et al., 1994), Sauvant et al. (1994) hanno proposto di correggere i dati *in situ* con un'apposita equazione di regressione (Tabella 8). Sauvant et al. (1994) stimano la digeribilità intestinale con un'equazione sviluppata da Nocek e Tamminga (1991) (Tabella 8). Questa equazione riduce la digeribilità intestinale dell'amido al crescere del suo *escape* ruminale. Essa, tuttavia, è stata sviluppata per razioni miste e non per singole materie prime.

Il CNCPS stima la quota di amido degradato nel rumine e l'amido *escape* con un approccio simile a quello visto per le proteine. Infatti, i carboidrati sono divisi in cinque classi in funzione della loro velocità di degradazione ruminale (Tabella 9). L'amido fa parte, assieme alle pectine, della frazione B1. Il sistema CNCPS considera per questa frazione velocità di degradazione molto variabili, a seconda della fonte amilacea considerata e dei trattamenti fisici subiti. La percentuale di amido effettivamente degradata nel rumine dipende dalla Kp, che è stimata con le stesse equazioni viste per le proteine (Tabella 2). La digeribilità intestinale è quindi stimata ipotizzando una digeribilità media dell'amido pari al 75%. Tuttavia, lo stesso sistema suggerisce di considerare valori diversi a seconda della materia prima considerata e del trattamento fisico subito. Ad es., per la granella di mais il sistema CNCPS consiglia coefficienti di digeribilità intestinale che variano dal 50-70% per la granella spezzata al 92-97% per quella fioccata.

Differenze tra i due sistemi e loro principali limitazioni

Le principali differenze tra i due sistemi riguardano il fatto che il CNCPS non tiene conto della presenza nell'amido di almeno due diverse frazioni nutrizionali, una solubile, fermentata molto velocemente, ed una insolubile, con velocità di degradazione variabile a seconda della fonte amilacea considerata. Il sistema *in situ*, invece, tiene conto dell'esistenza di queste due frazioni, anche se assume che la quota solubile sia tutta digeribile nel rumine, mentre sembrerebbe che parte di essa arrivi comunque all'intestino (Nocek e Tamminga, 1991). Il sistema *in situ* sottostima marcatamente la degradabilità ruminale delle fonti amilacee a bassa fermentescibilità, tanto da richiedere l'adozione di apposite equazioni di correzione.

Entrambi i sistemi soffrono di due gravi limitazioni. Per prima cosa, stimano in maniera del tutto empirica, usando coefficienti od equazioni derivanti da specifiche prove sperimentali, la digeribilità intestinale degli amidi e l'effetto dei trattamenti fisico-chimici applicati agli alimenti. Ciò significa che non sono in grado di stimare, se non per similitudine, la digeribilità intestinale di amidi derivanti da materie prime non studiate o di tener conto dell'effetto di trattamenti fisico-chimici applicati con modalità diverse da quelle studiate. In aggiunta, il CNCPS non tiene conto della relazione inversa esistente tra flusso intestinale di amidi e loro digeribilità intestinale. Per seconda cosa, entrambi i sistemi non sono in grado di separare la quota di amido digerita nell'intestino tenue da quella fermentata nel crasso. L'amido viene digerito nell'intestino tenue producendo glucosio, che viene quindi utilizzato dall'animale come combustibile energetico o come precursore del lattosio nella sintesi del latte. L'amido fermentato nell'intestino crasso, ed in particolare nel colon, produce invece acidi grassi volatili, che hanno un destino simile a quelli del rumine, con perdita, tra le altre cose, di notevoli quantità di energia. Pertanto, gli effetti nutrizionali dell'amido sono ben diversi a seconda che esso venga digerito nel tenue o fermentato nel colon. Gli stessi Nocek e Tamminga (1991) hanno evidenziato come al crescere della quota *escape* di amido diminuisca linearmente la digeribilità nell'intestino tenue dello stesso amido. Ciò probabilmente dipende dal fatto che la sintesi di amilasi pancreatica è parzialmente inibita, con un meccanismo di feedback negativo, dalla presenza di elevate quantità di amidi nell'intestino stesso e dal fatto che i sistemi enzimatici deputati all'assorbimento del glucosio nei ruminanti vengono saturati a concentrazioni molto più basse di quelle osservate nei monogastrici. Questa limitazione nella capacità di previsione dei due sistemi è particolarmente grave, perché

quantità eccessive di amidi che fermentano nel crasso rappresentano, oltretutto una perdita energetica, anche un rischio per la corretta funzionalità e la sanità dell'intestino, come chiaramente evidenziato da altre comunicazioni di questo convegno. Per evitare queste situazioni sarebbe opportuno sviluppare appropriati modelli di stima.

CONCLUSIONI

Negli ultimi decenni i sistemi nutrizionali hanno subito una notevole evoluzione, passando da approcci meramente empirici a modelli empirico-meccanici. L'analisi ed il confronto di alcuni dei più importanti sistemi di stima dei processi digestivi ha evidenziato notevoli differenze concettuali, che si manifestano con sostanziali differenze numeriche, fra i diversi sistemi. In ogni caso, mentre la modellizzazione delle fermentazioni ruminali ha sicuramente raggiunto gradi di complessità ed accuratezza piuttosto elevati, nel caso dei processi digestivi intestinali i modelli di stima sinora utilizzati sono ancora meramente empirici e semplicistici. Questi modelli non sono in grado di tener conto delle numerose variabili che influenzano la digeribilità intestinale degli alimenti. Inoltre, essi non sono capaci di effettuare stime che consentano di sapere quante proteine ed amidi sono digerite nell'intestino tenue e quante fermentate nel crasso. E' chiaro, quindi, che per migliorare la capacità previsionale e l'accuratezza dei sistemi di alimentazione nei prossimi anni dovrà essere fatto un grande sforzo per sviluppare modelli meccanici capaci di simulare accuratamente i processi digestivi intestinali.

BIBLIOGRAFIA

CSIRO. Standing Committee on Agriculture. Ruminants Subcommittee. 1990. «Feeding standards for Australian livestock». Ruminants. CSIRO Publications, East Melbourne, Australia.

FOX, D.G., TEDESCHI, L.O. 2003. Predicting dietary amino acid adequacy for ruminants. In «Amino acids in animal Nutrition». CAB International, London: 389-411.

FOX, D.G., TYLUTKI T.P., PELL A.N., VAN AMBURGH M.E., CHASE L.E., PITT R.E., RASMUSSEN C.N., TEDESCHI L.O., DURBAL W.M. 2000. The Net Carbohydrate and Protein System for evaluating herd nutrition and nutrient excretion: model documentation. *Animal Science Department Mimeo 213*, Cornell University, Ithaca NY.

INRA. 1988. «Alimentation des bovins ovins et caprins». Ed. R. Jarrige. INRA, Paris.

NRC. 1996. «Nutrient requirements of beef cattle». Seventh Revised Ed. National Academy Press, Washington D. C.

NRC. 2001. «Nutrient requirements of dairy cattle». Seventh Revised Ed. National Academy Press, Washington D. C.

NOCEK, J.E. TAMMINGA, S. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J.Dairy Sci.* 74:3598-3629.

SAUVANT, D., CHAPOUTOT, P., ARCHIMEDE, H. 1994. La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *Prod.Anim.* 7:115-124.

SUBBA, D. B. 1997. «Purine nitrogen index, a possible parameter for rapid feed evaluation in ruminants». M.Sc. Thesis, Department of Agriculture, University of Aberdeen.

TABELLA 1

Stima della percentuale di proteina degradata nel rumine secondo INRA (1988).

PROTEINA DEGRADATA NEL RUMINE E PROTEINA *ESCAPE*

$$\text{Deg} = A + B \frac{Kd_B}{Kd_B + Kp}$$

dove:

Deg = (% PG) = PG degradata nel rumine

1-Deg = (% PG) = PG non degradata nel rumine

KdB = velocità di degradazione della frazione B

Kp = 6 %/h per tutti gli alimenti

A (% PG) = PG degradata istantaneamente nel rumine (NPN e proteina vera solubile)

B (% PG) = Degradate più lentamente nel rumine (proteina insolubile citoplasmatica, proteina associata alla fibra)

C (% PG) = Non disponibile nel rumine

Esempio per farina di estrazione di soia 44 (49% di PG sul secco)

$$\text{Deg} = 22.5 + 76.8 \frac{9.4}{9.4 + 6} \quad \text{Deg} = 22.5 + 76.8 \times 0.61 = 69.35$$

Kp = 6 %/h KdB = 9.4 %/h

A = 22.5% PG B = 76.8% PG C = 0.7% PG

Degradata nel rumine = 69.35% della PG

1- Degradata (*escape*) = 1 - 0.6935 = 0.3065 = 30.65%

PROTEINA VERA DIGERIBILE NELL'INTESTINO (PDI)

PDI (g/kg) = PDIAalim + PDIMEmicro (o PDIMN)PDIA (alim) (g/kg) = [PG x 1.11 x (1- Deg)] x 1.0 x dr

PDIME (N in eccesso rispetto ai fabbisogni batterici) (g/kg) = [0.145 x FOM] x 0.8 x 0.8

PDIMN (N carente) (g/kg) = [PG x (1-PDIA) x 0.9] x 0.8 x 0.8

Deg = proporzione (rispetto all'unità) di PG teoricamente degradata rumine (kp = 6%)

1.11 = fattore di correzione per tener conto del fatto che le stime di Deg effettuate dal sistema, basate su studi che usano la tecnica delle nylon bags in situ, sono del 10% più elevate dei valori reali

1.0 = indica che il 100% della proteina che lascia il rumine indigerita è costituita da amino acidi

dr = digeribilità intestinale alimento (varia con l'alimento)

0.145 (g di PG/kg FOM) = proteina microbica che arriva nell'intestino

FOM (kg/kg SS) = SO fermentescibile nel rumine (SO digeribile nel complesso dell'apparato digerente – estratto etero della razione – prodotti di fermentazione da insilati – proteina *escape*)

0.8 e 0.8 = proporzione di AA nella PG batterica e loro digeribilità intestinale

TABELLA 2

Stima della percentuale di proteina alimentare degradata nel rumine ed escape secondo il CNCPS (2000).

CNCPS - FRAZIONI PROTEICHE ALIMENTI E LORO kd

A = azoto non proteico ; $K_d = \infty$; $k_d \gg k_p$

B₁ = proteina vera citoplasmatica solubile; $K_d = 175-300$ %/h ; $k_d > k_p$

B₂ = proteina vera citoplasmatica insolubile; $K_d = 5-12$ %/h ; $k_d \approx K_p$

B₃ = proteina vera associata parete cellulare, potenzialmente digeribile; $K_d = 0.15-2$ %/h; $k_d \approx K_p$

C = proteina associata ADF, indigeribile; $K_d = 0$

PROTEINA ALIMENTARE DEGRADATA NEL RUMINE E PROTEINA ESCAPE

La % di una certa frazione proteica (ad es. fraz. B₁) di un certo alimento fermentata nel rumine è pari a:

$$\text{Degradabilità ruminale B1} = \frac{K_{d_{B1}}}{K_{d_{B1}} + K_p}$$

La % di una certa frazione proteica (ad es. fraz. B₁) di un certo alimento che lascia il rumine indigerita è pari a: **UIP B₁ = 1- Diger. Ruminale B₁**

K_d = velocità di degradazione (%/h) fraz. B₁ di un certo alimento

K_p = K_p (%/h) dell'alimento in cui la frazione B₁ è contenuta; varia in funzione di molti fattori

– livello di ingestione SS (% peso metabolico)

– % di foraggi nella razione

– tipo di alimento = equazioni separate per foraggi, concentrati e fase liquida rumine

– dimensione fibra (peNDF)

PROTEINA ALIMENTARE ESCAPE DIGERITA NELL'INTESTINO

La digeribilità intestinale della proteina *escape* è considerata pari a: 100% per le frazioni proteiche A, B₁ e B₂; 80% per la frazione B₃; 0% per la frazione C.

TABELLA 3

*Esempio di stima della degradazione ruminale di proteina di farina di estrazione di soia al variare della velocità transito secondo il CNCPS (2000) *.*

	Velocità degradazione (%/h)	Velocità transito (%/h)			
		3	5	7	9
Proteina veloce B1	230	98.7	97.9	97.0	96.2
Proteina media B2	11	78.6	68.8	61.1	55.0
Proteina lenta B3	0.2	6.3	3.8	2.8	2.2
Digeribilità rumin. totale PG		77	69.5	63.6	59.0

* Frazioni proteiche della farina di estrazione di soia (% della PG): A = 9.0% B₁ = 9 % B₂ = 75.0% B₃ = 3.0% C = 4.0%.

TABELLA 4

Stima della quantità di proteine batteriche digerite nell'intestino secondo il CNCPS (2000).

Sintesi microbiche divise per 2 classi di batteri:

Batteri NSC:

- fermentano zuccheri semplici, amidi, pectine—substrati con Kd alto
- fabbisogni di mantenimento alti: 0.15 g CHO/g batteri x ora
- Usano peptidi o NH₃ come fonte N
- Sino a 2/3 dei fabbisogni coperti da peptidi

Batteri SC:

- fermentano fibra (cellulosa, emicellulose)—substrati con Kd basso
- fabbisogni mantenimento bassi: 0.05 g CHO/g batteri x ora
- usano solo NH₃ come fonte N

PRODUZIONE BATTERI DA UNA CERTA FRAZIONE DI CARBOIDRATI

$$\text{Prod. Batteri (g/d)} = S \times Y \times (1 + \text{Pept}_{\text{ADJUST}})$$

S = substrato carboidrati fermentato (g/d)

Pept_{adjust} = correzione per tener conto dell'effetto della disponibilità ruminale di peptidi, che favoriscono le sintesi batteriche da NSC

$$Y = \text{efficienza batteri (g batteri/g CHO)} \rightarrow \frac{1}{Y} = \frac{m}{Kd} + \frac{1}{Y_{\text{MAX}}}$$

Y_{MAX} = efficienza crescita max teorica 0.05 g batteri/ g CHO

- ridotta del 20% per tener conto di predazione protozoi
- diminuisce se il pH ruminale diminuisce

m = fabbisogno di mantenimento dei batteri (g CHO/g batteri x ora)

- Il flusso dei batteri dal rumine all'intestino stimato sulla base della Kp dei liquidi
- Fabbisogno di N dei batteri prodotti da fermentazione CHO = 10 g di N per 100 g di batteri
- Se N nel rumine è carente, diminuisce sintesi batteriche e kd
- Composizione batteri = 62.5% PG, di cui il 60% è proteina vera (il restante N non è metabolizzabile)
- Digeribilità proteina batteri nell'intestino = 100%

TABELLA 5

Stima del flusso intestinale di amino acidi (AA) secondo INRA (1988) e Ralquin et al. (2001).

Flusso intestinale di aminoacidi (ad es. Met):

$$\text{MetDI}_f = \text{Ingestione SS}_f \times [(\text{PDIAalim}_f \times \text{MetAlim}_f) + (\text{PDIME (o PDIMN) micro}_f \times \text{MetMicro})]$$

- MetDI_f (g/d) = flusso di metionina digeribile nell'intestino derivante da un certo alimento f
- Ingestione SS_f (g/d) = ingestione di SS dell'alimento f
- PDIAalim_f , $\text{PDIME (o PDIMN)micro}_f$ = concentrazione di PDIA e PDIME (o PDIMN) per alimento f
- $[\text{MetAlim}]_f$, $[\text{MetMicro}]_f$ = concentrazione di MET nella proteina dell'alimento intero f e nei batteri ruminali prodotti dalla fermentazione del medesimo alimento
- La digeribilità intestinale degli AA è considerata pari all'80%
- La concentrazione in AA dei batteri è considerata costante e deriva da misurazioni su batteri della fase liquida.
- La stima del flusso di AA nell'intestino così ottenuta è quindi corretta con equazioni di regressione (una per ciascun AA) empiriche, che si basano su confronti effettuati dagli autori fra dati stimati e dati misurati sperimentalmente. Ad es., per la Met: $\text{MetDI}_f \text{ corretta} = 0.32 + 0.73 \text{ MetDI}_f$

TABELLA 6

Stima del flusso intestinale di amino acidi secondo CNCPS (2000) e Fox e Tedeschi (2003).

Flusso intestinale di aminoacidi (ad es. Met):

$$\text{Abs Met} = \text{Met BCit} \times 0.01 \times \text{RE BTP}_f + \text{Met RUP}_f \times 0.01 \times (\text{REPB1}_f + \text{REPB2}_f + 0.8 \text{ REPB3}_f)$$

- Abs Met (g/d) = quantità totale Met assorbita intestino
- Met BCit (g/100 g) = concentrazione Met in proteina citoplasma batterico RE BTP_f (g/d) = proteina batterica che arriva nel duodeno e che deriva da fermentazione alimento f
- METRUP_f (g/100 g) = concentrazione in Met della proteina *escape* (RUP) dell'alimento f
- $\text{REPB1}_f + \text{REPB2}_f + \text{REPB3}_f$ (g/d) = frazioni B1, B2, B3 della proteina *escape* alimento f
- Digeribilità intestinale AA = 100%

TABELLA 7

Composizione in aminoacidi dei batteri ruminali (g/100 g di proteina) (Fox e Tedeschi, 2003).

Aminoacidi	Parete cellulare	Contenuto cellulare	<u>Batteri Ruminali</u>	
			media	dev. st.
Metionina	2.40	2.68	2.60	0.7
Lisina	5.60	8.20	7.90	0.9
Istidina	1.74	2.69	2.00	0.4
Fenilalanina	4.20	5.16	5.10	0.3
Triptofano	1.63	1.63	-	-
Treonina	3.30	5.59	5.80	0.5
Leucina	5.90	7.51	8.10	0.8
Isoleucina	4.00	5.88	5.70	0.4
Valina	4.70	6.16	6.20	0.6
Arginina	3.82	6.96	5.10	0.7

TABELLA 8

Stima della percentuale di amido degradata nel rumine ed escape stimata col metodo descritto da Sauvant et al. (1994).

DEGRADAZIONE RUMINALE AMIDO ED AMIDO ESCAPE

$$\text{Degradazione teorica AMIDO (DT6; \% dell'amido ingerito)} = A + B \frac{Kd_B}{Kd_B + Kp}$$

Il valore teorico è corretto con l'equazione:

$$\text{Degradazione AMIDO Corretta (DAC; \%)} = 0.483 * DT6 + 45.62$$

Amido escape verso intestino = 1- Dig. Amido corretta

- $Kp = 6 \% / h$ per tutti gli alimenti
- A (% Amido) = amido solubile, degradato istantaneamente
- B (% amido) = amido insolubile, degradato lentamente
- Kd_B (C) (%/h) = velocità di degradazione di B

Esempio per granella di mais (74% amido):

A = 23.4%; B = 76.6%; C = 4.9 %/h; DT6 = 57.9%; DAC = 73.6; quota escape = 26.4%

DIGERIBILITA' INTESTINALE AMIDO

Dig Amido (%) = $-0.728 \times \text{Amido}_{esc} + 87.9$, dove Amido_{esc} è la % di amido escape rispetto all'amido totale

TABELLA 9

Stima della percentuale di amido degradato nel rumine ed escape secondo il CNCPS (2000).

FRAZIONI CARBOIDRATI ALIMENTI E LORO kd

A = zuccheri semplici, acidi organici; $Kd = 175-300 \% / h$; $kd \gg kp$

B₁ = amidi e pectine; $Kd = 25-40 \% / h$; $kd > kp$

B₂ = NDF potenzialmente degradabile; $Kd = 3-6 \% / h$; $kd \sim Kp$

C = lignina e fibra incrostata da lignina, indigeribile; $Kd = 0$

AMIDO DEGRADATO NEL RUMINE E PROTEINA ESCAPE

La % amido (ad es. fraz. B1) di un certo alimento fermentata nel rumine è pari a:

$$\text{Degradazione ruminale effettiva B1} = \frac{Kd_{B1}}{Kd_{B1} + Kp}$$

La % di amido (come frazione B1) di un certo alimento che lascia il rumine indegradata è pari a:

UIP B1 = 1- Degradazione ruminale effettiva B1

Kd = velocità di degradazione (%/h) frazione B1 di un certo alimento

$Kp = Kp$ (%/h) dell'alimento in cui la frazione B1 è contenuta; varia in funzione di molti fattori

Esempio per granella di mais in farina (74% amido):

$Kd_{B1} = 25 \% / h$; $Kp = 6 \% / h$. Degradazione ruminale effettiva = 80.6 %; quota escape: 19.4%.

DIGERIBILITA' INTESTINALE AMIDO (frazione B1) = 75%

- Ampie variazioni in funzione del tipo di alimento e di trattamento subito