

ALIMENTACIÓN NO CONVENCIONAL DE ESPECIES MONOGÁSTRICAS: UTILIZACIÓN DE ALIMENTOS ALTOS EN FIBRA

Lourdes Savón Valdés

Instituto de Ciencia Animal. Km 47½ Carretera Central, San José de las Lajas, La Habana, Cuba.
E-mail: lsavon@ica.co.cu

RESUMEN

La inclusión de fibra dietaria en las raciones de las especies monogástricas, se ha incrementado en los últimos años por la posibilidad de éstos de utilizar esta alternativa alimentaria de bajo costo que no compete con el hombre y contribuye a obtener velocidades de crecimiento satisfactorias. En esta conferencia se analizarán aspectos fundamentales para poder utilizar la fibra eficientemente, entre ellos origen, composición química, contenido de fibra soluble e insoluble, propiedades físico-químicas y su relación con los efectos fisiológicos y microbiológicos bajo estudio en los procesos digestivos, así como el potencial de las fuentes fibrosas en dependencia de la especie, categoría animal y estado fisiológico. Por último, se analizará la contribución energética del alimento fibroso al metabolismo animal y su utilización.

INTRODUCCIÓN

El uso de materias primas alternativas en la alimentación animal para sustituir importaciones y reducir la competitividad con la alimentación humana y preservar el ambiente constituye un reto para los nutricionistas, pequeños y medianos productores en la búsqueda de soluciones para lograr producciones avícolas, porcinas y cunícolas ecológicamente sostenibles y eficientes (Lon Wo 1995, González *et al.* 1999 y Nieves *et al.* 2001). En las zonas tropicales existe disponible una amplia variedad de recursos que son factibles de ser utilizados en la alimentación animal. Entre estas opciones se incluyen los alimentos voluminosos de alto contenido fibroso. Los resultados obtenidos con relación a la

inclusión de estos insumos en las raciones de aves, cerdos y conejos no son muy abundantes y se hallan un poco dispersos. Adicionalmente, estos resultados han sido encaminados a la sustitución parcial de los cereales en experimentos de comportamiento productivo que han propiciado la máxima eficiencia económica, pero no biológica. Sin embargo, hay aspectos que no se han estudiado y se deben analizar detalladamente como son:

- 1) el valor nutritivo y caracterización que es fundamental para utilizar la fibra eficientemente (origen, composición química, morfológica y estructural, propiedades físico-químicas), así como el contenido de factores antinutricionales
- 2) interacción de estos factores y sus efectos en los procesos digestivos y en el fisiologismo animal que pueden limitar su incorporación a las dietas.
- 3) optimización del uso de las fuentes fibrosas (nivel de fibra, especie, raza y categoría animal)
- 4) mejoramiento de su potencial energético y su contribución al metabolismo animal.

El análisis de estos aspectos, las técnicas empleadas en su evaluación, los retos que implica la utilización de fuentes alternativas altas en fibras en las dietas de especies monogástricas, los métodos para mejorarlas y sus perspectivas futuras constituyen los objetivos de esta conferencia.

¿CÓMO VALORAR LA UTILIZACIÓN DE UNA FUENTE ALTA EN FIBRA EN LA ALIMENTACIÓN DE MONOGÁSTRICOS?

Según Rodríguez (1994) para incluir cualquier materia prima alternativa en la práctica productiva es necesario conocer las

características analíticas del producto, su repercusión en la fisiología digestiva del animal y mediante técnicas adecuadas EVALUAR / INTERACTUAR / MODIFICAR / REEVALUAR el producto sucesivamente hasta lograr que sea óptimamente aprovechado.

La evaluación de una fuente alta en fibra comprende la determinación de su valor nutritivo y la caracterización de su fracción fibrosa. En el Cuadro 1 se muestra la composición bromatológica de algunos follajes de leguminosas, gramíneas y otras plantas, así como residuos de cosecha agrícolas.

Además se ha señalado que la composición bromatológica de estos productos fibrosos no refleja su valor nutritivo potencial. Los factores que se han asociado con la disminución de la calidad nutricional de estas fuentes y por tanto de su utilización son: la presencia de "fibra dietética" y los denominados factores antinutricionales. A continuación haremos una revisión detallada de éstos aspectos.

¿QUÉ ES LA FIBRA DIETÉTICA?

Se puede considerar que las paredes celulares de las plantas son las fuentes principales de consumo de fibra dietética en la mayoría de los alimentos. Ello permite definir la fibra desde el punto de vista nutricional como una fracción heterogénea cuyos componentes son resistentes a la actividad enzimática del tracto gastrointestinal (Tropel 1976). Otros autores prefieren una definición más próxima a la

fisiología de la planta, así la fibra comprenderá a los polisacáridos y la lignina que pertenece a la pared celular. A pesar de numerosas investigaciones, no se ha obtenido un acuerdo universal. De hecho esta falta de uniformidad para definir la fibra en los alimentos ya sean para el hombre o los animales se atribuye a la estructura compleja de su pared celular, la que se halla compuesta por varios polímeros. Entre ellos se destacan cinco componentes mayoritarios: Los polisacáridos estructurales que constituyen las paredes celulares de los vegetales que son los homopolisacáridos (celulosa) y heteropolisacáridos (hemicelulosa y pectina) y que forman los carbohidratos insolubles llamados polisacáridos no almidones, las gomas (polisacáridos de reserva) y la lignina, compuesto fenólico que une los grupos anteriores. También se hallan presentes alginatos, xiloglucanos, dextrana, inulina, glucanos y polisacáridos no sintéticos, así como pequeñas cantidades de proteína, polifenoles de alto peso molecular, cutinas, ácido fítico y almidón resistente (Penago 1993 y Pólit 1996) (Figura 1). Es más, la estructura química, así como la organización de los polímeros en la pared difiere ampliamente de acuerdo con el origen botánico de la planta (por ejemplo leguminosa o gramínea).

Básicamente, la pared celular de la planta está compuesta de microfibrillas de celulosa que forman un fuerte enrejado que le da rigidez a la planta. Estas microfibrillas están embebidas en una matriz compuesta

Cuadro 1. Composición bromatológica de las fuentes fibrosas (% MS)

Fuente fibrosa	Indicadores						Autores
	MS	PB	PV	FB	EE	Cz	
Follaje leguminosas							
<i>Vigna unguiculata</i>	-	18,5	14,0	34,0	2,5	8,5	Díaz (2000);Savón(2004)
<i>Canavalia ensiformis</i>	89,2	22,0	18,7	30,0	2,5	9,5	Díaz (2000);Savón(2004)
<i>Stizolobium aterrimum</i>	86,1	21,7	14,0	30,0	3,9	6,5	Díaz (2000);Savón(2004)
Follaje no leguminosas							
<i>Manihot esculenta</i>	-	24,2	18,2	20,7	6,4	-	Buitrago (1990)
<i>Ipomea batata</i>	-	18,5	-	10,2	3,7	-	Domínguez (1990)
<i>Musa paradisiaca</i>	92,8	9,75	-	42,4	3,8	10,8	García (1996)
Residuos de cosecha							
Harina de cítricos (deshidratada)	86,60	5,6	-	12,2	1,05	-	Ponce de León (1997)
Cáscara de café	88,50	11,20	-	18,9	2,3	12,3	Fialho y Pinto (1997)

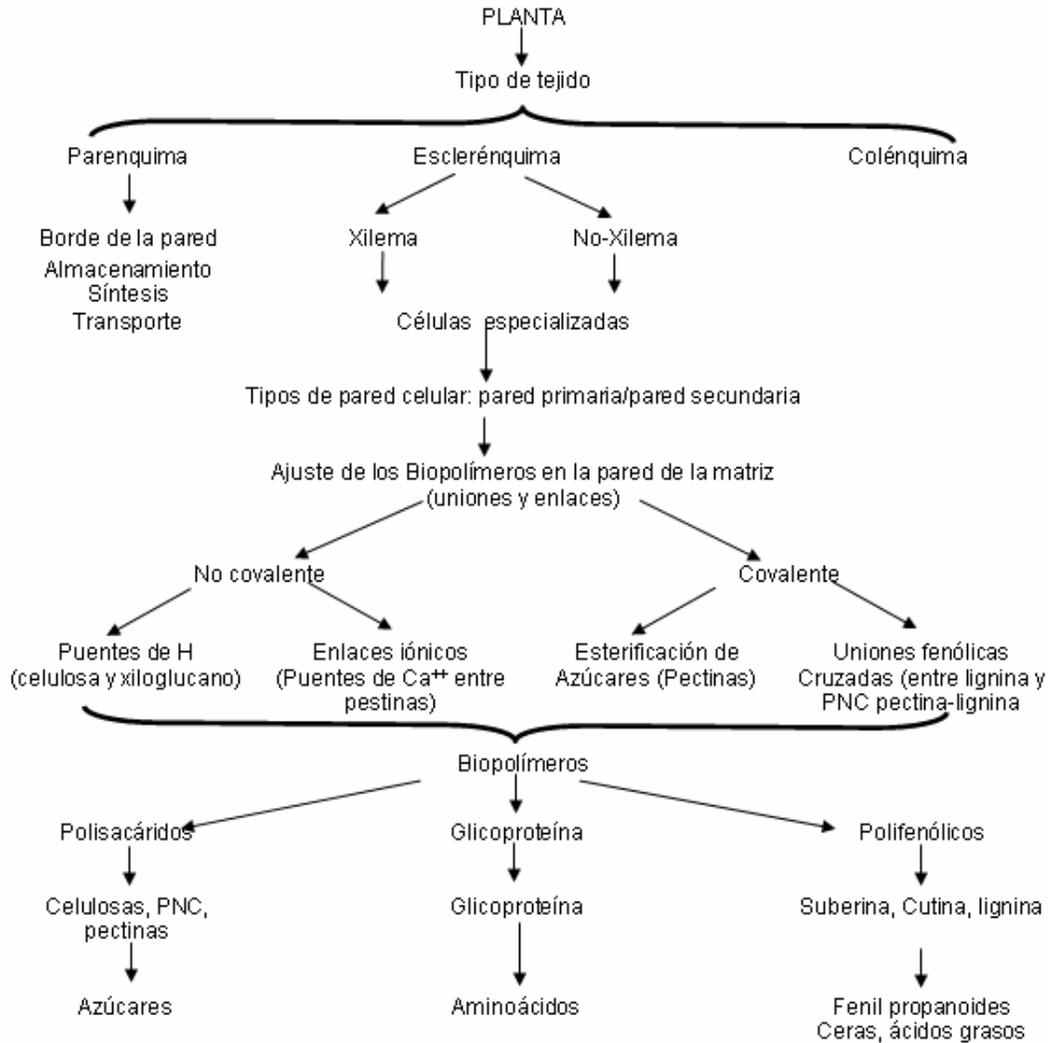


Figura 1. Estructura y composición química de la pared celular de los alimentos (Tomado de McDoughall 1996)

de un enrejado de lignina (unidades de fenilpropano) que cementan otra matriz de polisacáridos (más alguna glicoproteína), tal como hemicelulosas (arabinoxilano, xiloglucano y pectinas). Estos polímeros tienen diferentes proporciones de acuerdo a la estructura de la pared celular. Por ejemplo, a medida que la planta envejece, el enrejado de lignina de la pared secundaria se agranda hacia la pared primaria la que desaparece, incrustando las microfibrillas que conducen a una menor accesibilidad (Figura 2).

Entre los numerosos tipos de polímeros de la pared celular, hay que destacar 4 clases de polímeros insolubles en agua (lignina, celulosa, hemicelulosa y sustancias

pécticas) y una clase de varios polisacáridos no almidones solubles en agua (arabinoxilanos solubles, pectinas y oligosacáridos).

La lignina es el único polímero sacárido de la pared celular. Es un enrejado complejo, ramificado y tridimensional, construido por tres unidades de fenilpropano. La lignina tiende a fijar a otros polímeros en su lugar, excluye el agua y hace la célula más rígida y resistente contra varios agentes como las enzimas bacterianas. La mayoría de los alimentos y los forrajes inmaduros contienen menos del 5% de lignina. Cuando se envejece la pared celular de la planta puede alcanzar hasta 12% en el forraje.

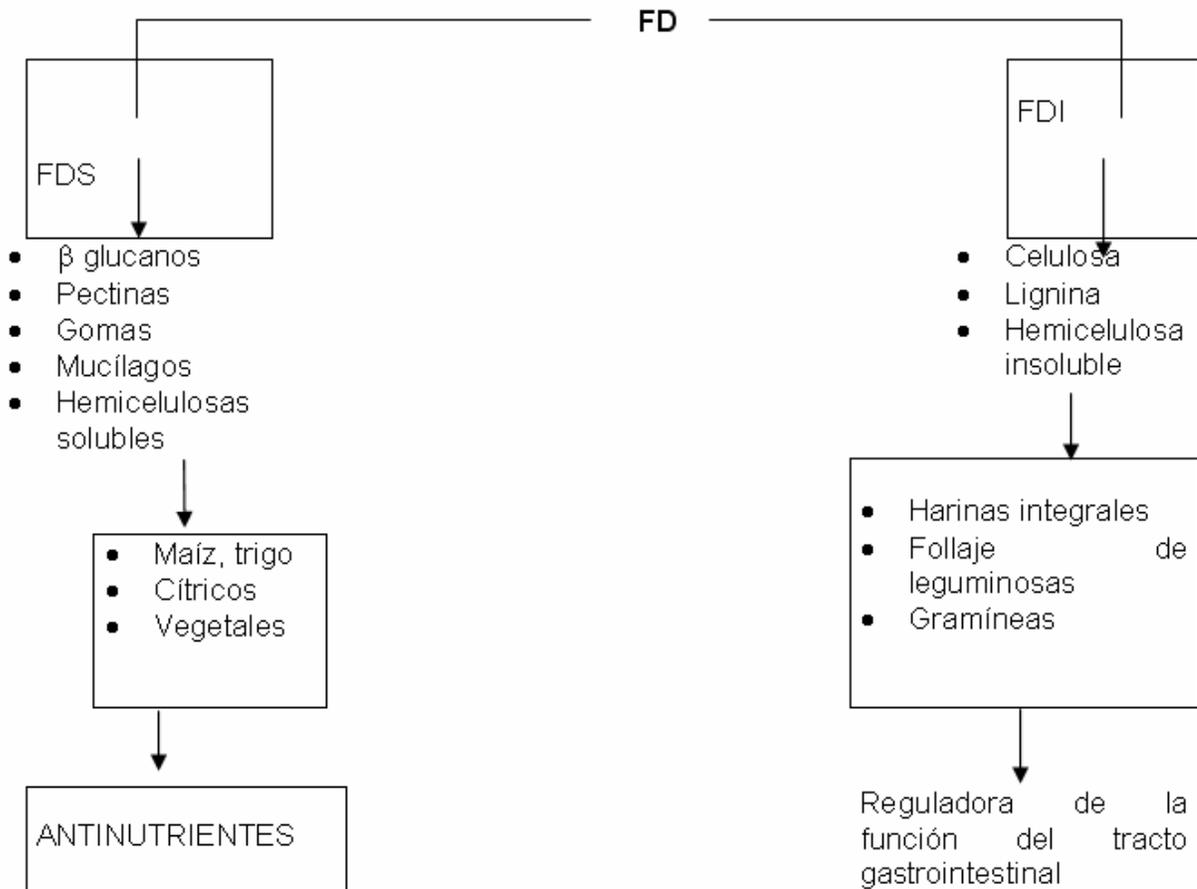


Figura 2. Clasificación de la fibra dietética, fuentes de procedencia y principales efectos fisiológicos (Tomado de Potty 1996)

La celulosa es el mayor polímero estructural de la pared de la planta y el polímero más abundante en la tierra. Es un homopolímero formado por cadenas lineales beta 1-4 unidas a unidades de glucopirasonil. Tiene un grado de polimerización de 8000 a 10000. Las cadenas individuales agregan enlaces de hidrógeno para formar microfibrillas, que sirven como esqueleto de las plantas. La celulosa es soluble y parcialmente hidrolizada en soluciones fuertes de ácido sulfúrico (72%). Representa del 40-50% de las cáscaras de las leguminosas y semillas oleaginosas; 10 al 30% de los forrajes; 3 al 5% de las semillas de leguminosas. La mayoría de los cereales contiene pequeña cantidad de celulosa (1 al 5%) con excepción de la avena (10%).

Las hemicelulosas son un grupo de polisacáridos con menor grado de polimerización que la celulosa. Tiene un esqueleto de beta 1-4 unido a residuos de

xilosa, manosa o glucosa que pueden formar una gran cantidad de enlaces de hidrógeno con la celulosa. Los xiloglucanos son la principal hemicelulosa de las paredes primarias en las plantas dicotiledóneas (en los vegetales y semillas), en tanto que la unión de glucanos mixtos beta 3 – 4 y los arabinoxilanos son las hemicelulosas predominantes en las semillas de cereales (los dos últimos incluyen en parte los polímeros insolubles y solubles en agua). Las hemicelulosas incluyen otros heteropolímeros ramificados entre los que se hallan los arabinogalactanos (en la soya), galactomananos (semillas de legumbres). Cuantitativamente, las hemicelulosas constituyen entre 10 y 25% de la materia seca (MS) de los forrajes y subproductos agroindustriales (afrecho, cáscaras, semillas y pulpas), y alrededor de 2 al 12% de los granos y raíces.

Las pectinas se componen de un esqueleto lineal de ácido poligalacturónico siempre ramificado con azúcares neutros (principalmente arabinosa y galactosa). Este esqueleto lineal se interrumpe de vez en cuando, por unidades de l-ramnosa, lo que conduce a una desviación del eje. Las sustancias pécticas corresponden con varias clases de polímeros, incluyen las pectinas (esqueletos de ramnogalacturanos y cadenas laterales de arabinosa y galactosa) y polisacáridos neutros (arabinanos, galactanos y arabinogalactanos) que se asocian frecuentemente a las pectinas. Las sustancias pécticas se hallan en la capa media de las células de la pared, especialmente en la pared celular primaria (tejidos jóvenes) de las plantas dicotiledóneas. Las pectinas de la capa media sirven en el tejido de las plantas como "goma" cementante que une a las células. Las pectinas se hallan en relativamente alto nivel en las plantas leguminosas y en la pared de los frutos. Una de las principales fuentes de pectinas en la alimentación animal es la pulpa de cítricos y de remolacha. Las plantas leguminosas contienen entre 5 y 10%, por ejemplo la alfalfa. En los cotiledones de las semillas de legumbres, las pectinas totales (insoluble y soluble) alcanzan entre 4 y 14% de la MS, tal como en guisantes y lupino blanco.

Los polisacáridos solubles y oligosacáridos incluyen moléculas con un grado de polimerización que va desde 15 hasta más de 2000 (beta glucanos). La mayoría de ellos son insolubles en agua:etanol 80:20. Se hallan en bajos niveles en los ingredientes de los alimentos animales. Se hallan hemicelulosas solubles tales como arabinoxilanos en trigo, avena y cebada aproximadamente entre 2 y 4% de la MS, betaglucanos en cebada y centeno (1-3% MS), oligosacáridos tales como alfa – galactósidos en lupino, guisantes o semillas de soya (5-8 % de la MS) y sustancias pécticas solubles en pulpas de frutas o remolachas (10% MS).

Así, es importante tener en cuenta que la fibra dietética no es una simple suma de compuestos aislados, sino que es una UNIDAD BIOLÓGICA que según el tipo de

planta o alimento, variará la presencia o proporción en que estos se combinan entre sí; con sus propiedades intrínsecas e influyen de manera importante en la fisiología digestiva de los animales que la consuman.

CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ FIBROSA

La complejidad de la matriz fibrosa de los alimentos ha dificultado su caracterización. En un taller realizado en Holanda 1998 por el proyecto PROFibra de la Comunidad Económica Europea, se planteó que la caracterización de la fibra dietética comprendía el conocimiento de la composición química de los componentes de la pared celular (estructura primaria), de los aspectos estructurales de los polisacáridos constituyentes (estructura secundaria) y la denominada estructura terciaria o arquitectura de la fibra que se refiere a la relación estructura y comportamiento funcional de los componentes de la pared celular y sus efectos fisiológicos. Esta estructura ha sido poco explorada y ello constituye la principal limitación para conocer el comportamiento de la fibra dietética en los alimentos durante el tránsito digestivo.

No obstante, el primer reto a que se enfrentan los fisiólogos para una mejor comprensión acerca del papel de la fibra en las especies monogástricas es encontrar técnicas analíticas apropiadas para estudiar la composición química de la fibra dietaria. Un resumen de los principales métodos utilizados se muestra en el Cuadro 2.

Los métodos enzimáticos gravimétricos y/o enzimático-químico al representar los procesos digestivos que tienen lugar en el tracto, permiten determinar con más exactitud el contenido de fibra dietética en los alimentos.

Por otra parte, en las especies monogástricas la fibra dietética no se clasifica sólo atendiendo a su composición, sino al grado de solubilidad en agua con lo que se asumen los conceptos de fibra dietética soluble y fibra dietética insoluble, composición química de los componentes de la pared celular (estructura primaria), de los aspectos estructurales de los polisacáridos constituyentes (estructura secundaria) y la

Cuadro 2. Métodos utilizados para la determinación de fibra y su especificidad relativa al método de Prosky (1984)

Método	Indicadores determinados	% del nivel teórico estimado				Relación A FD _T
		Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Pectina	
Fibra bruta (Weende, 1887)	Celulosa, lignina, hemicelulosa	75	25	50	0	Menos
Fibra neutra detergente (FDN) (Goering y Van Soest, 1970)	Celulosa, lignina, hemicelulosa, pectina	100	75	100	0	Menos
Fibra ácido detergente (FDA) (Goering y Van Soest, 1970)	Celulosa, lignina, hemicelulosa (-)	100	75	100	0	Menos
Enzimático gravimétrico (Prosky, (1984)	Fibra dietética total soluble e insoluble	Método de referencia				
Enzimático químico (Engliyst, 1989)	Determina y diferencia los polisacáridos de la fibra dietética	100	100	100	100	Más

Fuente: Scheeman (1989) y Savón (1996)

denominada estructura terciaria o arquitectura de la fibra que se refiere a la relación estructura y comportamiento funcional de los componentes de la pared celular y sus efectos fisiológicos. Estas fracciones se caracterizan por tener efectos fisiológicos diferentes (Figura 2), debido a lo cual constituye una necesidad conocer sus componentes cualitativa y cuantitativamente para predecir desórdenes nutricionales y de salud.

La composición química de la pared celular de los alimentos fibrosos pueden variar según la naturaleza y origen de la fibra (Mastrapa et al. 1996 y Savón et al. 1998). Estos últimos, caracterizaron la pared celular de las harinas de follaje tropicales y las compararon con el maíz y la alfalfa, encontraron que la fibra dietética total de las harinas del follaje de plátano y canavalia duplicaba el valor informado para la alfalfa (Cuadro 3).

Otro aspecto fundamental es la determinación de la estructura de los componentes de la pared celular de la fibra. En el caso de los alimentos fibrosos no convencionales es notorio el trabajo realizado en Cuba por Marrero (1998) quien comparó la estructura de la fibra neutro

detergente de la harina de caña con la del maíz y otro producto obtenido por un procesamiento biotecnológico de la harina de caña (Saccharina) mediante microscopía electrónica y procesamiento digital de imágenes. Como resultado, observó que el tipo de fuente y el procesamiento tecnológico influían en la estructura de la fibra. Además, las fuentes no convencionales tuvieron un mayor contenido de esclerénquima, como ha sido descrito en otras harinas y forrajes tropicales, lo cual sugiere un mayor grado de madurez o engrosamiento de la planta, lo que puede hacer menos aprovechable a la harina de caña con respecto al maíz.

En otro experimento, Savón *et al.* (2000) estudiaron los grupos funcionales de la fibra detergente neutro de harina de follaje de *Vigna unguiculata* y la de la harina de follaje de alfalfa y hallaron una gran similitud en las absorciones debido a la presencia de polisacáridos (celulosa) pero las absorciones del grupo éster fueron más intensas en la alfalfa, en tanto que *Vigna unguiculata*, var. Habana82 la presentó para el grupo amida.

Con respecto a la estructura terciaria que determina la relación estructura función de los componentes de la pared celular y sus efectos fisiológicos (Mc Doughall *et al.* 1996),

Cuadro 3. Fraccionamiento de la fibra dietaria en harinas de follajes tropicales

Fuente Fibrosa	FD _{total}	FB	FDN	FDA	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa
Medicago sativa	39,87	-	27,61	25,54	7,75	12,09	5,87
Canavalia ensiformis	74,05	30,0	-	46,17	11,92	35,08	17,46
Lablab purpureum	69,92	32,0	52,79	41,08	12,20	31,07	16,12
Vigna unguiculata							
Variedad Habana 82	48,89	25,5	43,46	38,28	9,9	19,32	14,58
Variedad Trópico	57,81	-	40,13	27,71	6,34	22,12	11,44
Musa paradisiaca	71,08	43,2	68,57	40,64	6,05	-	27,83
Tricantera gigantea	45,26	-	35,33	27,26	10,76	15,61	6,76
Zea mays	28,02	-	27,36	13,20	2,73	13,21	14,16

Fuente: Savón et al. (1999)

el problema se centró en las técnicas físicas disponibles para el estudio de la matriz fibrosa y sus propiedades en el sitio de acción propuesto. En la actualidad se han manejado dos métodos para estudiar la arquitectura de la fibra: el propuesto por Gidley (1998) que utiliza la espectroscopía de resonancia magnética nuclear y el de Chesson (1998) que emplea la adsorción de gas y las técnicas de imágenes. Estos métodos se han investigado en alimentos fibrosos convencionales y hasta el momento no se ha realizado ningún trabajo en fuentes fibrosas no convencionales.

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA FIBRA DIETÉTICA

Los mecanismos específicos por los que la fibra dietética actúa sobre diversas funciones gastrointestinales y metabólicas no han sido totalmente aclaradas y demostradas. Se considera que las propiedades físicas de la FD son una de las causas principales de los efectos fisiológicos que se producen al administrar los alimentos fibrosos a los animales monogástricos. Por ello, la determinación de estas propiedades tiene un valor preponderante, aunque no único, en la predicción de la influencia de las funciones del tracto gastrointestinal de los animales (Ruíz 1999, Southgate 1998).

La calidad de la fibra se modifica considerablemente por sus propiedades físicas, las que pueden ser independientes de su composición química. Factores como tamaño de partículas, volumen, solubilidad y propiedades de superficie como la capacidad de adsorción de agua, capacidad bufferante o tampón, capacidad de intercambio catiónico, viscosidad y fermentabilidad,

pueden influir en procesos biológicos como el consumo y digestión de nutrientes. De ahí, la importancia de su determinación, si se pretende introducir alimentos altos en fibra en la alimentación de aves y cerdos, aunque en la literatura consultada no existe ningún trabajo al respecto.

Savón *et al.* (1999) recopilaron, modificaron y validaron las técnicas para determinar algunas propiedades físico químicas de alimentos fibrosos y las utilizaron en el análisis de fuentes tropicales no convencionales. Los resultados se muestran en el Cuadro 4. En general se observó un aumento del volumen de la fibra y de la capacidad de absorción de agua en las fuentes no convencionales con respecto al maíz, lo que demuestra que estos alimentos tienen menor probabilidad de solubilizarse en agua y su mayor capacidad de adsorción de agua pudiera ser favorable para la fibra, ya que la humedad facilita la hidrólisis de las enzimas celulasas.

En cuanto a las aves y cerdos, las características señaladas podrían afectar el tiempo medio de retención de la digesta, a través de un efecto mecánico o laxativo en el tracto gastrointestinal con un aumento del peso y volumen de las excretas (Sosulski y Cadden 1982, Eastwood 1992).

Además, el aumento del tránsito intestinal provocará una menor absorción de nutrientes y energía (Saura-Calixto 1988). También se halló una disminución de la CIC de las fuentes más voluminosas, lo que se relacionó con la menor composición en fibra dietética soluble con respecto al cereal tradicional y un aumento en el contenido de lignina con menor número de sitios intercambiables libres. Esta característica

Cuadro 4. Propiedades físicas de la fibra dietaria de fuentes fibrosas tropicales

Fuente Fibrosa	Solubilidad %	Volumen mLg ⁻¹	Capacidad adsorción agua, g.g ⁻¹	Capacidad tampón		Capacidad intercambio catiónico meq.gFDN
				meq ácido	meq básico	
Leguminosas						
<i>Medicago sativa</i>	26,5	3,1	7,49	0,53	0,36	-
<i>C. ensiformis</i>	8,66	3,75	9,52	0,53	0,43	-
<i>Lablab purpureus</i>	6,10	4,05	10,29	0,44	0,30	-
<i>Vigna unguiculata</i>						
variedad Habana 82	22	2,35	7,84	0,20	0,02	-
<i>L. leucocephala</i>						
variedad Perú	16,02	1,89	5,52	-	-	5,51
<i>Cajanus cajan</i>	18,58	4,75	6,08	-	-	-
Gramíneas						
<i>B. decumbens</i>	16,55	4,70	7,78	-	-	0,89
<i>S'officinarum</i>						
variedad Jaronú 62	39,00	7,94	6,99	0,64	0,30	0,20
Otras fuentes						
<i>C. pubescens. B</i>	21,32	3,43	6,82	-	-	-
<i>T. gigantea</i>	16,05	3,07	6,89	0,87	0,28	-
<i>Zea mays</i>	49,50	1,71	1,39	-	-	0,63
Harina de cítricos	22,00	2,42	7,45	-	-	-
Alimentos producidos por vía biotecnológica						
Saccharina	23,00	7,01	7,57	0,51	0,33	0,19
Citroína	25,50	2,27	6,53	-	-	-

puede contribuir al incremento del poder tampón de estas fuentes fibrosas en el TGI.

LA FIBRA DIETÉTICA Y SUS EFECTOS FISIOLÓGICOS EN EL TGI

El conocimiento de las propiedades físico químicas de la fibra dietética y sus implicaciones en la fisiología digestiva de los animales permite optimizar su utilización en la dieta. Se ha planteado que la fibra dietética, a través de las propiedades físico químicas de sus componentes solubles e insolubles puede ejercer varios efectos fisiológicos a lo largo del tracto gastrointestinal de las especies monogástricas. La magnitud con que esto tiene lugar depende de la forma física y naturaleza química (fuente y procedencia, tipo de fibra de que se trate, procesamiento a que fue sometida, además de la adaptación y características del animal (edad y peso vivo). Los efectos fisiológicos más importantes son el efecto en el consumo voluntario, en las secreciones digestivas y absorción en el tránsito intestinal y metabolismo lipídico. Un resumen de lo anterior se muestra en el Cuadro 5.

Así, la inclusión de fibra en las raciones de aves y cerdos generalmente produce un incremento en el consumo de alimento para mantener el consumo de energía digestible. Sin embargo, el conocido efecto de limitación en el consumo con altas concentraciones de fibra se atribuye a la voluminosidad de estas raciones y a la capacidad de retención de agua de las porciones solubles de la fibra. Esto último pudiera alterar los estímulos que regulan el consumo de alimento.

Trabajos clásicos de Zebrowska (1983) y Low (1989) refirieron incrementos en las producciones biliares y pancreáticas de los cerdos que recibieron dietas altas en fibra. Las secreciones pancreáticas se acompañaron de una mayor producción de electrolitos y una mayor actividad de las proteasas y amilasas. Los mecanismos por los que pueden influenciar las secreciones digestivas están relacionados con la voluminosidad de la digesta y la capacidad de retención de agua, aunque también se plantea un control hormonal, a través de la secretina.

Ciertos tipos de fibra dietética aumentan la viscosidad de la ración y de los contenidos

Alimentación no convencional para monogástricos en el trópico

Cuadro 5. Propiedades físicas de la fibra dietética y posibles mecanismos involucrados en la modificación de los estados fisiológicos de asimilación.

Proceso fisiológico	Propiedades de la Fibra dietética	Mecanismo de acción
Consumo	Volumen	Mecánico
Velocidad de tránsito	Capacidad de adsorción de agua	Viscosidad
	Dilución energética	Sabor hormonal
	Volumen	Mecánico
Hidrólisis enzimática y absorción	Tamaño de partículas	Viscosidad
	Capacidad de adsorción de agua	hormonal
	Capacidad de adsorción de agua	Viscosidad
	Capacidad de intercambio catiónico	Adsorción hormonal
Actividad microbiana	Arquitectura	hormonal
	Carácter hidrófobo	
	Relación	Velocidad de tránsito
	Hemicelulosa	
	Celulosa	Crecimiento microbiano
	Estructura de la pared celular	
	Capacidad de intercambio catiónico	Potencial fermentativo

Fuente: Graham (1988)

intestinales, ocasionando un incremento en la secreción del nitrógeno endógeno constituido por proteína y DNA. Esto sugiere una exfoliación de las células de la mucosa intestinal debido a una erosión mecánica.

Por otra parte, las fuentes fibrosas pueden alterar el tránsito intestinal en diferentes secciones del tracto gastrointestinal dependiendo de su habilidad para formar geles. Se ha demostrado que la fibra dietética soluble afecta la motilidad intestinal y atrasa el paso de la digesta en el intestino. Esto no parece ofrecer beneficio alguno, ya que sus propiedades hidrófobas y adsorptivas retardan la digestión y absorción de los nutrientes (Periago *et al.* 1993). En tanto, la fibra dietética insoluble puede acelerar el tránsito intestinal. Esta aceleración disminuye el tiempo disponible para la digestión y absorción de nutrientes, por lo que restringe la utilización de los mismos. Así, los efectos de la fibra dietética insoluble (FDI) en la motilidad intestinal, depende de su nivel en la dieta y el tipo de fuente. Un alto consumo, por lo general, reduce el tiempo de tránsito, lo cual se atribuye a un aumento de su motilidad, debido a que las celulosas según Cherbut *et al.* (1994) son las responsables de agrupar las contracciones en el complejo mioeléctrico. Se puede decir que exista una relación directa entre el contenido de FDI en la dieta (principalmente hemicelulosa y

celulosa) y la velocidad a la cual los nutrientes transitan por el TGI.

Además, es necesario considerar que este incremento en el tránsito intestinal por la presencia de fibra se halla íntimamente relacionado con el tamaño de partículas. De manera que una reducción en el tamaño de partículas o el volumen de las fuentes fibrosas disminuye la velocidad de tránsito de la digesta en el TGI del ave.

Para comprobar lo planteado con anterioridad Marrero (1998), realizó un experimento "in vivo" donde evaluó el efecto de las características de la FDN de los alimentos no convencionales altos en fibra (la harina de caña fresca o biofermentada por un proceso biotecnológico sencillo: Saccharina) en la velocidad del tránsito intestinal del pollo de ceba. Se pudo observar efectos del tipo de fuente fibrosa en el TMR de las partículas, el cual disminuyó de manera significativa en la saccharina con respecto a la harina de caña.

Otro aspecto interesante es que en este experimento las dietas fueron formuladas a partir del consumo de FB y como se aprecia en un mismo intervalo de tiempo, el consumo de las fuentes fibrosas varió entre tratamientos (Cuadro 6). Estas variaciones no tuvieron repercusión en la FB, pero sí en la FDN, lo que sugiere la menor idoneidad de la FB, para formular los piensos avícolas,

Cuadro 6. Efecto de las dietas experimentales en el consumo y tiempo medio de retención de los alimentos en el pollo de ceba.

Indicadores	Tratamientos			Sig.
	Almidón, maíz,soya desc.	Almidón,maíz. Harina de caña Soya desc.	Almidón,maíz, Saccharina Soya desc..	
Consumo de MS g/día	114,32 ^c	117,38 ^b	122,02 ^a	***
Consumo de FB g/día	-	7,31	7,60	
Consumo de FDN G/día	-	10,65	12,84	
Excreción de MS (g)	90,72	84,79	86,66	
TMR (horas)	15,05 ^c	16,95 ^a	16,07 ^b	***

ab valores medias con letras distintas en una misma columna son estadísticamente diferentes.

Fuente: Marrero (1998)

sino la necesidad de hacerlo considerando el contenido de FDN en la ración.

La fermentación es otra característica físico química de la fibra que se ha comprobado que desarrolla un efecto fisiológico en el TGI. Se ha observado diferencia en la capacidad de fermentación entre diferentes tipos de fibra. Existe una relación inversa entre la fermentación de la fibra y el volumen fecal. A menor digestibilidad y fermentabilidad se obtendrá un mayor volumen y peso de las heces. La utilización de fibras más degradables con menor retención de agua es favorable para la disminución del volumen fecal, por lo que es necesario conocer la forma física del alimento.

Las dietas ricas en polisacáridos no almidón (PNA) provocan modificaciones en la morfología intestinal, tanto en el cerdo como en las aves. En dependencia de la fuente se puede alterar la longitud y número de vellosidades en el intestino, así como la velocidad de proliferación celular. En el pollo, por lo general, la inclusión de FDS provoca un aumento del recambio celular. La fibra dietaria puede afectar el tamaño y peso del intestino.

El uso de fibra dietética en los piensos de los pollos origina un alargamiento de los ciegos que según Eastwood (1993), es la respuesta de un ajuste fisiológico normal provocado por el aumento de tiempo de permanencia de las fibras en estos órganos,

de la masa microbiana y productos finales de la fermentación.

En investigaciones realizadas por Hansen *et al.* (1992) y Zhao *et al.* (1995) se demostró que los cerdos que consumen dietas altas en fibra presentan un incremento del peso del hígado, riñón y segmentos vacíos del TGI con relación al peso corporal. Estos resultados se han confirmado en dietas no convencionales altas en fibra, tanto en aves como en cerdos en diversos experimentos (Rodríguez 1990, Ly 1995, Marrero 1999 y Savón 2000).

Con relación a las dietas fibrosas y la microflora del TGI de aves y cerdos se ha planteado que en dependencia de la fuente, la presencia de fibra dietética provoca un aumento en la concentración de bacterias celulolíticas, que a la vez se incrementaron a expensas de otros microorganismos (Nicodemus *et al.* 2004). Este comportamiento es el signo más importante de adaptación en la utilización de la fibra. Contrariamente, las bacterias viables pueden no afectarse por la presencia de fibra, según investigaciones realizadas por Rodríguez *et al.* (2000, 2001 y 2005). En general, hay más de 500 especies de bacterias celulolíticas en los ciegos y colon de aves, cerdos y conejos cuya actividad depende de los residuos indigestibles en esta zona, entre los que se encuentran almidones, carbohidratos y grasas (Varel 1987).

En los últimos años se ha señalado la presencia de hongos celulolíticos y protozoos en el intestino grueso de especies

monogástricas que reciben dietas fibrosas. Al respecto, Rodríguez (1996), logró aislar hongos celulolíticos analizados en el ciego de pollos a los que se les suministraba una dieta con niveles crecientes de un alimento alto en fibra (Saccharina). Se comprobó que existía una relación lineal entre el número de hongos celulolíticos ($r=0,72$, $P<0,001$) y el nivel de fibra en la dieta, lo que confirmó desde el punto de vista biológico que el sustrato fibroso presente determina tanto el número como el grupo fisiológico que en él se desarrolla. López y Rodríguez (1996) también encontraron resultados similares en cerdos.

Con respecto a los microorganismos ciliados se ha apuntado que estos provocan un incremento en la digestión de compuestos lignocelulósicos y la materia orgánica como reguladores, al reducir la intensidad de la fermentación de los almidones y ejercer un efecto amortiguador y evitar una producción de AGCC que inhiba la actividad celulolítica. Precisamente, la actividad de la microbiota celulolítica es el índice más real de los procesos fermentativos del ciego (Varel y Pond 1985, Flywn *et al.* 1991) y ésta se manifiesta a través de la actividad enzimática que se corresponde con los conteos de colonias fúngicas en el ciego (Rodríguez *et al.* 2000).

En el caso del conejo, existen muy pocos trabajos que se refieran al efecto de las fuentes fibrosas en la población bacteriana del TGI. Al respecto, Marouneck *et al.* (1995) encontraron una alta actividad pectinolítica en los ciegos, seguido de una actividad xilanásica y por último, la celulolítica, lo que se halla en correspondencia con el nivel de fermentación de las fracciones fibrosas y de su digestibilidad.

Se ha demostrado que niveles elevados de fibra en las raciones de las aves producen una reducción en la absorción del colesterol y de los lípidos al nivel intestinal (Marrero 1997, datos inéditos). Este efecto fisiológico se debe a la fracción soluble de la fibra (pectinas) y también a la lignina.

Similarmente, la FDS puede disminuir indirectamente la síntesis de colesterol y de la insulina hormonal que interviene en su

síntesis. Además tienen características hipocolestorémicas los ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato y butirato) que se producen en el colón como consecuencia de la fermentación de la FDS (Lairon 1996).

Por otra parte, la propiedad de intercambiar cationes de las fibras parece restringir los movimientos de los minerales. También las dietas altas en fibra incrementan la excreción fecal de calcio, hierro, magnesio y zinc. El cobre, el calcio y el zinc son pobremente absorbidos en el lumen intestinal (Prosky y De Vries 1992).

UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DIETÉTICA Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO.

Se han utilizado diversos trabajos relacionados con la utilización de la fibra dietética y el aprovechamiento de las dietas en aves y cerdos. La eficiencia de utilización de la fibra depende de varios factores:

- Naturaleza y nivel de fibra
- Vaciado gástrico y velocidad de tránsito
- Especie, raza, categoría y estado fisiológico
- Localización y grado de fermentación de los microorganismos
- Extensión de la absorción de los ácidos grasos de cadena corta producidos

La fuente y el contenido de fibra de la ración influyen en la digestibilidad de este nutriente. La magnitud de la digestibilidad estará influenciada por el origen y composición de la fibra y su nivel de inclusión en la dieta, y según Chabeauti *et al.* (1991), existe una alta correlación ($N=0,98$) entre la digestibilidad aparente de energía y la de los polisacáridos no amiláceos contenidos en la dieta, sobre todo si habían sustancias pécticas en las dietas.

Además de la pectina, la hemicelulosa es otro constituyente de la pared celular de los vegetales que es considerablemente degradada por los cerdos. La hemicelulosa está presente en un promedio de 10-25 % en la MS de los forrajes y en apenas 2-12 % en las raíces. De acuerdo con Ferrera (1990), esa mayor digestibilidad de la hemicelulosa

probablemente se deba a una mayor reactividad de algunos de sus enlaces químicos a la acidez gástrica, de tal forma que los productos resultantes queden expuestos a la digestión intestinal.

Con relación al nivel de fibra, se conoce que por lo general un aumento en el contenido de este nutriente en las raciones de monogástricos, conlleva a una disminución del tiempo disponible para la fermentación en el intestino, lo que finalmente deprime la digestibilidad de las fracciones fibrosas. Un ejemplo de lo anterior se muestra en el Cuadro 7.

Llama la atención un experimento realizado por Marrero *et al.* (1995) en pollos de ceba a los que se incluyó niveles crecientes de 1,5 unidades de FDN en la MS aportada por la Saccharina. Como resultado obtuvieron que la digestión se vio influida por el nivel de fibra dietética y que contrariamente a lo señalado por Carré *et al.* (1990), los pollos utilizaron con cierta eficiencia las fracciones insolubles de los alimentos (Cuadro 8).

Obsérvese que la utilización de la celulosa se incrementó de modo proporcional al consumo de FDN hasta el tratamiento III (16-07), para poder explicar lo anterior se deben considerar varias cosas:

- En términos de tracto gastrointestinal y su función, las aves presentan sitios de reciclaje de las partículas fibrosas que les permite hacer un uso más eficiente de la fibra dietética, al atrasar el tránsito a través del tracto, reexponer la digesta a las secreciones gástricas e incrementar

su digestibilidad (Rodríguez 1995).

- El tamaño de partículas de los piensos (< de 1 mm), produjo un mayor estímulo mecánico que debió favorecer la función del esfínter ileocecal.
- Incremento de la actividad de los microorganismos del ciego con una adaptación fisiológica que aumente su capacidad digestiva ante la presencia del tipo y nivel de fibra.
- Disminución de la cristalinidad de la celulosa.
- Inclusión de fibra dietaria mejorada con respecto al control.
- La no afectación de las proporciones de MS consumida en relación al consumo de FND.

Diversos trabajos realizados con otras fuentes fibrosas han demostrado que la digestibilidad aparente de materia seca, de energía y de proteína bruta disminuye significativamente con el aumento del nivel de fibra (Van Soest 1985, Rodríguez *et al.* 1988, Savón *et al.* 1994, Marrero 1999 y Savón 2000, inédito).

Con respecto a los métodos utilizados para la determinación de la disponibilidad de nutrientes, tradicionalmente se han empleado técnicas "in vivo" y ello demanda animales, instalaciones y alimentos, que aumenta los costos y el rechazo por parte de los especialistas. Esto ha conllevado a que durante los últimos años se hayan desarrollado procedimientos "in vitro" que simulan los procesos digestivos en animales de estómago simple y permitan determinar a corto plazo la biodisponibilidad de las

Cuadro 7. Fraccionamiento de la fibra de las heces de cerdos que recibieron dietas experimentales.

Indicador	Tratamientos				ES± Sing
	Control (trigo /soya)	trigo /soya 10 % Vig ung.	trigo /soya 20 % Vig ung	trigo /soya 30% Vig ung	
FND	42,92 ^b	46,70 ^a	45,86 ^{ab}	48,42 ^a	1,05*
FAD	23,34 ^a	26,60 ^b	30,13 ^c	32,44 ^d	0,63***
Hemicelulosa	19,58 ^b	20,10 ^b	15,73 ^b	15,98 ^a	0,73***
Celulosa	10,64 ^a	18,09 ^b	20,05 ^c	19,01 ^d	0,28***
Lignina	3,93 ^c	5,98 ^b	6,23 ^b	6,78 ^a	0,10***
Rel, H/C	1,84	1,11	0,78	0,84	
Rel, H/L	4,98	3,36	2,52	2,35	

*** P<0,001

*P < 0,05

abc: medias con superíndices distintos difieren a P<0,05 Duncan (1955). (Savón 2000)

Cuadro 8. Retención aparente de los componentes de la pared celular del pienso en pollos de ceba.

Indicador %	Tratamiento (% FND en la MS)				ES ±
	14,01	15,01	16,07	17,58	
Retención aparente FB	35,06 ^a	32,52 ^a	34,57 ^a	3,20 ^b	3,20 ^{***}
Retención aparente FND	35,74 ^a	26,39 ^b	35,54 ^a	27,44 ^b	2,20 ⁺⁺
Retención aparente FAD	37,53 ^a	38,41 ^a	43,28 ^a	26,87 ^b	2,80 ^{**}
Hemicelulosa	41,83 ^a	28,36 ^b	31,14 ^b	14,58 ^c	2,26 ^{***}
Celulosa	40,8 ^b	48,47 ^b	66,88 ^a	36,18 ^c	3,40 ^{**}

materias primas utilizadas en la alimentación de animales monogástricos. Estos incluyen trabajos realizados por varios autores Graham *et al.* (1985), Lowgren *et al.* (1992) en cerdos y Sakamoto y Asoor (1980) y Clunies y Leeson (1984) en aves. Estos métodos se basan en una simulación de la digestión intestinal obtenida de un cerdo canulado a la que es sometido el alimento en cuestión. Estas técnicas “*in vitro*” fueron validadas contra los métodos *in vivo* y se obtuvieron correlaciones aceptables (0,87 y 0,90, respectivamente).

El reconocer la similitud existente entre la eficiencia digestiva de las especies monogástricas, el contenido intestinal del cerdo “*in vitro*” se puede extrapolar a otros animales y en principio hace una buena estimación de los procesos digestivos *in vivo*, ya que la biodisponibilidad de los sustratos es el factor determinante, aunque como en otros métodos “*in vitro*”, al no considerar los factores antinutricionales o los estados fisiológicos de los animales, los valores obtenidos pueden ser sobreestimados.

En realidad estas técnicas se han utilizado en la evaluación de alimentos convencionales, por lo que en el Instituto de Ciencia Animal, Savón, *et al.* (1997) propusieron una metodología basada en el método de Lowgren para la evaluación de alimentos fibrosos para cerdos. Posteriormente Marrero (1998), propuso la utilización del inóculo fecal de cerdo para determinar la digestibilidad de los nutrientes en pollos de ceba. En ambos casos los autores obtuvieron errores de sesgos y de regresión aceptables entre los coeficientes de digestibilidad de FDN (Cuadro 9).

También Ly *et al.* (1997) concluyeron varios experimentos en Vietnam donde desarrollaron un nuevo método “*in vitro*” para

estimar la digestibilidad de la MS de alimentos tropicales (entre los que se encontraron los ricos en pared celular vegetal) a partir de su valor de lavado.

Con relación a la utilización de los nutrientes, al parecer, en las aves domésticas no existe limitación para la utilización de la celulosa, sino a ciertos niveles de fibra en el pienso. Según Ruiz (1991) entre 10 y 80 % de la fibra que escapa a la acción enzimática del TGI superior sufre un proceso de fermentación en los ciegos, bajo determinadas condiciones de pH (6,7-7,8) y de temperatura (39-41 °C).

Existe diferencia entre especies de aves en la capacidad para asimilar determinados niveles de fibra. Así, las ocas y patos consumen grandes cantidades de forraje si se les suministra; otro tanto ocurre con los guineos y patos. La eficiencia de utilización se relaciona estrechamente con la velocidad de tránsito intestinal, la que presenta grandes variaciones entre las aves de corral. Así, en pollos y pavos, el tiempo medio de retención es de 12-24 horas, menos de 12 horas en patos y gansos, los avestruces muestran un tiempo de pasaje muy lento, lo que garantiza mayores posibilidades para digerir materiales lignocelulósicos (Smith y Sales 1996).

El punto crítico en la utilización de dietas con alimentos alternativos ricos en fibra es el consumo. Es evidente que sea por falta de capacidad de un tracto no distendido que se limita el consumo de una dieta diluida, el animal quedará por debajo de sus requerimientos. La adaptación a dietas fibrosas puede demorar más de 4 meses en ponedoras (Rodríguez y Velazco 1995), por esta causa estos autores recomendaban incluir volúmenes mayores de fibra en el alimento de las pollonas durante el

Cuadro 9. Validación “in vitro” e “in vivo” para la digestibilidad total de la FDN en aves y cerdos .

Indicadores	Especies	
	Aves	Cerdos
<i>FDN</i>		
Media real	24,51	42,77
Media estimada	24,05	42,85
<i>Proporción del error</i>		
Sesgo	0,000006	0,000028
Regresión	0,32	0,36
Aleatorio	0,67	0,63

* Se evaluaron el maíz, harina de caña y Saccharina en cerdos y el maíz y saccharina en las aves.

crecimiento, sí después en la madurez van a recibir dietas no convencionales.

También la edad y peso vivo tienen efecto en la digestibilidad de la fibra. Los animales jóvenes son más sensibles a la utilización de altos niveles de fibra (Carré 1984, Debner *et al.* 1968). Cuando se comparan los cerdos en crecimiento con las cerdas, los coeficientes de utilización digestiva de la fibra son más altos para las cerdas. Las cerdas están más adaptadas al uso de la energía de los alimentos altos en fibra. Estas diferencias fueron más pronunciadas a medida que se incrementa el nivel de fibra. Entre los factores que favorecen la digestión de la fibra en las cerdas se halla el poseer un mayor volumen intestinal con un menor tránsito digestivo debido a menor nivel de ingestión. Sin dudas, la restricción de alimento relacionada al consumo voluntario es más alta para las cerdas que los cerdos en crecimiento.

Las dietas altas en fibra son más utilizadas durante la gestación, debido a las elevadas necesidades de la lactación. Se ha valorado la introducción de alimentos no convencionales altos en fibra (Díaz *et al.* 1993) sin efectos perjudiciales en el comportamiento reproductivo. Sin embargo, los estudios de digestión de la fibra tienden a disminuir de los inicios de la gestación al período intermedio y disminuye de éste al período final de la gestación.

Con relación al sitio de digestión de la fibra aunque durante mucho tiempo se ha conocido que el ciego y el colon son los lugares donde tiene lugar la fermentación de la fibra, estudios realizados con cerdos canulados han revelado que existe alguna degradación especialmente con algunas leguminosas fácilmente fermentables como

la pulpa de cítricos (Dierick 1989). Savón *et al.* (1994) encontraron valores más elevados de degradación a nivel ileal de componentes de la pared celular en dietas no convencionales de harina de caña. Estos autores hallaron bacterias y hongos celulolíticos (10^{11} ufc/ml/ en esta región, lo que pudiera explicar estos resultados.

El intestino grueso de las aves es el único lugar posible para la fermentación microbiana de la fibra. Con frecuencia la longitud de los ciegos ha sido relacionada directamente con la capacidad de digestión de la fibra.

De la fermentación microbiana de la fibra se obtienen como productos finales los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) los que constituyen entre el 0,2 y 1 % del contenido cecal a partir de la glucosa. Se obtiene en primer lugar acetato y en menor cantidad propionato y butirato, los ácidos isovaléricos, valérico, láctico y gases como H₂, CO₂ y metano. El metano carece de importancia biológica en los monogástricos.

La producción de AGCC en el intestino grueso de aves y cerdos está relacionada con el tipo y nivel de fibra en la dieta. La concentración de AGCC en el intestino grueso aumenta linealmente con el incremento de FND.

En general, un aumento significativo en los niveles de fibra de la dieta origina un incremento en la razón acetato/propionato. Las dietas que contienen forrajes tienden a producir una preponderancia del ácido acético, el que puede variar entre 60 y 75 %.

Las variaciones pueden deberse al tipo de forraje y a su estado de madurez. En estos casos el ácido propiónico tiende a ser 17-19 % y el butírico 8-12 %. El propiónico y el butírico están inversamente

correlacionados con el metano, lo que pudiera favorecer un aumento de la relación propiónico butírico. En ocasiones la inclusión de fuentes fibrosas en sustitución parcial del maíz en las aves es mucho menor que en otras especies y por tanto pudiera favorecer el patrón de fermentación propiónico. También hay que tomar en cuenta que en el ciego de los pollos el *Propionibacterium* fue identificado como uno de los más abundantes (Salanitro *et al.* 1978).

También se ha observado en otras especies monogástricas como el conejo, la conversión del acético a butírico y el predominio de este último por dominancia del *Butirivibrium Spp* (Bellier *et al.* 1995). Algo similar pudiera ocurrir en las aves. Estos resultados proporcionan beneficio para el ave, ya que el ácido propiónico es de naturaleza glucogénica, lo que hace que se relacione de modo positivo con la producción de carne. Otro aspecto interesante sería el papel del ácido butírico, ya que las células del ciego tienen preferencia por el mismo como fuente energética.

Los AGCC producidos en el TGI se metabolizan en la mucosa, éstos son transportados eficientemente y cantidades considerables pueden llegar a sangre para su metabolización posterior. Se considera que el aporte de los AGCC es de 25-30 % para los requerimientos energéticos del mantenimiento en el cerdo, 50 % en el conejo y 17 % en los pollos. La producción de AGCC en los gansos no es significativa con respecto a la que se produce en los pollos, en los que la tasa de producción mayor es para acetato, mientras que la tasa de absorción mayor corresponde al butírico. En el avestruz el 70 % de la energía de mantenimiento se puede obtener de los AGCC (Smith y Salis 1996). Tales aportes tienen importancia en los animales adultos alimentados con plano nutricional normal, ya que en los animales en crecimiento este aporte es menor. Los datos sobre la utilización por las especies monogástricas de la energía de la porción fibrosa son escasos.

En el Cuadro 10 se observa un trabajo realizado en el que se muestran los aspectos señalados.

Para la determinación del aprovechamiento energético de la fracción fibrosa se han seguido varios métodos. En el Instituto de Ciencia Animal se ha desarrollado un método *in vitro* que permitió a partir del análisis de AGCC totales e individuales, calcular el balance estequiométrico de sus porcentajes molares según Hungate (1966) y realizar estimaciones del aporte energético al metabolismo animal.

De todas formas, la eficacia de transformación de AGCC en energía mediante la fermentación de la fibra es menor que la eficacia de aprovechamiento de los carbohidratos solubles como la glucosa en el proceso de digestión enzimática. En los cerdos la primera representa el 75 % de la segunda.

FACTORES ANTINUTRICIONALES

Los factores antinutricionales (FAN) son sustancias sintetizadas por los tejidos vegetales para protegerse de depredadores como bacterias, hongos, insectos y otros animales. Estos compuestos son dentro de las características indeseables de las fuentes fibrosas, los que provocan respuestas negativas más dramáticas. Los efectos de los nutrientes en las funciones digestivas son difícil de explicar, en parte, por que nuestro conocimiento acerca de la naturaleza física y química de estos compuestos es a menudo escasa y a veces nula (Kroghal, 1988). La presencia de los FANs se ha estudiado generalmente en productos de uso convencional como el trigo, cebada y centeno. Sin embargo, es importante en el mundo subdesarrollado buscar y evaluar fuentes fibrosas tropicales y conocer los factores antinutricionales presentes que afectan sus resultados y modifican los requerimientos de aves y cerdos.

Las harinas de follajes de leguminosas (D'Mello 1991 y 1996) y de aditivos con gran producción de biomasa Buitrago (1999), García (1996) presentan una combinación diversa de compuestos antinutricionales. En el Cuadro 11 se relacionan las sustancias antinutricionales en diferentes fuentes foliares. De todas las sustancias, los taninos y saponinas son las más abundantes. Así, es

Cuadro 10. Efecto del nivel de fibra dietética en el patrón de fermentativo y el aporte energético de los AGCC en el ciego de pollos.

INDICADOR	TRATAMIENTOS			
	% FDN en la MS alimento			
	14,01	15,51	16,07	17,58
% Molar				
Acético	57,82	60,23	58,46	58,98
Propiónico	21,53	20,06	23,56	20,48
Butírico	10,16	14,46	15,03	17,01
AGCC Producidos/100 g dieta	22,23 ^a	16,70 ^b	23,09 ^a	14,31 ^b
Aporte energético de los AGCC, MJ/100 g de dieta	2,08	2,13	2,22	1,87
Aporte energético como % de la EM consumida	2,20	2,13	2,22	1,87
Aporte energético de los AGCC a la energía de mantenimiento,%	11,23	11,37	12,95	11,01

A,b Letras diferentes de una misma fila difieren estadísticamente
Tomado de Marrero (1998)

Cuadro 11. Factores antinutricionales en harinas foliares.

Factor antinutricional	Especies	Efecto
1 taninos	<i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Canavalia ensiformis</i> , <i>Lablab purpureus</i> , <i>Glycine max</i> , <i>Stizolobium aterrimum</i> , <i>Musa paradisiaca</i> , <i>Robina pseudoabacea</i>	Disminución consumo voluntario, digestibilidad y retención de N inhibición quimotripsina disminución intestinal de tripsina y amilasa.
2 Cyanógenos	<i>Manihot sculenta</i>	Disminución consumo imposibilita transporte O ₂ a la sangre, afecta metabolismo intermediario.
3 Saponinas	<i>Sesbanea sesbans</i> , <i>morus albas</i> <i>C. cajans</i>	Retardo en el crecimiento reducción consumo voluntario.
4 Aminoácidos no proteicos	<i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Canavalia ensiformes</i>	Disminución consumo y crecimiento.
5 Lectina	<i>Robina pseudoabacea</i>	Disminución digestibilidad
6 Alcaloides	<i>Gliricidia sepium</i>	

notable el trabajo desarrollado por Scull (2004), que desarrolló una metodología para cuantificar el contenido de polifenoles totales y taninos condensados unidos a la FDA y la FDN y de taninos extractables y a complejados en forrajes de leguminosas

En general, los FAN originan una disminución en el consumo como efecto adverso principal, interfieren en el proceso digestivo con la utilización de los alimentos y los potenciales productivos. Las proteínas que se enlazan a los taninos alteran su metabolismo e incluso las interacciones posteriores enzimas-taninos inhiben la actividad de las enzimas digestivas; lo que puede reducir la digestibilidad. Esto se puede observar en el Cuadro 12, donde es

probable que los compuestos secundarios como los taninos presentes en la harina de follaje de leucaena, tenga mucho que ver con una digestibilidad deficiente del N y por extensión de los aminoácidos. El hecho que muy poco del nitrógeno esté unido a la pared celular vegetal en leucaena (7,4% del total, Vargas y Elvira 1987), esta condición no lo hace inaccesible para las enzimas proteolíticas del cerdo, lo que confirma lo anterior.

También muchos investigadores han mostrado el papel de los polisacáridos estructurales de la pared celular (polisacáridos no almidón, PNA) clasificados como factores antinutricionales y se ha demostrado su presencia (Carré *et al.* 1990)

Cuadro 12. Digestibilidad *in vivo* e *n vitro* de la proteína de cerdos alimentados con harina de follaje de *Leucaena leucocephala*.

Digestibilidad , % Fuente Proteica	" <i>In vitro</i> "	" <i>In vivo</i> " ileal	" <i>In vivo</i> "fecal	Referencias
Caseína	96,5			Ly et al (1994)
Hemoglobina	94,4			
<i>L.leucocephala</i>	44,2	42,2	41,5	Santos y Abreu(1995)
<i>S. rostrata</i>		40,4	41,4	García y Ly(1994)
<i>M. Sativa</i>		94,8	43,9	Vervaeke <i>et al.</i> (1989)

en diversas plantas fibrosas. Estos son arabinosilanos, β glucanos, celulosa, pectina y α galactósidos.

En el estudio de estos FAN y sus efectos se ha establecido que los PNA se unen con grandes cantidades de agua e incrementan la viscosidad de los fluidos. Esta viscosidad dependerá del tamaño de partículas, si es ramificado o lineal, presencia de grupos cargados y su concentración.

La viscosidad de los fluidos interfiere en el proceso digestivo absorptivo y deprime los resultados productivos. Estos efectos se corresponden con la porción soluble de la fibra, alimentos con elevada concentración de fibra soluble, como la harina de cítricos.

Debido a lo expuesto anteriormente se desprende que se debe establecer la búsqueda de varias vías en la optimización del uso de las fibras dietéticas para transformar las dificultades del proceso digestivo de cada especie.

MÉTODOS PARA MEJORAR LA UTILIZACIÓN DE LA FIBRA.

Se han ensayado varios métodos con el objetivo de intentar la solución a las dificultades nutricionales que aporta la fibra dietética y a la vez incrementar su aporte energético. Entre ellos se encuentran los métodos mecánicos, físicos (calor, presión) y químicos (tratamiento con NaOH, urea y amoníaco). Recientemente se ha estudiado el uso de suplemento enzimático (gluconasa, pectinasa, pentosanas y fitasas) que aumenta la capacidad digestiva de los animales degradan los polisacáridos no almidones formadores de geles, las paredes celulares y las proteínas, además de facilitar el rompimiento de las sustancias antinutricionales (Flachowsky 1999, Harberer *et al.* 1999). Esta suplementación reduce los

costos de alimentación y mejora los desordenes digestivos sobre todo en animales pequeños a la vez que aumenta la velocidad de crecimiento y utilización de los alimentos en cerdos y aves. De los numerosos trabajos revisados en la literatura se puede estimar que la suplementación enzimática mejora la conversión en un 4 % en cerdos, 5-10 % en aves e incrementa la ganancia diaria en 5 % en ambas especies, reduce el costo/kg de ganancia y tonelada de alimento sin empeorar el comportamiento productivo estudiado.

Otros métodos analizados han sido la inoculación de bacterias y hongos celulíticos y protozoos que deslignifican la fuente fibrosa y permiten un uso más eficiente de ellas por el animal.

Al respecto, en el Laboratorio de Biotecnología del Instituto de Ciencia Animal, Valiño *et al.* han logrado aislar cepas hiperproductoras de celulasa del género *Trichoderma* y *Penicillium* que incluso pueden degradar componentes de alto peso molecular de la lignina, como es el caso de este último. Así, Valiño *et al.* (2000) lograron disminuir el contenido de FDN, incrementar la digestibilidad de la celulosa y reducir a la mitad el contenido de taninos condensados en la harina de follaje de *Vigna unguiculata* con la inoculación de la cepa *Trichoderma viride* 137 MCX (Cuadro 13).

Orta (2004) logró incrementar la calidad nutritiva de la fracción fibrosa de la harinas de follaje de mucuna y dólcho para especies monogástricas, también a través de la FES de la cepa mutante del hongo celulolítico *Trichoderma viride* M5-2.

El efecto positivo de la digestión de los nutrientes por el uso de fuentes fibrosas fermentadas había sido estudiada con anterioridad por Sandberg y Svanberg

Cuadro 13. Indicadores de fibra en la combinación (80/20) de vigna-bagazo durante la fermentación sólida con el hongo *T. viride* 137 MCXI.

Indicadores (%)	0	24	48	72	96	120	144
FDN	66,02	65,78	64,35	61,8	53,22	58,86	58,88
FDA	53,67	49,21	52,84	49,22	45,48	47,46	52,64
Celulosa	36,27	33,14	33,84	31,81	27,17	27,65	29,35
Lignina	14,48	11,71	12,20	13,20	12,74	12,78	13,5
Hemicelulosa	12,35	16,56	11,51	12,58	7,74	11,38	6,30
Contenido celular	33,98	34,23	36,65	38,20	46,78	41,16	41,06

P<0,001

Valiño *et al.* (2000, Inédito)

(1991), Svanberg *et al.* (1993) y Yodov y Khetapoul (1995), a partir de esas fermentaciones del alimento con *Saccharomyces diastaticus*, *S. cerevisiae* y lactobacilos, se observaron mejoras en la biodisponibilidad del hierro y eliminación de factores antinutricionales. También, Yodov y Khetapoul (1995) observaron que la fermentación de las leguminosas provocó una disminución de los inhibidores de proteasas y amilasas, así como la destrucción de fitatos taninos y polifenoles.

En general, en estas fuentes fibrosas mejoradas se ha obtenido un aumento importante en la digestión de almidones, proteínas y cenizas. El efecto se logra por dos mecanismos: eliminación de factores antinutricionales o por ataque directo de los microorganismos a la fracción fibrosa.

Finalmente, en los últimos años las investigaciones sobre el mejoramiento de la utilización de la fibra dietaria han sido encaminadas hacia la identificación de los genes que son responsables de la síntesis, modificación y recambio en el desarrollo de las paredes celulares de las plantas.

Esta forma a medida que se conoce más de la arquitectura de la planta, se puede comenzar a modificar su composición polimétrica y sus interacciones en la planta transgénica (Vergara 1998). Otra vía es la introducción de genes de *Clostridium thermocellium* en embriones de cerdo para obtener animales con mayor capacidad de degradación de la celulasa. Las células E. del *Clostridium* contienen una endoglucanasa capaz de hidrolizar los xilanos.

Esto es sin dudas un reto que ofrece la biotecnología, ya que el animal transgénico posee una mayor habilidad para degradar la celulasa. De todas formas queda por

comprobar todos estos procedimientos en el metabolismo energético de las aves y cerdos.

CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

- La determinación de las características físico químicas (solubilidad, volumen, capacidad tampón, capacidad de intercambio catiónico y capacidad de adsorción de agua) son imprescindibles para la estimación del valor nutritivo de alimentos fibrosos para especies monogástricas.
- Las investigaciones futuras deben ofrecer informaciones que permitan esclarecer las relaciones entre la composición química, las propiedades físicas y los efectos fisiológicos de los diferentes tipos de fibra para optimizar su utilización en la dieta de aves y cerdos.
- Es necesario estimar el valor energético de las fuentes fibrosas y su aporte al metabolismo animal con el objetivo de optimizar su uso
- Es necesario dirigir investigaciones en las que se evalúe con criterio de eficacia económica los diferentes procedimientos utilizados (físicos, químicos biológicos y biotecnológicos) para incrementar el potencial energético de las fuentes fibrosas y su contribución al metabolismo en especies monogástricas
- Conocer las características nutricionales y antinutricionales de las fuentes fibrosas tropicales y las vías más idóneas para contrarrestar o corregir el efecto de estas últimas.

- Se recomienda formular las raciones de aves y cerdos a partir del concepto de FND.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aumaitre, A. 2000. The role of dietary fibre in pig production .Ed A. Aumaitre, J. F Fernández y J. Wiseman.
- Bach-Knudsen, K. E. 2001. The nutritional significance of dietary fibre analysis. *Anim. Feed Sci and Tech.* 90 (1-2): 3-20
- Buitrago, A. J. 1990. La yuca en la alimentación animal. Centro Internacional de agricultura tropical (CIAT) Colombia 448pp
- Caspar, W. 2001. The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig. *Anim. Feed Sci. Techn.* 90(1-2).
- Cherbut, C., Des Varannes, B., Scnel, M., Martine, R., Galmiche, J.P and Delort, J. L. 1994. Involvement of small intestinal motility in blood glucose response to dietary fibre in man. *Brit. J. Nutr.* 71: 675
- Chesson, A. 1997 Cell wall and available area: Their measurement and significance. European Air Concerted Action AIR 3CT942203 Pro Fibre. Eds:Guillon, F; Abraham,G; Amado,R; Anderssen,H; Asp, N.G; Bach Knudsen,K.E; Champ,M t Robertson,J. Imprimerie Parenthèses, Nantes, France
- Cole, D. J. A. y Chadd, S.A. 1989. Voluntary food intake of growing pigs. Occasional Publication Vol.13. British Society of Animal Production edited by J.M.Forbes, M.A.Varley and T.L.I Lawrence.61
- Díaz, M. F., González, A., Padilla, C. y Curbelo, F. 2002. Caracterización bromatológica de granos y forrajes de las leguminosas temporales *Canavalia ensiformis*, *Lablab purpureus* y *Stizolobium niveum* sembradas a finales de la estación lluviosa, *Rev.cubana Cienc. Agric.* 36:409
- Díaz, M. F. 2000. Producción y caracterización de forrajes y granos de leguminosas temporales para la alimentación animal. Tesis Dr.Cs. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba, 91pp.
- Díaz , M.F. y Padilla, C.M. 1997. Avances en la evaluación de nuevos cultivares de leguminosas para la alimentación de animales monogástricos en Cuba. IV Encuentro sobre nutrición de animales monogástricos. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.
- Domínguez, P.L. 1990. Taller regional sobre reutilización de los recursos alimentarios en la producción porcina en América Latina y el Caribe. FAO-Inst de Inv. Porc, La Habana, Cuba.
- Duncan, M. B. 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics.* 11: 1
- Eastwood, M. A. 1992. The physiological effect of dietary fibre. *Ann.Rev.Nutr.* 12:19.
- Englyst, H. 1989. Classification and measurement of plant polysaccharides. *Anim. Feed Science Tech.* 23:27
- Fialho, E. y Pinto, H. 1997. Alimentos alternativos para suinos. Editorial FAEPAC., Brazil
- García, A. 1996. Uso de la harina de follaje de plátano en la alimentación de cerdos en crecimiento ceba. Tesis de Doctor en Ciencias Veterinarias .Instituto de Investigaciones Porcinas. Ministerio de la Agricultura.
- Gitley, M. 1998. Summary of activities regarding processing and physicochemical properties. En "Functional properties of non -digestible carbohydrates". Profibre European Concerted Action AIR3CT94-2203. Ed. F. Guillon, R. Amado, M. T Amaral-Collaco; H. Anderson; N. G. Asp; K. E. Bach-Knudsen; M. Champ; J. Mathews; J. A. Robertson; I. Rowland y Van Loo.
- Goering, H. K. And Van Soest, P.J. 1970. Forrage fibre Analysis. Department of Agriculture. Handbook No. 379.USD. Washington, D.C. p.119.
- Graham, H. 1988. Dietary fibre concentration and assimilation in swine. *Anim.Plant.Sci.* 45:78.
- Hansen, L., Bach Knudsen, Eggum, B.O. 1992. Gastrointestinal implication in the rat of wheat bean, cat bean and pea fibre. *British.J of Nutr.* 68:451-462.

- Iji, P. A., Sahi, A. A. y Yuiey, P. R. 2001. Intestinal development and body growth of broiler chicks on diets supplemented with non starch polysaccharides. *Anim.Feed Sci and Tech.* 89(3-4):175-188.
- Lairon, D. 1996. *Reprod. Nutr. Dev.* 36: 345-355.
- Lester, S. J., Dhanoa, M.S., Stewart, J. L. y Gill, M. Classification and comparison of *Gliricidia provenances* using near infrared reflectance spectroscopy 2000. *Anim Feed Sci. And Tecn.* 87 (1-2):205-219.
- Lon Wo, E. 1995. Alimentación no convencional para las aves en el trópico. XIV Congreso Latinoamericano de Avicultura. Memorias. Santiago, Chile.
- López, A. y Rodríguez, S. 1997. Efecto del nivel de fibra sobre el número y la actividad de la microflora celulolítica en el ciego de cerdos. Trabajo diploma. Facultad de Biología. Universidad de la Habana, Cuba, p.40
- Low, A. G. 1989. Secretory response of pig gut to non-starch polysaccharides. *Anim.Feed Sci. Tech.* 23:55
- Ly, J., Lon Wo, E. y Castro, M. 1996. Balance de nitrógeno y energía en cerdos alimentados con dietas de mieles de caña y zeolitas naturales cubanas de distintos yacimientos. *Rev. cubana Cienc. Agrícola.* 30 : 201.
- Marrero, A. I. 1998. Contribución al estudio de la utilización de la fibra dietética en gallinaceas. Tesis presentada en opción al grado científico de Dr. en Ciencias Veterinaria, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.
- Mastrapa, L., Mederos, C. M., Rodríguez, J. L., Rodríguez, Maydel Mazón, D. y Rosas, B. 1994. Evaluación de la fibra dietética insoluble y del nitrógeno asociado a esta fracción en alimentos para cerdos. Evento Porcicultura 96, Palacio de las Convenciones, Ciudad de la Habana.
- Mc Doughall, G. J., Morrison, I. M., Stewart, D., y Hillman, J. R. 1996. Plant cell walls as dietary fibre: Range, Structure, Processing and Function. *J Sci. Food Agric.* 70:133-150.
- Periago, M. J., Ros, G., López, G., Gutiérrez, M. C. y Rincón, F. 1993. Componentes de la fibra dietética y sus efectos fisiológicos. *Rev.Esp.Cienc.Tecnol. Alimentos.* 53 : 229.
- Potty, V. H. 1996. Physico chemical aspects, physiological functions, nutritional importance and technological significance of dietary fibers. A critical appraisal. *J. Food.Sci. Technol.* 33: 1
- Prosky, P., Asp, N. G.; Furda, I., De Vries, J. W., Schweizer, T. F. y Harland, B. 1984. Determination of total dietary fibre in foods, food products; Collaborative study. *J.Assoc. Anal. Chem.* 68 : 677.
- Prosky, L. y De Vries, J. 1992. Controlling dietary fibre in food products. Von nostrand Reinhold, New York. P 54.
- Rodríguez, J. 1994. Preevaluación rápida de nuevos alimentos para las aves. II Encuentro regional de Nutrición de Monogástricas. Instituto de Ciencia Animal, San José, La Habana, Cuba.
- Rodríguez, S., Galindo, J., Marrero, A. I., Boucourt, R., Elias, A. y Riverí, Z. 1996. Una nota sobre el aislamiento de hongos celulolíticos en el ciego de pollos de engorde. *Rev cubana Cienc. Agric.* 30: 201.
- Rodríguez, S., López, A., Riverí, Z. 2000. Efecto del nivel de fibra en el número y actividad celulolítica en el ciego de cerdos. *Rev. cubana. Cienc. agric.* 30: 201.
- Ruiz, B. 1991. Algunos conceptos de la fibra y su utilización en la nutrición de laves. *Soya Noticias* 26: 14
- Ruiz, Z., Murphy, B., y Olivera, M. 1999. Interacción reproducción nutrición en los animales domésticos, es la leptina la clave?. *Rev. col Cienc. Pec.* 12: 145
- Savón, L. y González, T. 1996. Fibra dietética en especies monogástricas. Trabajo presentado en la I Conferencia de Agricultura Sostenible. Gerona, Isla de la Juventud
- Savón, L., Gutiérrez, O., González, T. y Orta, Mayelín. 1999. Manual de caracterización físico-química de alimentos EDICA, La Habana, Cuba.
- Savón, L. 2000. Uso de fuentes fibrosas como alternativa alimentaria para aves,

- cerdos y conejos. Informe Final Proyecto, CITMA.
- Savón, L., Scull, I., Gutiérrez, O y Orta, M. 2004. Harinas de follajes tropicales: Una alternativa para la alimentación de especies monogástricas. VI Taller Internacional Silvopastoril, " Los árboles y arbustos en la ganadería", Ciudad de Holguín, Cuba.
- Schneeman, B. O. y Gallaker, D. 1989. Effects of dietary fibre on digestive enzyme activity and bile acids in the small intestine. Proc. Exp: Biol. Med.180:409.
- Scull, I. y Savón, L. 2003. Determinación de polifenoles totales y taninos condensados en harinas de follajes de cuatro variedades de *Vigna unguiculata* . Rev.cubana Cienc. Agric.37(4):403.
- Souffrant,W. B. 2001. Effect of dietary fibre on ileal digestibility and endogenous nitrogen losses in the pig. Anim. Feed Sci. And Tech. 89(3-4):93-102.
- Southgate, D. A. T. 1998. Physical form and physical function of dietary fibre.European Air Concerted Action Profibre Eds. F. Guillon y cols. Imprimerie Parenthèses, Nantes, France.
- Sosulski, F. W. and Cadden, A. M. 1982. Composition and physiological properties of several sources of dietary fiber. J. Food Sci.47: 1472
- Taverner, M. R; Hume, I. D y Farrell, D. J. 1981. Availability to pigs of aminoacids in cereal grains. I Endogenous levels of aminoacids in ileal digesta and faeces of pigs given cereal diets. Br. J. Nutr. 46: 149.
- Varel, V. H. y Pond, W. G. 1985. Enumeration and activity of cellulolytic bacteria from gestating sows fed various levels of dietary fibre. Appl. Environ. Microbiol, 47: 219.
- Vergara, C. E; Olek, A. T y Carpeta, N. C. 1998. Diversity in the structure and architecture of plant cells.Implication for dietary fibre and the texture of food. Functional properties of Non- Digestible Carbohydrates. European Air Concert action (Profibre). Eds. F. Guillon, I. Amado, M. T. Amaral Collaço, H. Anderson, N. G., Asp, K. E., BachKnudsen, M., Champ, J. Mathews, J. A. Robertson, I. Rowland y Van Loo.