



CONFERENCIA N° 10

POTENCIAL DE PROCESOS DE AMONIFICACIÓN DE FOLLAJE EN REACTORES PARA LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS PARA ANIMALES Y ENERGÍA

Alexis Ferrer

Facultad Experimental de Ciencias. Universidad del Zulia
Parque Tecnológico Universitario
INZIT

Maracaibo, septiembre de 2008

Resumen

El déficit de alimentos y energía en el mundo de hace mayor cada día. El follaje de las plantas contiene muchos componentes nutricionales o con el potencial de serlo, además de ser una fuente renovable de energía. Sin embargo, la presencia de factores antinutricionales, el nivel de fibra, sobre todo para animales de estómago simple, el entrecruzamiento de los componentes de la pared celular y la cristalinidad de la celulosa, entre otros, disminuyen grandemente su utilización. Por otro lado, follajes de muchas variedades de plantas poseen relativamente altos niveles de proteínas, presentando algunas de ellas excelentes perfiles de aminoácidos. Pero esto no es suficiente, gran parte de las proteínas se encuentra integrada a los componentes de la pared celular, de tal manera que su disponibilidad para las enzimas digestivas de animales monogástricos es muy limitada. Se han desarrollado muchos pretratamientos físico-químicos para el follaje, sobre todo si constituyen desechos o residuos de la agroindustria. La necesidad de disponer de materias primas de bajo valor agregado para la producción de biocombustibles como el etanol está incentivando poderosamente la investigación y desarrollo en esta área. En Venezuela, los principales motivos para desarrollar pretratamientos son: la existencia de largos períodos de sequía que conlleva a la disminución de la oferta de pastos de calidad, por lo que la producción de leche y carne de bovinos es deficitaria, entre otras causas, además del factor de disponer en esta zona del ecuador de pastos con contenido relativamente bajo de energía disponible, y la necesidad de producir fuentes proteicas alternas a la harina de soya para animales de estómago simple, principalmente cerdos y aves. Como resultado de nuestras condiciones actuales, Venezuela importa el 90% de la demanda de cereales y soya. Se sugiere entonces el uso de un pretratamiento amoniacal (PDA) en reactores que permite:

1. Aumentar la digestibilidad ruminal de la materia seca de los henos hasta la típica de un pasto verde recién cortado (disminución del efecto de la sequía);
2. Aumentar la digestibilidad ruminal de la materia seca (DRMS) de un pasto verde hasta la típica de un grano como el maíz (eliminación de cereales como suplementos para animales rumiantes);
3. Conversión de residuos como el bagazo de la caña de azúcar y la paja de arroz en alimentos energéticos para rumiantes;
4. Producción de concentrados proteicos con un mínimo de fibra para animales de estómago simple (sustitución de la harina de soya);
5. Producción de fibras con elevada digestibilidad ruminal (subproducto del proceso de extracción de proteínas);
6. Eliminación de aflatoxinas en granos;
7. Producción de sueros proteicos azucarados para cerdos, y
8. Producción de etanol de la fibra remanente.

Pretratamientos físico-químicos de materiales lignocelulósicos.

Debido a la compleja estructura de los materiales lignocelulósicos, es necesario someter a la biomasa a pretratamientos que garanticen la eliminación de barreras físicas y químicas como: la cristalinidad de la celulosa, grupos acetilos de la hemicelulosa y los enlaces entre la hemicelulosa y lignina, con la consecuente eliminación de la lignina, lo que facilitará la hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa y la extracción de proteínas. El método más utilizado para medir la efectividad de los pretratamientos es la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática, bien sea con enzimas comerciales (digestibilidad enzimática in vitro) o del rumen (digestibilidad ruminal de la materia seca, DRMS, in vitro o in situ). Los compuestos a determinar son los azúcares reductores producidos de los polisacáridos de la pared celular (hidrólisis) o la pérdida de dichos polisacáridos (digestión).

Se han propuesto e investigado muchos tipos de pretratamientos físico-químicos, pero entre ellos vale la pena destacar tres:

1. Explosión con vapor.

El proceso de explosión con vapor se usa como un método de pretratamiento de materiales lignocelulósicos. Se basa en someter la biomasa a tratamiento con vapor saturado a altas presiones, para luego reducir la presión rápidamente, lo que hace que el material sufra una descompresión explosiva. La explosión con vapor se realiza a temperaturas entre 160 y 260°C que corresponde a presiones entre 0,69 y 4,83 MPa por tiempos cortos (de segundos a minutos). Este proceso causa degradación de la hemicelulosa y la transformación de la lignina debido a la alta temperatura, incrementando así el potencial de hidrólisis de la celulosa. Se logró obtener un 90% de conversión de fibra en azúcares mediante hidrólisis enzimática por 24 h de virutas de madera tratadas comparado con solo

15% obtenido para el material no tratado. Los factores que afectan el tratamiento de explosión con vapor son el tiempo de residencia, temperatura, tamaño de partícula y contenido de humedad.

El proceso tiene como desventaja que genera compuestos que pueden ser inhibitorios para el crecimiento microbiano, para la hidrólisis enzimática y la fermentación, por lo que la biomasa tratada se debe lavar con agua para removerlos (McMillan, 1994), aumentando el costo del proceso, además de la pérdida de sustancias solubles.

La adición de H_2SO_4 (o SO_2) o CO_2 en la explosión con vapor puede mejorar la hidrólisis enzimática, disminuye la producción de compuestos inhibidores y la completa remoción de hemicelulosa.

Un hallazgo importante en el mecanismo de este tratamiento es que se hidrolizan los grupos acetil de la hemicelulosa, de tal manera que se produce ácido acético y ocurre entonces una hidrólisis de la hemicelulosa por acción de la temperatura y la catálisis ácida. Como resultado se forma gran cantidad de furfural a partir de los azúcares producidos que limitan su publicación en las dietas de animales, aparte de que hay trabajos que reportan hasta 10% de degradación. Actualmente se continúa investigando este tratamiento pero ha habido necesidad de agregar pasos para destoxificar el material, por lo que se hace demasiado costoso para propósitos nutricionales. Canadá lideriza el desarrollo de la explosión con vapor. En Venezuela se ensayó con bagazo de caña de azúcar para rumiantes y no resultó atractivo.

2. Ácidos.

España, por ejemplo, ha decidido inclinarse por este pretratamiento. Se usan principalmente ácidos como el clorhídrico y el sulfúrico a altas temperaturas. El mecanismo de su acción es la hidrólisis de los enlaces tipo éter, los cuales son muy frecuentes en la lignina, y entre la lignina y la hemicelulosa en leguminosas. Dependiendo de las condiciones de reacción (concentración del ácido,

temperatura y tiempo) se podrán hidrolizar los enlaces glicosídicos de la hemicelulosa y la celulosa para formar los respectivos azúcares. El problema a nivel tecnológico de este pretratamiento es que ambientalmente es severo, los equipos de proceso son muy costosos, se degradan algunos aminoácidos de las proteínas presentes por la acción del ácido, y la formación de furfurales a partir de los azúcares formados (deshidratación en calor y medio ácido). Como el mayor déficit a nivel de alimentos para animales ocurre en los de estómago simple, concretamente en proteínas, no se recomienda este pretratamiento.

3. Alcalinos.

Se han investigado muchos pretratamientos alcalinos. Los más empleados usan hidróxidos de sodio, calcio y amonio.

El mecanismo del álcali es fundamentalmente la hidrólisis de los enlaces tipo éster, los cuales se encuentran generalmente enlazando la hemicelulosa con la lignina y grupos acetilo con la molécula de xilosa. Además solubilizan la hemicelulosa (neutralización de los ácidos urónicos presentes en la molécula) y la lignina (formación de fenóxidos solubles en agua). Como resultado, eliminan las barreras que rodean a la celulosa aumentando la susceptibilidad de ésta a la hidrólisis de las enzimas del rumen o comerciales. La velocidad de digestión ruminal también aumenta porque la hemicelulosa solubilizada es más fácil de hidrolizar por las enzimas. La presencia del álcali crea cargas negativas en las proteínas, por lo que provocan repulsión entre ellas facilitando su disolución. Si el material tratado se somete a una filtración, se separaría el filtrado que contiene gran cantidad de proteínas y las fracciones de hemicelulosa y lignina solubilizadas, y quedarían en el sólido la proteína residual, la celulosa y la hemicelulosa y lignina no solubilizadas.

El hidróxido de sodio ha aumentado considerablemente la digestibilidad ruminal de varios materiales, pero el material requiere ser neutralizado y lavado,

para remover la gran cantidad de sal formada por la neutralización con ácidos. Este proceso por lo tanto produce efluentes que representan un gran impacto ambiental, aparte del uso en si del hidróxido, y la consecuente pérdida de materiales solubles incluyendo proteínas y azúcares. Como los tiempos son entre 15 minutos y 2-3 horas, la posibilidad de degradación de los aminoácidos y condensación de los mismos es elevada, lo que disminuye severamente su uso potencial en alimentos.

El hidróxido de calcio es menos efectivo, eso significa que las condiciones tienen que ser más severas (mayor concentración del álcali, mayor temperatura, mayor tiempo) y por lo tanto presenta los mismos problemas que el anterior.

El hidróxido de amonio ha sido utilizado ampliamente en pajas de cereales y henos y muchas variantes de tecnologías amoniacaes requieren de tiempos largos. El uso del amoníaco, a pesar de considerarse tecnología verde comparado con los otros álcalis y los ácidos minerales, es irritante al ser respirado por lo que su concentración en el aire está limitada bajo norma.

En países asiáticos, africanos y de Latinoamérica, se utiliza la amonificación vía urea. Este proceso utiliza una solución de urea (concentración <10% p/v) en la cual se coloca el material por tiempo relativamente corto (minutos). El material se saca de la solución, se escurre y se introduce en bolsas y se deja a la intemperie expuesta al sol. Por lo general se usan entre 2 y 3 semanas. Durante este tiempo se forma amoníaco por acción de la enzima ureasa (producida por microorganismos presentes en la biomasa) sobre la urea y actúa sobre el material. La temperatura que alcanza el material en días de sol cataliza la acción del amoníaco. Se ha logrado aumentar la digestibilidad ruminal de la materia seca de henos producidos en el estado Zulia en 6 unidades porcentuales. En ensayos realizados en el CEPA (LUZ) liderados por el Dr. A. García, se observó la gran palatabilidad de los henos amonificados y se encontraron aumentos de peso hasta del 30% con respecto a los maños control. Muchos investigadores sostienen que esta acción se debe principalmente a la contribución del amoníaco residual como

proteína cruda, ya que dichos henos por lo general contienen menos de 7% de proteína cruda. Sin embargo, en ensayos realizados en pasto elefante enano en condiciones muy bien monitoreadas utilizando hidróxido de amonio (FEC-LUZ), se alcanzaron temperaturas de 50°C al sol y las muestras presentaron un aumento de 40% de la digestibilidad enzimática in vitro con respecto a las muestras control. Dado que el amoníaco residual no influye en esta determinación, no hay duda que ocurre cierta acción del amoníaco a dicha temperatura durante las semanas que duró el experimento. La técnica es muy útil para granjas pequeñas pero es inapropiada para grandes volúmenes de heno. Además, se pierde a la atmósfera la mayor parte del amoníaco formado.

La técnica con urea ha sufrido modificaciones que mejoran su efectividad. En la Universidad del Zulia (Fac. Agronomía), los Dres. M. Ventura y A. Barrios propusieron y ensayaron una modalidad donde se agregan enzimas (ureasa) a la urea disuelta que se encuentra en un tanque. Con el tiempo se forma amoníaco y los vapores de éste difunden hacia la biomasa lignocelulósica que se encuentra sostenida y aislada a la atmósfera por encima del tanque con urea. La ventaja de este sistema es que la humedad del material es mucho menor lo que se traduce en menor contaminación del material y menores gastos de secado. No obstante, este sistema no impide que los vapores salgan al ambiente porque los sistemas no son herméticos, ni han logrado reducir significativamente los tiempos del proceso, aunque se han reportado aumentos hasta 8-10 unidades porcentuales. La técnica tampoco es sencilla de escalar de forma eficiente.

Se han desarrollado recientemente procesos donde la amonificación ocurre dentro de reactores y donde el amoníaco siempre se encuentra confinado. Uno de estos procesos es el AFEX (Explosión amoniacal de la fibra o Expansión de la fibra por congelación), que está siendo desarrollado en USA, donde se usa amoníaco anhidro en un reactor cerrado a temperaturas mayores de 75°C y presiones mayores de 300 psia por tiempos que llegan hasta los 30 minutos. En

este proceso el amoníaco actúa como un nucleófilo en la reacción, es decir es el agente que inicia la hidrólisis de los enlaces ésteres. El resultado de esta hidrólisis es la ruptura del enlace con la consecuente formación de amidas, las cuales han sido objetadas para la alimentación de rumiantes, pudiendo ocasionar temblores en los animales. Una ventaja de esta tecnología con respecto a las otras es que no hay necesidad de neutralizar ni de lavar el material ya que el amoníaco se libera al bajar la presión súbitamente, recogiéndose en un tanque desde donde puede ser recuperado y reciclado. Comparado con los procesos donde se utiliza urea tiene la ventaja de su tiempo mucho menor, confinamiento y reciclaje del amoníaco y posibilidad de escalamiento a nivel industrial.

En la tecnología venezolana de Presurización y Despresurización Amoniaca (PDA), desarrollada por el grupo del Dr. A. Ferrer (FEC-LUZ) que se aplica y discute en este trabajo, se cambió el mecanismo de la reacción. La reacción se controla con presión suministrada por la adición de nitrógeno y suele durar entre 2 y 5 minutos. El amoníaco se libera de igual manera por disminución de la presión del sistema. La acción de la descompresión es esencial para el proceso AFEX, mientras que solo explica el 10% de la acción del proceso PDA. La reducción del tiempo del proceso se logró garantizando que la reacción ocurriese principalmente en fase líquida y aprovechando el efecto exotérmico de la solución del amoníaco anhidro en agua. Además se han optimizado la carga de amoníaco, la humedad del material, el tiempo de adición de amoníaco y la temperatura del proceso, entre otras variables, para varios materiales.

El proceso PDA a través de la ruptura de enlaces ésteres principalmente entre la hemicelulosa y la lignina, la desacetilación de la hemicelulosa y el aumento del área interfacial del material provocado por una despresurización súbita contribuye a separar el material vegetal y permite casi la conversión cuantitativa de la celulosa y hemicelulosa a sus azúcares monoméricos, tanto en el rumen de los animales rumiantes como por hidrólisis enzimática in vitro. Como consecuencia, también aumenta la extracción y remoción de otros componentes

vegetales como la proteína (trabajo liderado por la M.Sc. L. Urribarrí de la FEC-LUZ), para producir harinas proteicas de uso en animales de estómago simple. Se ha estudiado el efecto del amoníaco mediante estudios de cristalinidad (difracción de rayos X), ruptura de enlaces tipo éster (GC), espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) e isotermas de adsorción.

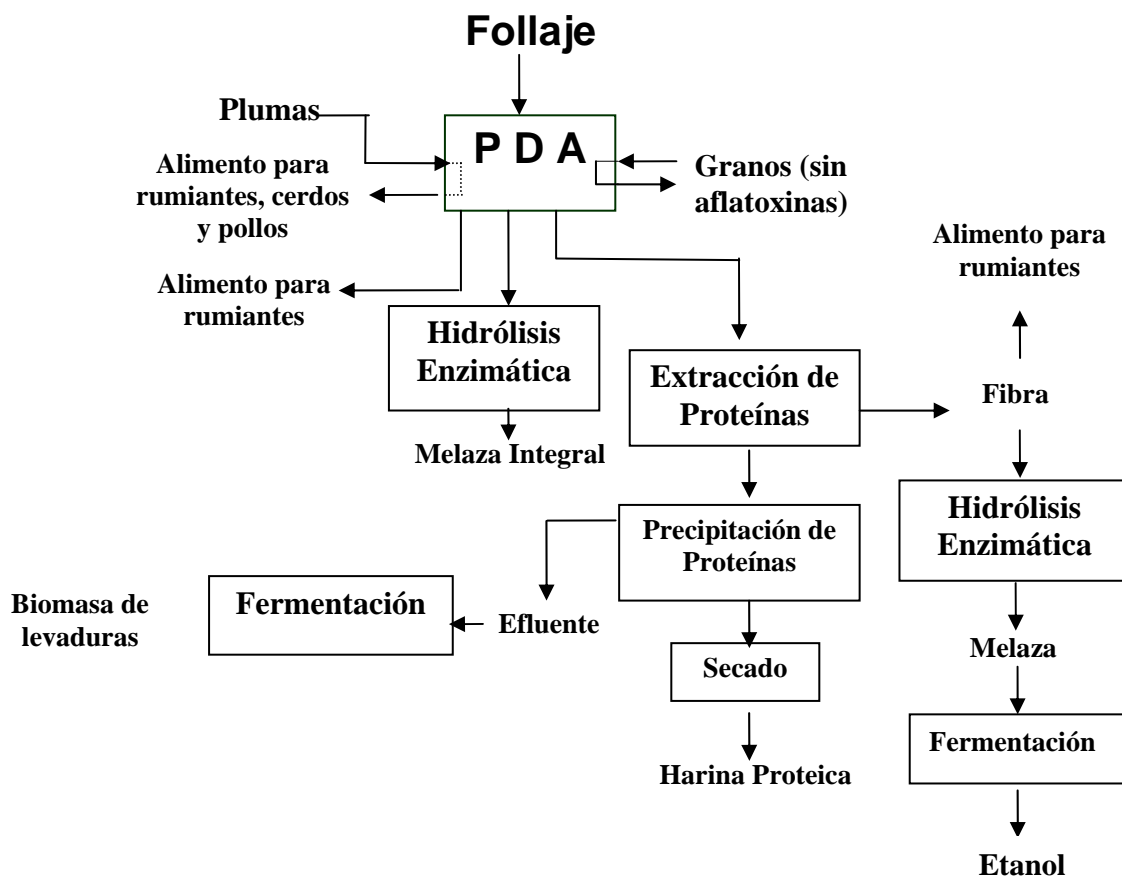
Actualmente se cuenta con un equipo PDA a escala piloto (8 kg/h), para el procesamiento del material vegetal, equipo desarrollado por el PTU-LUZ y la empresa TROPIFOODS. El equipo PDA consta de un reactor provisto de una resistencia externa de calentamiento. Se carga el material en el reactor, mediante una bomba se alimenta amoníaco al mismo, se presuriza con nitrógeno y se agrega agua a la temperatura de reacción, posteriormente se despresuriza mediante una válvula de expansión, el amoníaco pasa al tanque de expansión y luego al condensador donde se recupera éste para su reciclaje. Todo el proceso es regulado mediante un panel de control.

Se construyen actualmente una planta piloto para la producción de concentrados proteicos (INIA-FCI-LUZ) que será acoplada a la planta piloto PDA y una planta PDA semicomercial de 1 ton/h (MPPCT, FONACIT) con módulo para la elaboración de concentrados proteicos y módulo piloto para la producción de etanol (PERLA). Estas fábricas que permiten elaborar una gran variedad de productos a partir de los componentes de las materias primas vegetales son denominadas Biorefinerías.

Las plantas mencionadas podrán utilizar una gran variedad de follajes y residuos agroindustriales. Es posible desarrollar una industria de producción de biomasa de pastos utilizando pasto de corte, con el fin de ser procesado en las biorefinerías. Con respecto a los residuos agroindustriales, la paja de maíz, la paja de arroz, el bagazo de la caña de azúcar y el follaje de yuca, son los residuos más abundantes del país, creando problemas ambientales, careciendo de uso o subutilizándose.

Venezuela es el principal exportador de amoníaco de América Latina, con plantas en el occidente, centro y oriente del país y está expandiendo aún más su producción, por lo que la materia prima amoníaco está garantizada.

Figura 1. Biorefinación del follaje mediante el pretratamiento PDA.



Producción de alimentos energéticos para rumiantes.

En cualquier material que se procese en el reactor PDA (Figura 1) en condiciones apropiadas, aumenta la reactividad de la celulosa y la hemicelulosa

hacia la hidrólisis enzimática y por lo tanto su digestibilidad ruminal. Además de la acción en el reactor, solo se necesita disminuir el contenido de humedad del material hasta valores que permitan su almacenamiento prolongado. Se ha aumentado la DRMS del pasto elefante enano verde de 62 hasta 85%, que es una digestibilidad característica de granos como el maíz. Un animal alimentado con un material así alcanzaría el peso de comercialización mucho antes de lo previsto. Tampoco habría efectos negativos en la cantidad de grasa de la leche como ocurre con los granos. Cuando un rumiante se alimenta con un producto muy digerible y de base lignocelulósica, el rumen se acondiciona y aumenta la eficiencia digestiva para alimentos menos nutritivos.

Se aumentó la DRMS de la paja de arroz desde 30 hasta 70% en condiciones óptimas de procesamiento PDA, que es la digestibilidad de un pasto verde muy joven o pasto de un país de clima templado, convirtiendo este desecho en un alimento excelente para rumiantes. Los henos de paja guinea se han llevado desde 48% hasta 63%, valor típico de un pasto verde, eliminando así el efecto de la sequía. Resultados igualmente excelentes se han encontrado en leguminosas como alfalfa y maní forrajero. Los estudios enzimáticos realizados recientemente en bagazo de la caña de azúcar también son prometedores. En todos los casos mencionados se ha encontrado una alta correlación entre la hemicelulosa solubilizada por el tratamiento y la digestibilidad resultante. Aunque el contenido de celulosa no suele variar, estudios de difracción de rayos X muestran cambios en la estructura cristalina.

Producción de concentrados proteicos y fibra residual para rumiantes.

Según la Figura 1, el material pretratado con PDA se somete a un proceso de extracción generalmente con álcali en el caso de forrajes y con agua en el caso de follaje de yuca y lemna. La extracción se basa en la formación de cargas

negativas en la molécula de proteína debido al pH del medio extractante comparado con el punto isoeléctrico de las proteínas. El aumento del rendimiento de extracción de proteínas con el PDA probablemente ocurre cuando las proteínas se encuentran enlazadas con enlaces ésteres a otros componentes de la célula, incluyendo la pared celular y el efecto de disrupción de la matriz por acción de la descompresión. Posteriormente a la extracción, el filtrado se somete a un proceso termoquímico para desnaturalizar e insolubilizar las proteínas, produciéndose la precipitación de las mismas. Una filtración o centrifugación posterior separará la proteína precipitada que será finalmente deshidratada para formar el concentrado proteico. La primera filtración separa un residuo fibroso que, por haber sido tratado con PDA, presenta muy alta digestibilidad y es adecuado para animales rumiantes. La segunda separación produce un sobrenadante rico en minerales que se puede utilizar para procesos fermentativos como fuente de nutrientes para los microorganismos, entre ellos, producción de levadura para alimento animal, enzimas para los procesos de hidrólisis y bioetanol como combustible. Realizando algunos cambios en el proceso de extracción y precipitación es posible seleccionar la precipitación de las proteínas blancas (citoplásmicas) que presentan mejor perfil de aminoácidos que las proteínas verdes (cloroplásticas). Generalmente están distribuidas 50:50.

En el 2005 se demostró que el tratamiento PDA aumenta el rendimiento de extracción de proteínas blancas del pasto elefante enano desde 11,7 hasta 52,7%, con lo cual se produce un concentrado proteico de 34,9% de proteínas. El perfil aminoacídico del concentrado obtenido del material tratado fue muy superior a la del concentrado del material no tratado. El tiempo corto del pretratamiento (2 min), una carga de amoníaco de 1 kg/kg de materia seca, la temperatura relativamente baja (90°C) y el enfriamiento rápido ocasionado por la despresurización, impide que se degraden las proteínas. En proteínas de plumas se encontraron degradaciones de algunos aminoácidos para cargas de 2 kg NH₃/kg de materia seca a 100°C por 5 minutos. El resultado obtenido con el pasto elefante enano

confirmó al aplicar el tratamiento al follaje de yuca y a la lemna. En el caso del follaje de yuca el rendimiento de extracción aumentó en un 50% y en el caso de la *Lemna obscura* aumentó casi en un 300%, siendo el material procesado que ha mostrado mayor efecto del pretratamiento PDA. Se ha comprobado que la efectividad del pretratamiento PDA disminuye a medida que aumenta el contenido de lignina del material como es el caso del follaje de yuca. Se han obtenido concentrados proteicos hasta con 44% de proteína verdadera (lemna), lo cual podrá alcanzar 46-48%, típicos de la harina de soya, cuando las condiciones de precipitación se optimicen. El perfil de aminoácidos de los concentrados proteicos de la lemna y del pasto elefante enano es similar o superior al de la harina de soya, especialmente en lisina, por lo que estos concentrados podrán utilizarse en grandes proporciones en la dieta de animales de estómago simple, como sustitutos de la harina de soya importada. En una industria donde se utilicen materiales como el follaje de yuca, lemna, pastos y leguminosas, se obtendrían dos subproductos: concentrados proteicos para animales de estómago simple y fibras de alta digestibilidad para rumiantes.

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos en la extracción proteica de diferentes materias primas.

Tabla 1. Rendimiento de extracción proteica en materiales no tratados y tratados con PDA.

Material	Rendimiento de extracción (%)		Contenido proteico del concentrado T (% b,s)
	No tratado (NT)	Tratado (T)	
Pasto elefante enano*	11,7	52,7	34,9
Follaje de yuca*	20	29,1	36,4
<i>Lemna obscura</i> **	36,1	87,2	44

*: Proteína blanca, **: Proteína total

Eliminación de aflatoxinas presentes en granos

Las aflatoxinas tienen estructuras en las cuales está presente un anillo lactona, el cual es un éster cíclico, y por lo tanto sensible a la acción del amoníaco. De esta manera sería posible descontaminar los granos utilizando la tecnología PDA. Actualmente se realizan ensayos en maíz y sorgo contaminados con aflatoxinas (250 ppb). Como consecuencia del tratamiento, podría aumentar la digestibilidad del almidón y las proteínas, aumentando así el valor nutricional de los granos.

Producción de sueros vegetales para cerdos

La celulosa y la hemicelulosa presentes en el follaje pretratado con PDA se han hecho más susceptibles a la hidrólisis enzimática para producir los azúcares constituyentes de las cadenas. En el caso del pasto elefante enano no tratado, por ejemplo, la conversión de ambos polímeros fue de 18%, pero al someterlos al tratamiento PDA la conversión fue de 85%. En este proceso, si se ajusta el pH a un valor conveniente, se separa el 80% de las proteínas, las cuales quedan en solución junto con los azúcares producidos por la hidrólisis. Al filtrar, se separan la lignina y la fracción de polisacáridos que no se hidrolizó, dejando la solución azucarada enriquecida con proteínas. Se conoce ampliamente el beneficio de alimentar cerdos con suero lácteo, rico en proteínas y lactosa; en este caso, el suero vegetal tendrá un contenido similar de proteínas y será rico en glucosa, en vez de lactosa. La hidrólisis de la hemicelulosa produce principalmente pentosas (xilosa). Estudios realizados han revelado que las mezclas de hexosas y pentosas son adecuadas para la alimentación de cerdos, siempre y cuando el contenido de xilosa no sobrepase el 33% del contenido total de azúcares. Este alimento puede convertirse en el alimento base de los cerdos en un esquema de alimentación líquida como lo tienen países como Inglaterra. El suero vegetal es rico en minerales.

Producción de bioetanol

Con la inevitable disminución de la oferta de petróleo en el mundo, con el consecuente aumento de su precio, ha aumentado el interés en fuentes de energía alternativas. El petróleo suple el 97% de la energía utilizada para el transporte, por lo que se ha planteado la posibilidad de utilizar alcohol como combustible, y ya son varios los países que lo utilizan como etanol puro o mezclado con gasolina (Brasil, USA). Venezuela actualmente importa 25 millones mensuales de etanol de Brasil para mezclarlo con la gasolina que se vende en el oriente del país. Por otro lado, se busca introducir combustibles no contaminantes para mejorar la calidad del aire, al tiempo que se hace un mejor uso de los recursos naturales renovables, generando un amplio estímulo al desarrollo del campo y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se acaba de prohibir el uso de compuestos antidetonantes como el MTBE, los cuales pueden ser sustituidos por etanol. Se puede decir que para la producción de etanol en el hemisferio norte (USA, Canadá) se utilizan preferentemente los cereales (extracción del almidón seguida de hidrólisis ácida o enzimática para producir los azúcares) mientras que en el sur (Brasil) se emplea el jugo de la caña de azúcar, por su adaptación a las condiciones climáticas. En ambos casos se utilizan alimentos para producir energía, contribuyendo con la escasez de los mismos.

Actualmente la producción de biocombustibles líquidos a partir de materiales lignocelulósicos comienza a ser competitiva debido a los altos precios del petróleo. Las fibras presentes en materiales como el bagazo de la caña de azúcar y las pajas de maíz y arroz tratados con amoníaco y las fibras residuales de la extracción proteica de materiales como follaje de yuca, lemna, pastos y leguminosas, quedan listas para ser hidrolizadas con alto rendimiento por

enzimas. En este último caso, el proceso es muy rentable porque se obtienen dos subproductos de alto valor agregado, concentrados proteicos y bioetanol.

Algunos datos de conversión de fibras en azúcares mediante hidrólisis enzimática de materiales pretratados con amoníaco aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Conversión de polisacáridos en azúcares reductores mediante hidrólisis enzimática de materiales no tratados y tratados con PDA.

Material	Conversión (%)	
	No tratado	Tratado
Pasto elefante enano	18	90
Paja de arroz	32,5	80,4
Maní forrajero	19,6	65,3
Alfalfa	26,4	76,4
Fibra de maíz	31,4	85,2
Follaje de yuca*	16,7	54,7
Bagazo de la caña de azúcar*	21,8	58,5
<i>Lemna obscura</i> *	32	86

*: Condiciones de pretratamiento no optimizadas.

Conclusiones

Las condiciones están dadas para aplicar modernas tecnologías donde se aprovechen con eco-eficiencia las riquezas y oportunidades con que cuenta Venezuela.

Se están construyendo fábricas de alimentos con tecnologías modernas de suficiente capacidad para realizar estudios in vivo por tiempos prolongados en un gran número de especies animales.

La riqueza vegetal de Venezuela puede utilizarse para garantizar la soberanía alimentaria que tanto pretendemos y como regalo obtendremos fuentes alternativas renovables de energía que aminoren el impacto ambiental que ocasiona el uso de combustibles fósiles.

Las tecnologías mencionadas se basan en la actividad agropecuaria, fuente primaria de empleo de un país independiente.

Agradecimiento

Al Parque Tecnológico Universitario de LUZ, TROPIFOODS, CONDES, FUNDACITE, INIA-ZULIA, ICLAM, colegas y estudiantes de las Facultades de Agronomía, Ciencias Veterinarias, Experimental de Ciencias, Ingeniería, Medicina y Ciencias Económicas de la Universidad del Zulia, FONACIT, MPPCT, PERLA, PETROPERIJÁ e INZIT.

