

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

TRATAMIENTO ALCALINO DE LOS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE LA PRODUCCIÓN DEL TEQUILA, PARA SU USO COMO COMPLEMENTO DE ALIMENTO DE RUMIANTES.

* Clementina Rita Ramírez Cortina¹
María de la Soledad Alonso Gutiérrez²
Luc Rigal²

*AGROINDUSTRIAL RESIDUALS ALKALINE TREATMENT
OF THE TEQUILA PRODUCTION, FOR ITS USE AS A
RUMIANTS' FOOD COMPLEMENT*

Recibido el 25 de julio de 2011; Aceptado el 29 de junio de 2012

Abstract

In the Tequila production, an alcoholic beverage from Mexico, almost 0.8 Kg of agroindustrial residuals (agave bagasse) are generated for every tequila liter produced. These residuals are currently being deposited in confined places, without any treatment or utilization. The agave bagasse analysis resulted in: cellulose 42%, lignin 14%, hemicellulose 18.5%, total nitrogen 2.6%, pectine 0.8%, fats and oils 0.8%, total reducer sugars 5%, ashes 6.2%. In this research, the technical feasibility of the use of bagasse as ruminant fodder was studied. To be able to use the bagasse as fodder complement it is necessary to increase its digestibility, so bagasse alkaline treatments were carried out for this purpose. Sodium hydroxide, ammonium hydroxide and calcium hydroxide were used for the alkaline treatments. The process operating conditions were: temperature 30 and 50 °C; alkali concentration 2, 5 and 10 %, bagasse humidity 20 and 80%, reaction time 24 hours. The bagasse digestibility with treatment and without treatment was carried out by the in sacco method. The digestibility increase with alkali was as follows: with sodium hydroxide it was around 43%, with ammonium hydroxide it was 50% approximately and with calcium hydroxide it was about 54% without treatment the bagasse digestibility was of 36%.

Key Words: Agave, alkaline treatment, bagasse, digestibility.

¹ Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

² Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

*Autor Corresponsal: Departamento de Energía, División de CBI, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco. San Pablo 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, CP 02200 México D. F., México.
Email: crrc@correo.azc.uam.mx

Resumen

En la producción de tequila, bebida alcohólica originaria de México, se generan cerca de 0.8 Kg de residuo agroindustrial (bagazo de agave) por cada litro de tequila producido. Este residuo, actualmente es depositado en lugares confinados, sin ningún tratamiento ni utilización. El análisis del bagazo de agave dio como resultado: celulosa 42%, lignina 14%, hemicelulosas 18.5%, nitrógeno total 2.6%, pectinas 0.8%, grasas y aceites 0.8%, azúcares reductores totales 5%, y cenizas 6.2%. En esta investigación, se estudió la viabilidad técnica de usarlo como complemento alimenticio de rumiantes. Para usar el bagazo como alimento animal es necesario aumentar su digestibilidad, con tal fin se realizaron tratamientos alcalinos del bagazo. Para el tratamiento alcalino se usaron: hidróxido de sodio, hidróxido de amonio e hidróxido de calcio. Las condiciones de operación del proceso fueron: temperatura 30 y 50 °C; concentración del álcali 2, 5, 10%; humedad del bagazo 20 y 80%, tiempo de reacción 24 horas. La digestibilidad del bagazo con tratamiento y sin tratamiento se realizó por el método *in sacco*. El aumento de la digestibilidad con álcalis fue el siguiente: con hidróxido de sodio fue de alrededor de 43 %, con hidróxido de amonio fue de aproximadamente 50% y con hidróxido de calcio de alrededor de 54 %; sin tratamiento la digestibilidad del bagazo fue de 36%.

Palabras clave: Digestibilidad, bagazo, agave, tratamiento alcalino.

Introducción.

El agave *tequilana* Weber, variedad *azul*, se utiliza para la producción de tequila con denominación de origen. Este agave fue seleccionado por los productores de tequila a través del tiempo [Gentry 1982 ; Valenzuela 2003]. La transformación industrial del agave *tequilana* Weber, variedad *azul*, para la producción de tequila, genera dos productos principales: el jugo de azúcares que serán utilizados para la obtención del tequila y el bagazo de agave residuo sólido de la extracción.

El bagazo de agave, residuo agroindustrial de las fábricas de tequila, es producido en una relación de 0.8 Kg de bagazo/litro de tequila fabricado. Actualmente es depositado en lugares específicos sin ningún tratamiento ni valorización. Este residuo está compuesto de material fibroso heterogéneo y de un material orgánico no fibroso en forma de partículas finas. El bagazo está compuesto de material lignocelulósico, azúcares y otros compuestos que por sus características físico-químicas puede ser utilizado para la elaboración de diversos productos de interés económico.

Para aumentar la digestibilidad de los residuos lignocelulósicos se pueden emplear diversos tratamientos que pueden ser físicos, químicos (ácidos, alcalinos) y biológicos. En este estudio se eligieron los tratamientos alcalinos con hidróxido de sodio, hidróxido de calcio e hidróxido de amonio. Se eligieron estos tratamientos por ser los más económicos y de facilidad técnica. La hidrólisis de los residuos lignocelulósicos por medio de tratamientos químicos se basan en la reacción del compuesto químico principalmente con las ligninas. (Dubois, M.F., 1982, Alonso, 1993, Yokoé, Y., 1993, Ramírez C., 2008)

En esta investigación se desarrolla una nueva valorización del bagazo de agave como complemento de forraje animal, aumentando su digestibilidad con tratamiento químico alcalino con hidróxido de sodio, hidróxido de amonio e hidróxido de calcio, con el propósito de reducir la lignina.

El tratamiento del bagazo de agave con hidróxido de sodio va a saponificar las ceras y las cutículas, y según las condiciones experimentales va a solubilizar la lignina y las hemicelulosas y además va a propiciar el hinchamiento de la celulosa para tener mayor contacto con el rumen del estómago de los rumiantes. (Alonso, 1993, Alonso 2012, Dubois, 1982)

El primer paso de esta investigación fue la caracterización física y química de este residuo agroindustrial, posteriormente se estudiaron las estrategias de diferentes protocolos de tratamiento químico variando el tipo de álcali, la concentración, la temperatura y la humedad. El bagazo después del tratamiento es sometido a pruebas de digestibilidad.

Metodología.

Análisis químico

En el bagazo de agave se analizaron sus componentes químicos por los métodos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros y técnicas de análisis para la caracterización del bagazo de Agave

PARÁMETRO	Técnica analítica	Referencia
Humedad	Gravimétrica	E.N.S.A.T,1992
Cenizas	Gravimétrica	E.N.S.A.T,1992
Celulosa	Van Soet y Wine (ADF-NDF)	E.N.S.A.T,1992
Hemicelulosas	Van Soet y Wine (ADF-NDF)	E.N.S.A.T,1992
Ligninas	Van Soet y Wine (ADF-NDF)	E.N.S.A.T,1992
Nitrógeno total	Kjeldahl	E.N.S.A.T,1992
Grasas y aceites	Extracción con éter	E.N.S.A.T,1992
Azúcares reductores	Fehling	Prat, 1993
Pectinas	Extracción ácida y gravimétrico	Monties, 1982

Tratamiento químico

En el tratamiento alcalino se usaron hidróxido de sodio, hidróxido de amonio e hidróxido de calcio, para aumentar la digestibilidad del bagazo de agave. El equipo utilizado en esta investigación fue un reactor de vidrio de 5 L, con doble pared para circulación de agua para el control de la temperatura de la reacción y con agitación mecánica. Las condiciones de operación fueron: concentración del hidróxido 2, 5 y 10%; temperatura: 30 y 50°C; humedad del bagazo: 20 y 80% y tiempo de reacción 24 horas.

Digestibilidad

Las pruebas de digestibilidad se realizaron con dos lotes de bagazo de agave de dos fábricas de tequila, tratadas con hidróxido de acuerdo a lo descrito anteriormente. La digestibilidad se determinó por el método "in sacco" en el rumen de una vaca con estómago fistulado. Las pruebas se hicieron durante 48 horas y después fueron analizadas y se calculó su digestibilidad.

Resultados.

Los resultados de la caracterización química del bagazo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis químicos del bagazo de agave (con 5% de humedad)

PARÁMETRO	(%) Materia Seca
Cenizas	6.2
Celulosa	42
Hemicelulosas	18.5
Ligninas	14
Nitrógeno total	2.6
Grasas y aceites	0.8
Azúcares reductores	5
Pectinas	0.8

El bagazo sin tratamiento dio una digestibilidad de 36 %, lo cual sirve de base para comparar los resultados de digestibilidad con los diferentes tratamientos alcalinos.

Tabla 3: Condiciones de operación de los tratamientos químicos alcalinos del bagazo de agave y los resultados de digestibilidad en porcentaje de materia seca

Humedad (%)	Concentración del reactivo (%)	Temperatura (°C)	Digestibilidad (% MS)		
			NaOH	Ca(OH) ₂	NH ₄ OH
80	2	50	39,0	46,0	44,5
80	5	50	42,4	47,6	46,8
80	10	50	43,6	54,5	50,5
80	2	30	36,8	41,0	40,0
80	5	30	39,6	43,2	42,8
80	10	30	42,7	51,8	46,3
20	2	50	36,6	40,0	39,0
20	5	50	39,2	41,6	41,6
20	10	50	40,8	49,7	42,5
20	2	30	35,5	38,0	37,6
20	5	30	37,1	40,5	40,0
20	10	30	40,3	47,1	43,0

Las condiciones experimentales del tratamiento alcalino y los resultados de digestibilidad que se obtuvieron son presentados en la Tabla 3. En el tratamiento con hidróxido de sodio el aumento de la concentración de la sosa mejoró la digestibilidad del bagazo de agave, la mejor digestibilidad fue de 43.6%.

En el caso del tratamiento con hidróxido de calcio, la ganancia de digestibilidad es más elevada que en el caso del tratamiento con la sosa, logrando un 54.5 % de digestibilidad. Por otra parte, el tratamiento con hidróxido de amonio dio como mejor resultado un 50 % de digestibilidad.

Análisis de resultados

Tratamiento con hidróxido de sodio

Los resultados obtenidos de la digestibilidad del bagazo de agave con tratamientos químicos realizados con hidróxido de sodio a diferentes concentraciones (2, 5 y 10 %) se presentan gráficamente en la Figura 1 para mostrar la tendencia de los valores de digestibilidad, así se observa que el aumento en la concentración de NaOH aumenta la digestibilidad del bagazo. Asimismo la digestibilidad aumenta con el 80 % de humedad y 50 °C de temperatura; esto es coherente con el hecho de que al aumentar la humedad y la concentración de la solución de hidróxido de sodio en el tratamiento, la solubilización de las ligninas y de las hemicelulosas y la solvatación de la celulosa son más importantes. Es interesante remarcar que el efecto de una elevada temperatura no es más significativo que la alta concentración de sosa. Esto pudiera estar ligado a la más fuerte degradación de los azúcares en tales condiciones, que tendrán un efecto negativo en la tasa de digestibilidad la cual sin embargo, sería compensada por una mejor accesibilidad a la celulosa. La digestibilidad mayor fue de 43.6%, siendo las otras menores a 43%.

Al comparar las digestibilidades del bagazo a diferentes condiciones, podemos observar que aún cuando la mejor digestibilidad fue de 43.6 % con un tratamiento de 10% de hidróxido de sodio, 50°C y 80% de humedad, lo cual implica un costo más elevado en sosa y energía para el calentamiento a 50°C, comparado con la digestibilidad de 42.7 % del bagazo tratado en condiciones experimentales de 10 % de hidróxido de sodio y 30°C, la diferencia entre las dos digestibilidades sería de 0.9%, lo cual no justificaría el aumento de costos para elevar la temperatura de 30°C a 50°C. Por otra parte, la digestibilidad del bagazo tratado con 5% de sosa, 50°C y 80 % de humedad, fue de 42.4%, lo cual nos indica que en este caso el ahorro económico sería en la menor cantidad de sosa (5%), y la disminución de la digestibilidad con respecto al mayor valor (43.6 %) sería solo de 1.2%, por lo que se debe tomar en cuenta el costo/beneficio del proceso de tratamiento químico para elegir las condiciones óptimas del tratamiento del bagazo con sosa.

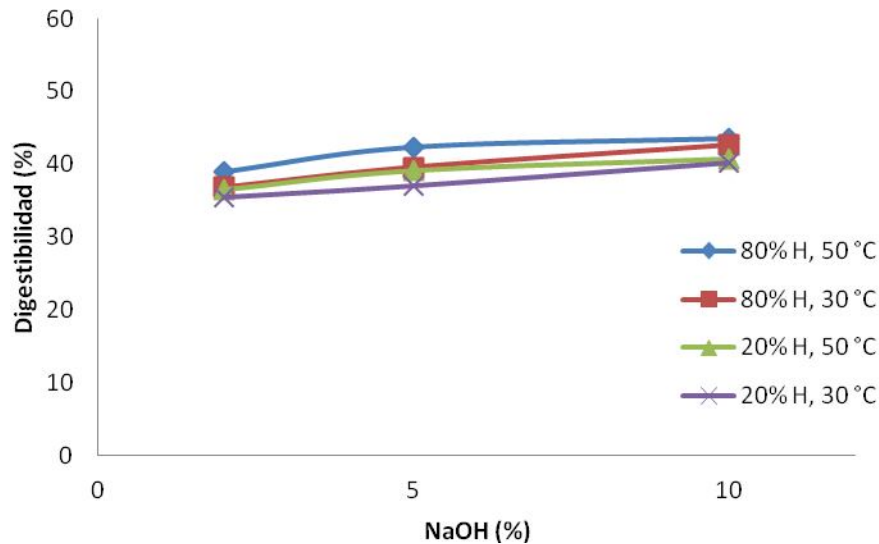


Figura 1. Digestibilidad del bagazo de agave tratado con NaOH

Tratamiento con hidróxido de calcio

En el caso del hidróxido de calcio (Figura 2), el aumento de la digestibilidad se obtiene sistemáticamente con el aumento de la concentración de hidróxido de calcio, humedad, y temperatura, sin efectos de interacción negativa; la ganancia de digestibilidad es más elevada que la obtenida en el caso del hidróxido de sodio. En las mejores condiciones, la digestibilidad alcanza 54.5%, siendo una ganancia de digestibilidad del 50% respecto a la del bagazo no tratado (36%).

La diferencia entre los tratamientos con NaOH y con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es debido al hecho de que a diferencia del NaOH, el hidróxido de calcio es una base menos fuerte, apta para proporcionar iones OH^- para la solvatación de las uniones hidrógeno y la hidrólisis de las uniones esteres que asocian los constituyentes fibrosos, más que la relación $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /substrato, la relación sólido/líquido y la temperatura serán elevadas porque ellas aumentan la solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el agua. Pero el pH del medio es menos elevado, y el ion Ca^{++} es conocido por proteger los azúcares de su degradación por los hidroxilos (OH^-), debido a que forman complejos con los azúcares. También la degradación de los azúcares en ácidos polihidroxilados es menos rápida con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que con NaOH. [Dubois,1982]. Además la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en el tratamiento, nos proporciona un aporte de calcio bastante importante, lo que será benéfico para la composición de las raciones de alimento animal, que generalmente contienen de 4 a 5 % de materia mineral, con una relación de Ca^{++} / fósforo de 1.5 a 3.

En el tratamiento del bagazo con hidróxido de calcio, se puede observar (Figura 2), que las condiciones del tratamiento marcan verdaderamente unas curvas bien separadas, mostrando la

influencia de la humedad, concentración del álcali y la temperatura, lo cual no se tienen en el tratamiento con el hidróxido de sodio en el cual, las curvas casi se sobrepone unas con otras, habiendo poca diferencia entre los resultados de las digestibilidades del bagazo tratado con hidróxido de sodio a diferentes condiciones de temperatura, concentración del álcali y porcentaje de humedad.

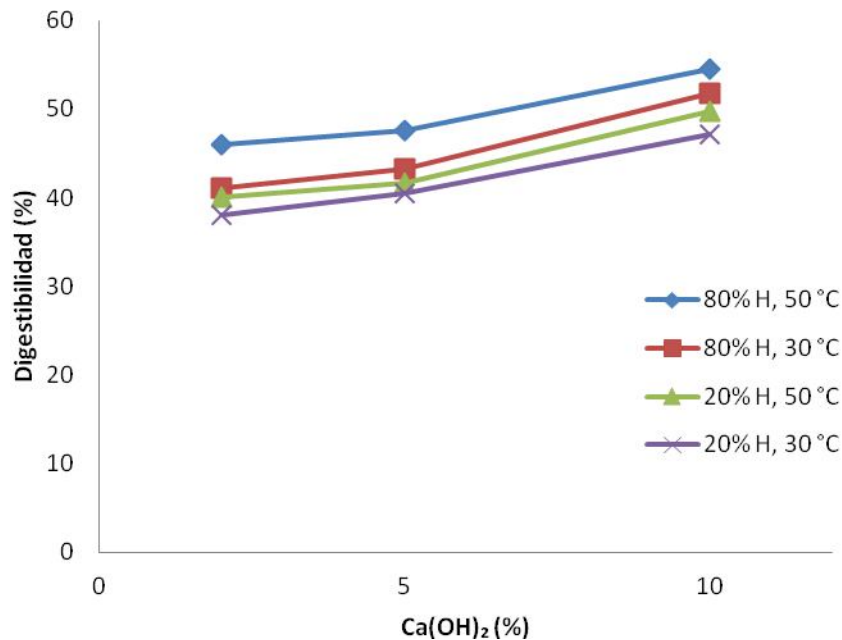


Figura 2. Digestibilidad del bagazo de agave tratado con Ca(OH)_2

La digestibilidad del bagazo tratado con hidróxido de calcio aumentó hasta 54.5%, lo cual la hace comparable a la digestibilidad de la alfalfa, con una digestibilidad de 60%, alimento de mayor consumido por los animales rumiantes (Ramírez C. 2008).

Tratamiento con hidróxido de amonio

Con el hidróxido de amonio, las tendencias debidas a la variación de la concentración del álcali, la humedad y la temperatura, son las mismas que con el hidróxido de calcio, pero con un efecto aún más remarcado respecto al contenido del agua a concentración y temperaturas más elevadas (Figura 3). En el agua, el NH_4OH es una base suficientemente fuerte para debilitar y romper las uniones de hidrógeno intermoleculares, llevando a la solubilización de las hemicelulosas y al hinchamiento de la estructura cristalina de la celulosa [Yokoé et al. 1993]. Pero el aumento de la concentración y de la temperatura para los dos porcentajes de humedad investigados podrán también favorecer las reacciones de aminación de las funciones ester

fenólicas y urónicas [Yokoè et al., 1993] afectando negativamente el hinchamiento de la celulosa. En las mejores condiciones de tratamiento, la digestibilidad llegó a 50%, siendo inferior a la obtenida con hidróxido de calcio.

Respecto al bagazo sin tratamiento, con el hidróxido de amonio se obtuvo un aumento del 10 % en su digestibilidad, lo cual mejora las posibilidades de su uso para la producción de raciones alimenticias de animales rumiantes.

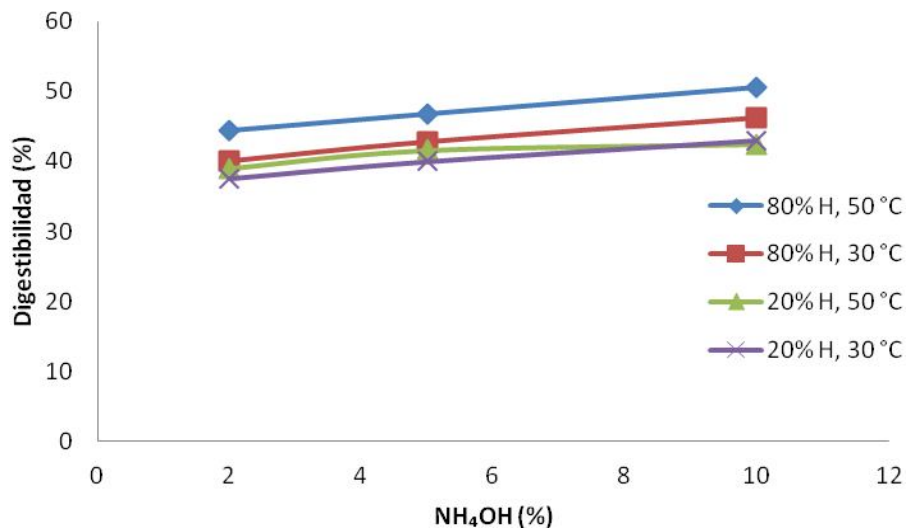


Figura 3. Digestibilidad del bagazo de agave tratado con NH₄(OH)

Conclusiones

Los resultados experimentales del tratamiento alcalino del bagazo de agave con hidróxido de sodio, hidróxido de calcio e hidróxido de amonio muestran que los tres procesos aumentan la digestibilidad del bagazo, cada uno bajo diferentes condiciones de concentración, temperatura y porcentaje de humedad. Sin embargo es importante considerar la relación costo/beneficio de cada proceso, tomando en cuenta el costo de los reactivos y la energía para mantener la temperatura adecuada, en este caso el hidróxido de calcio resulta el reactivo más económico y fácil de obtener.

Las pruebas de tratamiento alcalino para aumentar la digestibilidad del bagazo de agave dieron los mejores resultados con hidróxido de calcio al lograr hasta un 54.5 % de digestibilidad. En este proceso los tres factores estudiados son importantes: la concentración de hidróxido, la temperatura y el porcentaje de humedad. Además con la ventaja de que la concentración de

Ca(OH)_2 en el tratamiento proporciona un aporte de calcio que será benéfico para la composición de las raciones de alimento animal.

El tratamiento con hidróxido de calcio dio un aumento en la digestibilidad del bagazo de agave muy cercana a la de la alfalfa (60%), alimento muy utilizado en la alimentación de los animales rumiantes, lo cual nos indica que este residuo agroindustrial tratado con hidróxido de calcio puede ser utilizado en la fabricación de raciones alimenticias para los animales rumiantes.

Agradecimientos. A CONACYT por la beca de doctorado con registro 52333 y No. Orden 57759

Referencias bibliográficas.

- Alonso, M. S. (1993) Valorisation de la bagasse d'agave dans l'industrie de la tequila. Traitement des matières premières végétales. Diplôme des Etudes Approfondies. INPT Toulouse, France.
- Alonso, M. S., Ramírez C. y Rigal L. (1990-2012) Experiencia personal en tratamiento de materias vegetales.
- Dubois, M.F. (1982) Valorisation chimique du fructose : synthèse d'acides levuliniques, arabonique et lactique, Thèse de Doctorat INPT, Toulouse, France.
- E. N. S. A. T. Laboratoire de Productions Animales. (1992) Analyse Fourragère. Document de Travaux Pratiques. Toulouse, France.
- Guignard, J. (2000) Biochimie végétale. Dunod, Paris, France, p. 25-154.
- Monties B. (1982) Les polymères végétaux. Ed. Gautuier-Villars.
- Ozenda P. (2000) Les végétaux. Organisation et diversité biologique. Dunod. Paris, France, p. 315-352.
- Quiabi A. (1994) Valorisation de la rafle de maïs: hydrolyse acide et extraction alcaline des hémicelluloses. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Ramírez C.R. Alonso M.S., Rigal Luc.(2008): Tratamiento biológico con *Phanerochaete Chrysosporium* de los residuos agroindustriales de la industria del tequila, para el aumento de su digestibilidad como complemento del alimento de rumiantes. Revista AIDIS, 1(4).
- Valenzuela Z. A.,G., (1985),: "The tequila industry in Jalisco, México". Desert plants, núm. 7, 2, 65-70.
- Valenzuela Zapata, A.G (2003) El agave tequilero, cultivo e industria de México. Ediciones Mundi-Prensa. México, D.F, México.
- Yokoé, Y., Talkabe, K., Nisikava, S. et Morita Q. (1993), : Effect of gaseous ammonia on chemical and structural features of cell walls in spring barley straw, Anun. Feed Sci. Techol., 40, 202-224.