

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DEL TEQUILA PARA ALIMENTACION DE RUMIANTES

VALORIZATION OF TEQUILA AGROINDUSTRIAL RESIDUES FOR RUMINANTS FEEDING

Clementina R. Ramírez-Cortina^{1*}; María S. Alonso-Gutiérrez²; Luc Rigal²

¹Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. San Pablo 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco. C. P. 02200. México, D. F. México.

Correo-e: crrc@correo.azc.uam.mx (* Autor para correspondencia).

²ENSIACET-INPT. 118 Route de Narbonne, 31077 Toulouse Cedex, France.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue investigar una tecnología adecuada para el uso del bagazo de *Agave tequilana* W. var. azul en raciones alimenticias para rumiantes. Las características físicas y químicas del bagazo fueron evaluadas. De acuerdo con dichas caracterizaciones, éste puede ser utilizado como complemento en la alimentación de rumiantes. Sin embargo, un inconveniente es la baja digestibilidad del bagazo, debido a su alto contenido de lignina; para disminuirlo se usó un tratamiento con hidróxido de calcio. El tratamiento químico se realizó en un reactor de vidrio (50 L) con las siguientes condiciones: concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 2, 5 y 10 %, humedad del bagazo de 20 y 80 %, temperaturas de 30 y 50 °C. Las pruebas de digestibilidad se realizaron en el bagazo tratado químicamente. La digestibilidad aumentó de 36 % (bagazo no tratado) a 54.5 % con el mejor tratamiento (humedad 80 %, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 10 %, y 50 °C). Con base en los resultados de digestibilidad, se puede concluir que el bagazo tratado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puede ser utilizado como suplemento en la composición de las raciones alimenticias de los rumiantes.

Recibido: 15 de agosto de 2011
Aceptado: 18 de abril de 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.08.059
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Bagazo de agave, tratamiento alcalino, hidróxido de calcio, digestibilidad, alimento forrajero.

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate a suitable technology for the use of bagasse of *Agave tequilana* W. var. azul in food ratios for ruminants. Physical and chemical characteristics of bagasse were evaluated. According to these characteristics, bagasse can be used as a supplement in ruminant feeding. However, an inconvenience is the low digestibility of bagasse, due to its high content of lignin, used to decrease this a calcium hydroxide treatment was used. The chemical treatment was conducted in a glass reactor (50 L) with the following conditions: concentration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of 2, 5 and 10 %, bagasse humidity of 20 and 80 %, temperatures of 30 and 50 °C. Digestibility tests were conducted in chemically treated bagasse. The digestibility increased from 36 % (untreated bagasse) to 54.5 % with the best treatment (80 % moisture, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 10 % and 50 °C). It can be concluded that the bagasse treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ can be used as supplement in the composition of ruminants diet based on the digestibility results.

KEYWORDS: agave bagasse, alkaline treatment, calcium hydroxide, digestibility, forage

INTRODUCCIÓN

El tequila es una bebida alcohólica originaria de México, que actualmente es conocida y apreciada a nivel mundial. La materia prima de fabricación es el *Agave tequilana* W. var. azul (Abderrazak, 2000; Alonso & Rigal, 1997; Valenzuela, 2003).

En la fabricación del tequila se obtiene el bagazo de agave, un residuo sólido lignocelulósico, el cual presenta un problema para su disposición final. Debido a ello, es importante la transformación de este residuo para su valorización, por medio de tecnologías adecuadas desde el punto de vista técnico-económico. En general, los re-

INTRODUCTION

Tequila is an alcoholic drink from Mexico, which is now known and appreciated around the world. *Agave tequilana* W. var. azul is the raw material (Abderrazak, 2000; Alonso & Rigal, 1997; Valenzuela, 2003).

In tequila manufacturing, agave bagasse is obtained, a lignocellulosic solid residue, which is a problem for disposal. Therefore, processing this residue for its valorization is important, by means of appropriate technologies from a technical-economic point of view. In general, lignocellulosic agro-industrial residues are made mainly of cellulose, hemicellulose and lignin (Deysson,

siduos lignocelulósicos agroindustriales están compuestos principalmente de celulosa, hemicelulosas y lignina (Deys-son, 1982; Hendriks & Zeeman, 2009; Hopkins, 2003). Cada uno de estos compuestos pueden ser separados por diversos métodos químicos (básicos y ácidos), fisico-químicos, biológicos y físicos, con la finalidad de ser comercializados si el estudio técnico-económico resultara adecuado (Alonso, 1993; Chang, Nagwani, Kim, & Holtzapple, 2001; Hendriks & Zeeman, 2009; Kim & Holtzapple, 2005). La solución al problema de la disposición final del bagazo de agave es encontrar una tecnología apropiada para su tratamiento y valoración indirecta, de tal forma que pueda ser integrado al medioambiente (abonos, composta), dentro de la cadena alimenticia (forrajes, levadura forrajera), o en los procesos industriales de interés económico (pasta de papel, materiales aglomerados). Por tal motivo, es importante buscar, de acuerdo con la estructura y análisis físico-químicos del bagazo, vías de valorización que puedan transformarlo en productos con valor agregado para su comercialización (Alonso & Rigal, 1997).

Los residuos lignocelulósicos, como las pajas de cereales, son utilizados para la alimentación de ruminantes (bovinos, ovinos, equinos), particularmente en sustitución de forrajes cuando su producción ha sido insuficiente (Bureau au Commun de Pailles, 1991). Debido a su bajo valor forrajero, estos residuos tienen que ser complementados con otros ingredientes, como las pulpas de betabel o las melazas de azúcar. Éstas funcionan como fuentes suplementarias de energía, complementos nitrogenados, azufre, y de otros minerales conocidos por su importancia en la actividad celulolítica al interior del rumen (Centre d'Étude et d'Information sur la Pulpe de betterave française [CEDIP], 1994; Hourn & Graconov, 1994). También los desechos de cáscara de girasol han sido usados para la elaboración de raciones alimenticias con la adición de fuentes suplementarias (Bacvanzki, Vucetic, Cobic, & Fabjan, 1975).

De acuerdo con los análisis reportados por Alonso y Rigal (1997), el bagazo de agave tiene un alto contenido de lignina, lo cual hace que su digestibilidad sea baja (Grabber, 2005). Por esta razón, se debe investigar la forma de disminuir la lignina en el bagazo y así aumentar su digestibilidad para que pueda ser aprovechado como fibra en las raciones alimenticias para los animales ruminantes. Los pretratamientos alcalinos, de acuerdo con las condiciones operatorias, además de saponificar las ceras y las cutículas, también realizan una solubilización de las ligninas y de las hemicelulosas, aumentando así, la digestibilidad de los residuos lignocelulósicos (Alonso, 1993; Fernandes, Kleasse, Zeeman, Sanders, & Van Lier, 2009; Kaar & Hotzapple, 2000; Lai, 2001).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar el bagazo de agave, tanto física como químicamente y, en

1982; Hendriks & Zeeman, 2009; Hopkins, 2003). Each compound can be separated by various chemical (basic and acidic), physico-chemical, biological and physical methods, in order to be marketed if the technical-economic study will be appropriate (Alonso, 1993; Chang, Nagwani, Kim, & Holtzapple, 2001; Hendriks & Zeeman, 2009; Kim & Holtzapple, 2005). The solution to the problem of final disposal of agave bagasse is to find an appropriate technology for indirect assessment and treatment, so it can be integrated into the environment (manure, compost), within the food chain (forage, fodder yeast), or in industrial processes of economic interest (paper pulp, agglomerated materials). Therefore, it is important to find, according to the structure and physicochemical analysis of bagasse, ways of valuation that can process into value-added products to be marketed (Alonso & Rigal, 1997).

Lignocellulosic residues such as cereal straw, are used for feeding ruminants (cattle, sheep, horses), particularly in replacement of forages when production is not enough (Bureau au Commun de Pailles, 1991). Due to its low forage value, these residues must be complemented with other ingredients, such as beet pulp or sugar molasses. These serves as supplementary sources of energy, nitrogen supplements, sulfur, and other minerals known to be important in the cellulolytic activity within the rumen (Centre d'Étude et d'Information sur la Pulpe de betterave française [CEDIP], 1994; Hourn & Graconov, 1994). Also sunflower husk waste has been used to prepare food rations with the addition of supplementary sources (Bacvanzki, Vucetic, Cobic, & Fabjan, 1975).

According to analyzes reported by Alonso and Rigal (1997), agave bagasse has high lignin content, which generates low digestibility (Grabber, 2005). For this reason, it is important to research the way of reducing lignin in bagasse and thus increase digestibility so agave bagasse can be exploited as fiber in food rations for ruminant animals. Alkaline pretreatments, according to management conditions, besides of saponifying waxes and cuticles, they also perform solubilization of lignins and hemicellulose, increasing digestibility of lignocellulosic residues (Alonso, 1993; Fernandes, Kleasse, Zeeman, Sanders, & Van Lier, 2009; Kaar & Hotzapple, 2000; Lai, 2001).

The objective of this research was to characterize the agave bagasse, both physically and chemically, accordingly, establish a pretreatment process with calcium hydroxide for possible use to supplement food rations for ruminants. The first stage of this research was to analyze agave bagasse, to know its characteristics and determine its digestibility to be compared to other types of forage. The second part of this work was based on pretreatment

función de ello, establecer un procedimiento de pretratamiento con hidróxido de calcio para su posible utilización como suplemento de las raciones alimenticias de rumiantes. La primera etapa de esta investigación consistió en analizar el bagazo de agave con el fin de conocer sus características y determinar su digestibilidad para compararla con otros tipos de forrajes. La segunda parte de este trabajo se basó en la investigación del pretratamiento con hidróxido de calcio, para disminuir el contenido de lignina y aumentar su digestibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de las características físicas del bagazo de agave

En general, las características físicas fueron determinadas visualmente. El tamaño de la fibra se determinó con tamices de diferente malla (0.5, 10 y 20 cm). Las fibras se pesaron separadamente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) para calcular la densidad. El diámetro de las fibras se midió por microscopía óptica. Las pruebas de absorción de agua del bagazo se realizaron utilizando una probeta con agua.

Análisis químico del bagazo de agave

Los análisis de materia seca, minerales, materia orgánica, constituyentes membranarios (celulosa, hemicelulosa y lignina), grasas y nitrógeno, se realizaron de acuerdo con los métodos de "Análisis Forrajeros" del ENSAT-INPT (1992). La concentración de azúcares reductores se determinó con el método de Fehling en muestras de bagazo húmedo.

Pruebas de digestibilidad con el método "in sacco"

Las pruebas de digestibilidad se realizaron en dos lotes de bagazo provenientes de dos fábricas de tequila, de acuerdo con el método "in sacco" de "Análisis Forrajeros" del ENSAT-INPT (1992).

Tratamiento químico y pruebas de digestibilidad

El tratamiento químico se realizó en un reactor de vidrio (50 L) con doble capa, para lograr el control de la temperatura mediante agua caliente suministrada mediante baño maría. El reactor fue equipado con un sistema de agitación para la mezcla del bagazo durante el tratamiento. La adición de reactivos se efectuó en una entrada en la parte superior izquierda del reactor (Figura 1). Las condiciones experimentales fueron: humedad 20 y 80 %, temperatura 30 y 50 °C, concentración del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 2, 5 y 10 %, y una relación sólido:líquido de 4; los ex-

research with calcium hydroxide, to reduce lignin content and increase digestibility.

MATERIALS AND METHODS

Analysis of the physical characteristics of agave bagasse

In general, physical properties were visually determined. Fiber size was determined using sieves of different mesh (0.5, 10 y 20 cm). Fibers were weighed separately ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) to obtain density. Fiber diameter was measured by optical microscopy. Bagasse water absorption tests were performed using a test tube with water.

Chemical analysis of agave bagasse

Dry matter, minerals, organic matter, membranous constituents (cellulose, hemicellulose, and lignin), fats and nitrogen analyzes were carried out according to the methods of "Forage Analyzes" of ENSAT-INPT (1992). The reduction sugar concentration was determined using the method of Fehling in wet bagasse samples.

Digestibility tests using the "in sacco" method

Digestibility tests were performed in two bagasse lots from two tequila factories, according to the method "in sacco" of "Forage analyzes" of ENSAT-INPT (1992).

Chemical treatment and digestibility tests

The chemical treatment was conducted in a glass reactor (50 L) with double layer, to achieve the control of the temperature by means of hot water supplied by a water bath. The reactor was equipped with a stirring system to mix the bagasse during the treatment. The addition of reagents was performed in one entry of the reactor located in the upper left side (Figure 1). Expe-

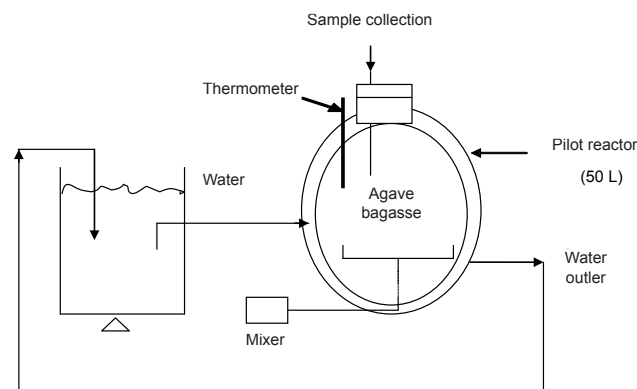


FIGURE 1. Pilot reactor for the chemical treatment application in agave bagasse.

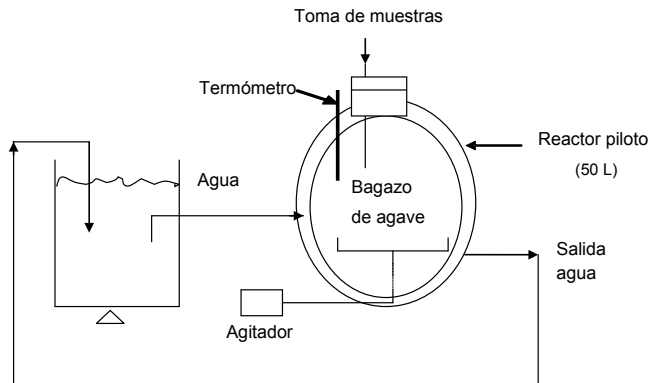


FIGURA 1. Reactor piloto para la aplicación del tratamiento químico en bagazo de agave.

perimentos se realizaron a presión atmosférica. Después de cada tratamiento se hicieron pruebas de digestibilidad (ENSAT-INPT, 1992) del bagazo tratado químicamente. Cada experimento se realizó por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas del bagazo del agave

Los resultados de la caracterización física del bagazo de agave se resumen en el Cuadro 1. Las características de color, textura y tamaño de las fibras, son similares a las reportadas por Alonso (1993) y, Alonso y Rigal (1997). Las características físicas del bagazo dependen de los procesos de cocción y molienda efectuados en la fábrica de tequila de donde provenga el bagazo. Así, tenemos fragmentos de fibras enormes con pulpa quemada, fibras muy finas y fibras de tamaño regular aún cubiertas de pulpa. Las fibras del bagazo, se molieron en un molino de martillos con un tamiz de 0.5 cm, para homogeneizar el tamaño.

CUADRO 1. Características físicas del bagazo de *Agave tequilana* W. var. azul.

Características	Descripción
Textura	Poco rígida
Color	Café-amarillento
Largo de la fibra	0.5 - 10 cm
Diámetro	0.3 - 4 mm
Densidad de la fibra:	
Fibra bruta	0.050 g·cm ⁻³
Fibra malla 10	0.094 g·cm ⁻³
Fibra malla 20	0.153 g·cm ⁻³
Absorción de agua	6 mL de agua·g ⁻¹ de bagazo

Análisis químico del bagazo de agave

Los resultados del análisis químico del bagazo de agave se resumen en el Cuadro 2, el cual presenta el contenido de compuestos lignocelulósicos y otras ca-

riteriales de los resultados de la caracterización de bagasse de agave se resumen en la Tabla 1. Color, textura y tamaño de las fibras son similares a los reportados por Alonso (1993) y Alonso y Rigal (1997). Las características físicas de la bagasse dependen de los procesos de cocción y molienda realizados en la fábrica de tequila donde se obtiene la bagasse. Se utilizaron fragmentos de fibras grandes con pulpa quemada, fibras muy finas y fibras de tamaño regular aún cubiertas de pulpa. Las fibras de la bagasse se molieron en un molino de martillos con un tamiz de 0.5 cm para homogeneizar el tamaño.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical characteristics of agave bagasse

The results of the physical characterization of agave bagasse are summarized in Table 1. Color, texture and size characteristics of fibers are similar to those reported by Alonso (1993) and Alonso and Rigal (1997). Bagasse physical characteristics depend on cooking and milling processes carried out in the tequila factory where bagasse is obtained. Big fiber fragments with burned pulp, very fine fibers and regular sized fibers still covered with pulp were used. Bagasse fibers were ground using a hammer mill with a screen of 0.5 cm to homogenize the size.

TABLE 1. Physical characteristics of *Agave tequilana* W. var. Azul bagasse.

Characteristics	Description
Texture	Loosely
Color	Yellowish brown
Fiber length	0.5 - 10 cm
Diameter	0.3 - 4 mm
Fiber density:	
Crude fiber	0.050 g·cm ⁻³
Fiber mesh 10	0.094 g·cm ⁻³
Fiber mesh 20	0.153 g·cm ⁻³
Water absorption	6 mL of water·g ⁻¹ of bagasse

Chemical analysis of agave bagasse

Results of the bagasse chemical analysis are summarized in Table 2, which shows lignocellulosic compounds content and other characteristics. These analyzes show that the bagasse chemical composition is similar to that reported by Alonso and Rigal (1997). Analysis of the chemical composition of *Agave tequilana* W. var. Azul bagasse (Table 2) makes clear the major proportion of lignocellulosic fibers (77 % dry matter). The proportion of cellulose, hemicellulose and lignin of bagasse is relatively close to other lignocellulosic waste such as cereal straws or sunflower oil waste (Table 3). This result confirms that the agave bagasse has potential to be used as fibrous part of ruminant food portions, which have been fairly researched (Bazus, 1990; Laberche, 1999; Magro, 1995; Monties, 1982). The only inconvenience is that high content of lignin in bagasse decreases digestibility compared

racterísticas. Estos análisis reflejan que la composición química del bagazo es similar al reportado por Alonso y Rigal (1997). El análisis de la composición química del bagazo de *A. tequilana* (Cuadro 2) hace evidente la proporción mayoritaria de las fibras lignocelulósicas (77 % en materia seca). La proporción de celulosa, hemicelulosas y ligninas del bagazo es relativamente cercana a la de otros residuos lignocelulósicos como las pajas de cereales o los desechos de aceite de girasol (Cuadro 3). Este resultado confirma que el bagazo de agave tiene potencial para ser utilizado como parte fibrosa de porciones alimenticias de rumiantes, las cuales han sido bastante investigadas (Bazus, 1990; Laberche, 1999; Magro, 1995; Monties, 1982). El único inconveniente es que el contenido alto de lignina en el bagazo disminuye su digestibilidad en comparación con otros forrajes. No obstante, este problema se resolvió con un pretratamiento químico con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de tal forma que la digestibilidad aumentó de 36 a 54.5 %.

CUADRO 2. Composición química y digestibilidad del bagazo de agave.

Parámetro	Bagazo de agave
Humedad (%)	5
Fibra (% MS)	77
Celulosa (% fibra seca)	56*
Hemicelulosas (% fibra seca)	24.5*
Lignina (% fibra seca)	19.5*
Nitrógeno total (% MS)	3
Grasas (% MS)	1
Minerales (% MS)	6
Pectinas (% MS)	1
Azúcares reductores (% MS)	7
Digestibilidad (% MS)	36

DM: dry matter. *Percentage of the bagasse total fiber (77 %)
MS: Materia Seca. * Porcentaje de la fibra total del bagazo (77 %)

CUADRO 3. Composición de residuos lignocelulósicos similares al del bagazo de agave.

Componente	Paja de trigo (% MS)	Desechos de aceite de girasol (% MS)
Materia mineral	5.5	2.0
Grasa	0.6	3.5
Nitrógeno	2.6	3.5
Azúcares libres	1.1	-
Celulosa	43	41
Hemicelulosas	28.7	20
Ligninas	12.7	25

Source: Bazus, 1991; Laberche, 1999; Magro, 1995; Monties, 1982. DM: Dry Matter.

Determinación de la digestibilidad del bagazo de *A. tequilana*

Las pruebas de digestibilidad fueron realizadas en dos lotes de bagazo provenientes de dos fábricas de te-

to other forages. However, this problem was solved with a chemical pretreatment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, so that digestibility increased from 36 to 54.5 %.

TABLE 2. Chemical composition and digestibility of agave bagasse.

Parameter	Agave bagasse
Moisture (%)	5
Fiber (% MS)	77
Cellulose (% fibra seca)	56*
Hemicelluloses (% fibra seca)	24.5*
Lignin (% fibra seca)	19.5*
Total nitrogen (% MS)	3
Fat (% MS)	1
Minerals (% MS)	6
Pectins (% MS)	1
Reducing sugars (% MS)	7
Digestibility (% MS)	36

TABLE 3. Composition of lignocellulosic residues similar to agave bagasse.

Component	Wheat straw (% DM)	Sunflower oil waste (% DM)
Mineral matter	5.5	2.0
Fat	0.6	3.5
Nitrogen	2.6	3.5
Free sugars	1.1	-
Cellulose	43	41
Hemicelluloses	28.7	20
Lignins	12.7	25

Fuente: Bazus, 1991; Laberche, 1999; Magro, 1995; Monties, 1982. MS: Materia Seca.

Digestibility determination of *A. tequilana* bagasse

Digestibility tests were conducted in two bagasse lots from two tequila factories. Scattering measurements of the results (Table 4) show that the digestibility method used is reliable.

Digestibility value of agave bagasse is located between the values obtained for sunflower husks and straws (Table 5). This is consistent with the proportion cellulose-hemicellulose-lignin in fibers of these three substrates. Table 5 can also show that the content of lignin in bagasse is in an intermediate value reported for straw and sunflower waste. However, this classification regarding lignin content must be weighted because the agave bagasse contains a relatively high proportion of free sugars (5 to 10 %) that contribute heavily to the increase of digestibility. Therefore, it is reasonable to deduce that bagasse without sugars will have a decreased digestibility rate. Thus, the presence of a high proportion of free sugars in fresh bagasse (22 % dry matter) is a benefit for direct use in ruminant food portions.

quila. Las medidas de dispersión de los resultados (Cuadro 4) muestran que el método de digestibilidad utilizado es confiable.

El valor de digestibilidad del bagazo de agave se sitúa entre los valores reportados para las cáscaras de girasol y las pajas (Cuadro 5). Esto es coherente con la proporción celulosa-hemicelulosa-lignina en las fibras de estos tres sustratos. En el Cuadro 5 también se puede observar que el contenido de lignina en el bagazo se encuentra en un valor intermedio del reportado para las pajas y desechos del girasol. Sin embargo, esta clasificación en función del contenido de lignina, debe ser ponderada debido a que el bagazo de agave contiene una proporción relativamente elevada de azúcares libres (entre 5 y 10 %) que contribuyen fuertemente al aumento de la digestibilidad. Por tanto, es razonable deducir que el bagazo agotado en azúcares tendrá una tasa de digestibilidad netamente disminuida. En consecuencia, la presencia de una fuerte proporción de azúcares libres en el bagazo fresco (22 % de la materia seca) constituye un beneficio para su utilización directa en las porciones alimenticias del rumiante.

CUADRO 4. Digestibilidad del bagazo de *Agave tequilana* W. var. azul por el método de "in sacco" en el rumen de la vaca.

Pruebas	Digestibilidad 24 horas (MS %)	Digestibilidad 48 horas (MS %)
Bolsa 1	29	
Bolsa 2	27	
Bolsa 3	30	
Bolsa 4	26	
Bolsa 5		37
Bolsa 6		35
Bolsa 7		38
Bolsa 8		34
Valor promedio	28	36
Desviación estandar	1.8	1.7
Coefficiente de variación (%)	6	4.7

MS: Materia Seca

CUADRO 5. Comparación de la distribución de celulosa, hemicelulosa y lignina en las fibras y digestibilidades, en residuos lignocelulósicos.

Parámetro	¹ Desecho de girasol	Bagazo de agave	² Paja de trigo
Fibra (% MS)	86	77	84.5
Celulosa (% fibra seca)	47	56	51
Hemicelulosa (% fibra seca)	23	24.5	34
Lignina (% fibra seca)	29	19.5	15
Digestibilidad (% MS)	26	36	39

MS: Materia seca. Fuente: ¹Bazus (1991); ²Magro (1995).

TABLE 4. Digestibility of *A. tequilana* W. var. azul bagasse by the method of "in sacco" in the rumen of the cow.

Tests	24 hours diges-tibility (DM %)	48 hours diges-tibility (DM %)
Bag 1	29	
Bag 2	27	
Bag 3	30	
Bag 4	26	
Bag 5		37
Bag 6		35
Bag 7		38
Bag 8		34
Average value	28	36
Standard deviation	1.8	1.7
Coefficient of variation (%)	6	4.7

DM: Dry Matter.

TABLE 5. Distribution comparison of cellulose, hemicellulose and lignin in fibers and digestibilities, in lignocellulosic residues.

Parameter	¹ Sunflower waste	Agave bagasse	² Wheat straw
Fiber (% DM)	86	77	84.5
Cellulose (% dry fiber)	47	56	51
Hemicellulose (% dry fiber)	23	24.5	34
Lignin (% dry fiber)	29	19.5	15
Digestibility (% DM)	26	36	39

DM: Dry Matter. Fuente: ¹Bazus (1991); ²Magro (1995).

Alkaline chemical treatment and digestibility tests

Alkaline treatment of agave bagasse was carried out with Ca(OH)₂ (Alonso, 1993; Mosier et al., 2005). Experimental conditions and digestibility of bagasse after each treatment are shown in Table 6.

TABLE 6. Experimental conditions of the chemical treatment of agave bagasse and results of its digestibility.

Moisture (%)	Ca(OH) ₂ concentration	Temperature (°C)	Digestibility (% Dry matter)
80	2	50	46.0
80	5	50	47.6
80	10	50	54.5
80	2	30	41.0
80	5	30	43.2
80	10	30	51.8
20	2	50	40.0
20	5	50	41.6
20	10	50	49.7
20	2	30	38.0
20	5	30	40.5
20	10	30	47.1

Tratamiento químico alcalino y pruebas de digestibilidad

El tratamiento alcalino del bagazo de agave se realizó con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Alonso, 1993; Mosier et al., 2005). Las condiciones experimentales y las digestibilidades del bagazo después de cada tratamiento se muestran en el Cuadro 6.

CUADRO 6. Condiciones experimentales del tratamiento químico del bagazo de agave y resultados de sus digestibilidades.

Humedad (%)	Concentración $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	Temperatura (°C)	Digestibilidad (% Materia seca)
80	2	50	46.0
80	5	50	47.6
80	10	50	54.5
80	2	30	41.0
80	5	30	43.2
80	10	30	51.8
20	2	50	40.0
20	5	50	41.6
20	10	50	49.7
20	2	30	38.0
20	5	30	40.5
20	10	30	47.1

La digestibilidad aumentó cuando en las pruebas se incrementó la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la humedad y la temperatura, sin efectos de interacción negativa (Figura 2). La ganancia de la digestibilidad fue mayor en comparación con la del bagazo sin tratamiento (36 %). La digestibilidad aumentó a 54.5 % con el mejor tratamiento (humedad 80 %, temperatura 50 °C, hidróxido de calcio 10 %) después de 24 h de su aplicación, es decir, una ganancia de 18 % en relación con el bagazo no tratado. Este resultado se atribuye a que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es una base fuerte, apta para donar iones OH^- para la solvatación de las uniones de hidrógeno y la hidrólisis de las uniones ésteres que asocian a los constituyentes fibrosos. La relación sólido:líquido y la temperatura elevada del proceso son todavía más importantes que la relación $\text{Ca}(\text{OH})_2$:sustrato, ya que aumentan la solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el agua. Además el ion Ca^{++} protege la degradación de los azúcares con los OH^- formando complejos con éstos. Así, la degradación de los azúcares en álcalis polihidroxilados es más lenta con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que con hidróxido de sodio (Alonso, 1993; Dubois, 1982). En resumen, un mejoramiento de la digestibilidad del bagazo de agave seco (5 % de humedad original) puede lograrse con un tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a una concentración de 10 % a 50 °C, con 80 % de humedad y un tiempo de contacto de 24 h. La digestibilidad del bagazo de agave después del tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (54.5 %), llega a tener valores equivalentes a los

Digestibility increased when $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration was increased in tests, moisture and temperature did not have negative interaction effects (Figure 2). Digestibility gain was higher compared to the untreated bagasse (36 %). Digestibility increased to 54.5 % with the best treatment (humidity 80 %, temperature 50 °C, calcium hydroxide 10 %) after 24 h of addition, with a gain of 18 % in relation to untreated bagasse. This result is attributed to $\text{Ca}(\text{OH})_2$ that is a strong base, suitable to give OH^- ions for solvation of hydrogen bonds and hydrolysis of ester bonds that associate the fibrous constituents. The ratio solid:liquid and the elevated temperature of the process are even more important than the ratio $\text{Ca}(\text{OH})_2$:substrate, because they increase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solubility in water. Moreover, Ca^{++} ion protects degradation of sugars with the OH^- forming complex compounds such as these. Thus, sugar degradation in polyhydroxylated alkali is slower with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ than with sodium hydroxide (Alonso, 1993; Dubois, 1982).

In summary, an improved digestibility of dry agave bagasse (5 % original moisture) can be achieved by a treatment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at a concentration of 10 % at 50 °C with 80 % moisture and contact time of 24 h. Agave bagasse digestibility after treatment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (54.5 %), reached values equivalent to byproducts of maize (stalks, leaves and cobs) (45 %), and lower values to alfalfa (65 %) or soybean meal (84 %).

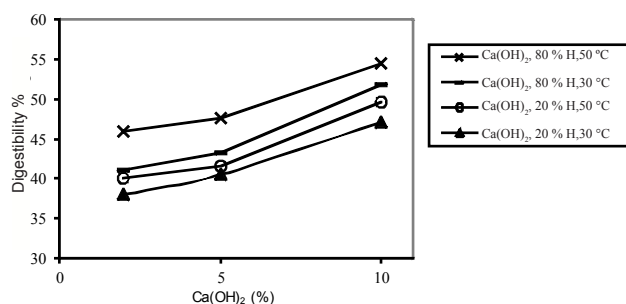


FIGURE 2. Agave bagasse digestibility treated with calcium hydroxide

CONCLUSIONS

Agave bagasse is a residue that can be valued as fibrous supplement in ruminant feeding. Although the digestibility of this residue is low, it can be improved with a treatment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Agave bagasse digestibility increased from 36 to 54.5 % with the treatment of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at 10 %, 50 °C, 80 % moisture and time reaction of 24 h. The treatment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ directly in fresh bagasse (62 % moisture) would prevent the drying stage, responsible for the disappearance of a significant amount of free sugars. Furthermore, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ concentration in treatment provides an important contribution of calcium, which is beneficial for the composition of animal feeding.

subproductos del maíz (tallos, hojas y olotes) (45 %), y valores inferiores a la alfalfa (65 %) o de la torta de soya (84 %).

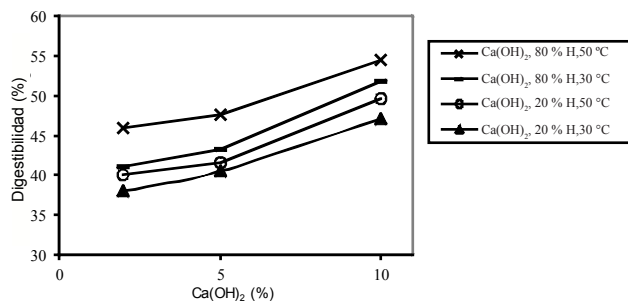


FIGURA 2. Digestibilidad del bagazo de agave tratado con hidróxido de calcio

CONCLUSIONES

El bagazo de agave es un residuo que puede ser valorizado como complemento fibroso en las porciones alimenticias de los rumiantes. Aun cuando la digestibilidad de este residuo es baja, puede mejorarse con un tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La digestibilidad del bagazo de agave aumentó de 36 a 54.5 % con el tratamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 10 %, 50 °C, 80 % de humedad y un tiempo de reacción de 24 h. El tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ directamente en el bagazo fresco (62 % de humedad) evitaría la etapa de secado, responsable de la desaparición de una importante cantidad de azúcares libres. Además, la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el tratamiento da un aporte de calcio bastante importante, lo que es benéfico para la composición de las raciones de alimento animal.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca de estudios de doctorado con registro 52333 y número de orden 57759.

REFERENCIAS

- Abderrazak, M. (2000). *Dictionnaire de botanique des Phanérogames* (2^{ème} ed.). París, France: DUNOD.
- Alonso, G. M. S. (1993). *Reporte de investigación bibliográfica del Diplomado d'Etudes à Profundité (DEA), Valorisation de la bagasse d'agave dans l'industrie de la tequila*. Francia: ENSCT-INPT.
- Alonso, G. M. S., & Rigal, L. (1997). Caracterización y valorización del bagazo de *Agave tequilana* Weber de la industria del tequila. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 3(2), 31–39. Obtenido de http://www.chapingo.mx/revistas/horticultura/contenido.php?id_articulo=786
- Bacvanzki, S., Vucetic, S., Cobic, T., & Fabjan, M. (1975). Sunflower seed hulls as a source of fibre in complete rations for feeding calves. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 9 (1), 5–14.
- Bazus, A. (1990). *Raffinage des agrosources: Extraction et caractérisation des glucuroxylanes des coques de tournesol*, Thèse de Doctorat INPToulouse, Francia.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank CONACYT for the scholarship to pursue doctoral studies, register number 523333 and order number 57759.

End of English Version

Bureau au Commun de Pailles. (1991). *La filière paille: Son organisation et le développement des marchés*. Francia.

Centre d'Étude et d'Information sur la Pulpe de betterave française (CEDIP). (1994) Dijon, France.

Chang, V. S., Nagwani, M., Kim, M., & Holtzapple, C. H. (2001). Oxidative lime pretreatment of high-lignin biomasse. *Applied Biochemistry and Biotechnology* (94), 1–28. doi : 10.1385/ABAB:94:1:01

Deysson, G. (1982). *Physiologie et Biologie des plantes vasculaires. Tome III. Première partie. Nutrition et métabolisme* (5^{ème} ed). France: Société d'Édition d'Enseignement Supérieur.

Dubois, M. F. (1982). *Valorisation chimique du fructose : Synthèse d'acides levuliniques, arabonique et lactique*, Thèse de Doctorat INPToulouse, France.

ENSAT-INPT (1992). *Laboratoire de Productions Animales. Analyse Fourragère*. Document de Travaux Pratiques. Toulouse, France: Autor.

Fernandes T. V., Klaasse, B. B. J., Zeeman, G., Sanders J. P. M., & Van Lier, J. B. (2009). Effects of thermo-chemical pretreatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of linocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, (100), 2575–2579. doi : 10.1016/j.biortech.2008.12.012

Graber, J. H. (2005). How do lignine composition, structure, and cross-linking, affect degradability? A review of cell wall model studies. *Crop Science*, 45, 820–831. doi: 10.2135/cropsci2004.0191

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretraetement to enhance the digestibility of lignocellulosic biomasse. *Bioresource technology*, 100, 10–18. doi : 10.1016/j.biortech.2008.05.027

Hopkins, W. G. (2003). *Physiologie Végétale*. España : De Boeck & Laicier

Hourna, N., & Garconov, R. (1994). *La pulpe sèche de betterave: l'énergie cellulosique*. Dijon, France: CEDIP (Centre d'Étude et d'Information sur la Pulpe de betterave française)

Kaar, W. E., & Holtzapple, M. T. (2000). Using lime pretreatment to facilitate the enzyme hydrolysis of corn stover. *Biomass and Bioenergy*, 1–11. doi: 10.1016/S0961-9534(99)00091-4

Kim, S., & Holtzapple, M. T. (2005). Lime pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. *Bioresource Technology*, (96), 194–2006. doi: 10.1016/j.biortech.2005.01.014

Laberche, J. C. (1999). *Biologie végétale* (3^{ème} ed.). Paris, France: DUNOD.

Lai, Y. Z. (2001). Chemical degradation. In D. N Hon, & N. Shiraiishi (Eds.), *Wood and Cellulose Chemistry* (pp. 443–512). New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.

Magro, C. (1995). *Valorisation des pailles de blé par fractionnement thermo mecanico chimique dans a réactor bi vis*, Thèse de Doctorat INP Toulouse, France.

Monties, B. (1982). *Les polymères végétaux* (2^e ème ed.). Paris, France: Gautuier-Villars.

Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R. Y. Y., Holtzapple, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pre-

treatment of lignocellulosic biomasse. *Bioresource Technology*, 24, 673–686. doi : 10.1016/j.biortech.2004.06.025

Valenzuela, A. G. (2003). *El agave tequilero, cultivo e industria de México* (1a ed.). México: Ediciones Mundi-Prensa.