

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y  
TECNOLOGÍA AVANZADA, UNIDAD ALTAMIRA.**

**“DESARROLLO TÉCNICO-ECONÓMICAMENTE VIABLE  
DE HARINAS FORRAJERAS PREDIGERIDAS Y  
ENRIQUECIDAS PROTEICAMENTE A PARTIR DEL  
BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

Presenta:

**LCA. DIANA ISIS LLANES GIL LÓPEZ**

Directores de Tesis:

**DR. JORGE AURELIO LOIS CORREA**

**DR. FABIO FELIPE CHALÉ LARA**



**ALTAMIRA, TAMPS.**

**ENERO DEL 2012**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 09 de marzo del 2011

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Altamira en su sesión ORD. RCP No. 06/11 celebrada el día 27 del mes de ABR/11 conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

Llanes Gil  
Apellido paterno

López  
Apellido materno

Diana Isis

Nombre (s)

Con registro: 

A	1	0	0	0	3	7
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

“Desarrollo técnico-económicamente viable de harinas forrajeras predigeridas y enriquecidas proteicamente a partir del bagazo de la caña de azúcar.”

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

Caracterización del bagazo a emplear (MEB, Microscopia Confocal, y análisis bromatológico)

Formulación de un alimento para ganado bovino en engorda, para época de sequía

Suplementación proteica del alimento con insumos no convencionales.

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:


Jorge Aurelio Lois Correa, Fabio Felipe Chalé Lara

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en: CICATA –IPN Unidad Altamira.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

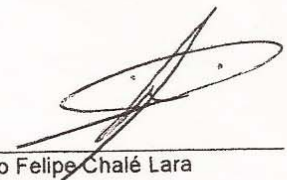
Directores de Tesis

  
Dr. Jorge Aurelio Lois Correa

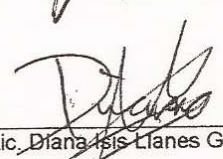
Aspirante




CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA  
APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA  
DEL I.P.N.  
UNIDAD ALTAMIRA

  
Dr. Fabio Felipe Chalé Lara

Presidente del Colegio

  
Lic. Diana Isis Llanes Gil López.

  
Dr. Abelardo Trino Flores Vela.





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Altamira, Tamps., siendo las 12:00 horas del día 17 del mes de enero del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN, Altamira para examinar la tesis titulada:

**“DESARROLLO TÉCNICO-ECONÓMICAMENTE VIABLE DE HARINAS FORRAJERAS PREDIGERIDAS Y ENRIQUECIDAS PROTEICAMENTE A PARTIR DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR”**

Presentada por el alumno:

**Llanes Gil**  
Apellido paterno

**López**  
Apellido materno

**Diana Isis**  
Nombre(s)

Con registro:

A	1	0	0	0	3	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**Maestro en Tecnología Avanzada**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Jorge Aurelio Lois Gorrea

Dr. Fabio Felipe Chalé Lara

Dra. Aidé Minerva Torres Huerta

Dra. Elvia Margarita Romero Treviño

Dr. Eugenio Rodríguez González

Dr. Abelardo Irineo Flores Vela

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Abelardo Irineo Flores Vela



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA  
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA  
DEL IPN  
UNIDAD ALTAMIRA



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Altamira, Tamaulipas el día 17 del mes de enero del año 2012, el (la) que suscribe Diana Isis Llanes Gil López alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A100037, adscrito al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN, Unidad Altamira, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Doctores Jorge Aurelio Lois Correa y Fabio Felipe Chalé Lara y cede los derechos del trabajo titulado “Desarrollo técnico-económicamente viable de harinas forrajeras predigeridas y enriquecidas proteicamente a partir del bagazo de la caña de azúcar”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección diana.llanes@ymail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

LCA. Diana Isis Llanes Gil López.

Nombre y firma

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis, primeramente a Dios por darme la oportunidad de escalar un peldaño más en mi formación académica, a mi madre Dra. Susana López Rodríguez, por inculcarme el hábito del estudio.

Un agradecimiento muy especial a Jean Mare por su apoyo incondicional en esta etapa tan importante de mi vida.

A mis compañeros de Maestría y doctorado por toda su ayuda brindada. En especial, a Paola Ortega, Diana Palma, Abigail Alanís, Josué Berman, Jazmín Rojas y Jesús Guzmán (Chucho), por su apoyo y consejos.

Y en especial, a todos mis profesores de la vida, por que no solo es maestro el que enseña en un aula, lo es todo aquel del que aprendemos.



## **AGRADECIMIENTOS**

A CONACYT por el apoyo brindado a mí y a tantos estudiantes para terminar con éxito su preparación académica a través del Instituto Politécnico Nacional al cual estaré eternamente agradecida.

A PIFI por el apoyo económico asociado al proyecto SIP-20113431.

Al CICATA por haber confiado en mis capacidades para con el proyecto.

A mis asesores de Maestría, Dr. Jorge A. Lois Correa y Dr. Fabio F. Chalé Lara, ya que sin su ayuda el desarrollo de esta tesis no habría sido posible.

Un agradecimiento especial a mi comité tutorial a la Dra. Aidé Minerva Torres Huerta, Dra. Elvia Margarita Romero Treviño, Dr. Abelardo I. Flores Vela y Dr. Eugenio Rodríguez, por su apoyo incondicional, el tiempo dedicado a la revisión de mi tesis y sus sabios consejos.

A todos y cada uno de mis maestros, por sus magníficas cátedras y consejos.

Al personal de posgrado de CICATA Altamira, a la Lic. Adela E. Rodríguez Salazar, Sra. Teresa Balderas Maldonado, Srta. Ludivina Reyes Alejandre, Sra. Kathia Ontiveros Sánchez por su incondicional y oportuno apoyo en todos los trámites. Al personal de Biblioteca en especial al L.A. Rodolfo Estrada.

A IQ. Ana Cecilia Espíndola Flores y al Ing. Sebastián Pacheco Buendía y al Ing. Marco Medina por su apoyo en la realización de análisis dentro del plantel.

Quiero expresar un especial agradecimiento a las escuelas que me prestaron su ayuda incondicional en el presente proyecto, a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, ENCB del IPN, Campus Casco Santo Tomás, en especial a la Dra. María Elena Sánchez Pardo del Depto. de Alimentos, por facilitarme realizar los estudios bromatológicos pertinentes y brindarme su apoyo y asesoría. Al Centro de Nanociencias en Micro y Nanotecnología del IPN.

A la Universidad del Noreste, y al UNE Lab. Al Instituto Tecnológico de Altamira, de donde con gusto recordaré todas las enseñanzas obtenidas de los Catedráticos, Dra. Elvia Margarita Romero Treviño y del M.C. José Luis Horak Loya. A la Universidad Tecnológica de Altamira UTA. Y a la Universidad Autónoma de Chapingo por la colaboración en la realización de las pruebas de digestibilidad *in vitro* en especial al Dr. Eliseo Sosa Montes.

## CONTENIDO

	Pá
	g
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE TABLAS	v
SIMBOLOGIA Y ACRONIMOS	vi
GLOSARIO	vii
RESUMEN/ ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
1. ANTECEDENTES	1
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR	3
1.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA CAÑA DE AZÚCAR	5
1.2.1 Distribución mundial de la caña de azúcar.	5
1.2.1.1 Superficie Cultivada.	6
1.3 SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA AZUCARERA MEXICANA	6
1.4 IMPORTANCIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR COMO CULTIVO	7
1.4.1 Características relevantes de la gramínea <i>Saccharum officinarum</i> .	8
1.4.2 Perfil bio-fisiológico de la caña de azúcar.	8
1.4.3 La caña de azúcar y su sistema de fotosíntesis.	10
1.4.4 Ciclo del C4	11
2. SUB-PRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR	12
2.1 BAGAZO COMO MATERIA PRIMA	13
2.1.1 Composición física del bagazo.	14
2.1.2 Humedad.	15
2.1.3 Caracterización morfológica.	15
2.1.4 Composición Química del Bagazo.	17
2.1.5 Importancia de la fibra en los rumiantes.	19
2.1.5.1 Relación lignina-carbohidratos.	23
2.1.6 Co-productos del bagazo de la caña de azúcar.	24
2.1.6.1 Bagacillo o médula.	25
2.2 BAGAZO PARA LA ALIMENTACION ANIMAL	26

<b>2.3 FISIOLÓGÍA DIGESTIVA DEL GANADO VACUNO.</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Nutrición Animal.</b>	<b>31</b>
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	<b>34</b>
<b>3.1 CRIBADO DEL BAGAZO</b>	<b>34</b>
<b>3.2 PRE-TRATAMIENTO ALCALINO</b>	<b>35</b>
<b>3.3 ENRIQUECIMIENTO PROTEICO</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1 Experiencias con formulaciones.</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1.1 Formulación Experimental <u>BP1</u>.</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1.2 Formulación experimental <u>BP 2</u>.</b>	<b>39</b>
<b>3.3.2 Formulación del alimento final.</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3 Descripción de <i>Software Confor</i>.</b>	<b>43</b>
<b>3.4 DESCRIPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS.</b>	<b>44</b>
<b>3.4.1 Maralfalfa ( <i>Pennisetum sp.</i>).</b>	<b>44</b>
<b>3.4.2 Melaza.</b>	<b>47</b>
<b>3.4.3 Urea.</b>	<b>47</b>
<b>3.4.4 Subproducto de enzima transglutaminasa microbiana (MTGasa).</b>	<b>49</b>
<b>3.5. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL BAGAZO</b>	<b>50</b>
<b>3.5.1 Caracterización Morfológica.</b>	<b>50</b>
<b>3.5.1.1 Microscopía Confocal de Barrido Láser (MCBL).</b>	<b>50</b>
<b>3.5.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).</b>	<b>51</b>
<b>3.5.1.3 Espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS)</b>	<b>52</b>
<b>3.5.2 Análisis estructural.</b>	<b>53</b>
<b>3.5.2.1 Difracción de Rayos X.</b>	<b>53</b>
<b>3.5.3 Análisis Químico.</b>	<b>54</b>
<b>3.5.3.1 Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR).</b>	<b>54</b>
<b>3.5.3.2 Análisis de digestibilidad.</b>	<b>55</b>
<b>3.5.3.2.1 Digestibilidad <i>in vitro</i>.</b>	<b>55</b>
<b>3.5.4 Determinación de minerales por técnicas de espectroscopia y fotocolorimetría.</b>	<b>62</b>
<b>3.5.5 Análisis bromatológico.</b>	<b>64</b>
<b>3.5.5.1 Determinación de proteína cruda.</b>	<b>64</b>
<b>3.5.5.2 Determinación de humedad.</b>	<b>65</b>
<b>3.5.5.3 Determinación de cenizas.</b>	<b>65</b>



<b>3.5.5.4 Determinación de Extracto Etéreo (grasas).</b>	<b>66</b>
<b>3.5.5.5 Determinación de fibra cruda.</b>	<b>67</b>
<b>3.6 MODELACION DE GANANCIA EN PESO DIARIA</b>	<b>69</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>72</b>
<b>4.1 EXPERIMENTOS IN VITRO POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE BARRIDO LASER MCBL (MCBL)</b>	<b>72</b>
<b>4.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)</b>	<b>74</b>
<b>4.3 ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS</b>	<b>77</b>
<b>4.4 RESULTADOS DE ESTUDIO ESTRUCTURAL CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)</b>	<b>79</b>
<b>4.5 ANÁLISIS QUÍMICO POR FTIR</b>	<b>80</b>
<b>4.6. RESULTADOS DE DIGESTIBILIDAD <i>IN VITRO</i></b>	<b>81</b>
<b>4.7 RESULTADOS DE CONTENIDO DE MINERALES</b>	<b>83</b>
<b>4.8 RESULTADOS DE ANÁLISIS BROMATOLÓGICO</b>	<b>84</b>
<b>4.9 RESULTADOS MODELACION DE GANANCIA EN PESO DIARIA</b>	<b>86</b>
<b>5.0 DESARROLLO TECNOLOGICO</b>	<b>87</b>
<b>5.1.1 Descripción del proceso.</b>	<b>86</b>
<b>5.1.2 Aspectos económicos preliminares.</b>	<b>87</b>
<b>5.1.2.1 Costo de inversión.</b>	<b>88</b>
<b>5.1.2.2 Costo de producción.</b>	<b>90</b>
<b>5.1.2.3 Período de recuperación.</b>	<b>92</b>
<b>6. CONCLUSIONES.</b>	<b>93</b>
<b>7. TRABAJO FUTURO.</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Principales países productores de caña de azúcar.	xvii
Figura 2. Vista de la planta caña de azúcar.	4
Figura 3. Distribución geográfica de la caña de azúcar en México.	6
Figura 4. Distribución geográfica mundial de la caña de azúcar.	6
Figura 1. Distribución de la producción de caña de azúcar en México.	8
Figura 2. Secciones transversales de hojas mostrando diferencias anatómicas entre plantas C3 y C4.	11
Figura 3. Diagrama del ciclo de C4.	12
Figura 4. Ciclo del Carbono C-4 Hatch-slack.	12
Figura 5. Sub-productos de la Caña de Azúcar.	13
Figura 6. Forma típica de almacenamiento de bagazo pre-secado en pacas para la industria de co-productos.	14
Figura 7. Composición física del bagazo.	15
Figura 8. Imagen de la composición del bagazo integral. Aumento 10 X.	16
Figura 9. Estructura típica de un haz de fibras.	20
Figura 10. Estructura química de la celulosa.	20
Figura 11. Estructura de la hemicelulosa.	21
Figura 12. Estructura de la biomasa ligno-celulósica	22
Figura 13. Estructura de la lignina.	23
Figura 14. Algunos co-productos a partir del bagazo de la caña de azúcar.	25
Figura 15. Estructura digestiva de la res.	31
Figura 20. Fases de la metodología experimental utilizada.	34
Figura 21. Representación esquemática del pre-tratamiento alcalino.	36

Figura 22. Aplicación por aspersión del Hidróxido de sodio.	36
Figura 23. Diagrama secuencial del pre-tratamiento alcalino.	37
Figura 24. Secado natural del bagazo.	38
Figura 25. Muestra experimental exploratoria <u>BP 1</u> .	39
Figura 26. Lote de Maralfalfa ubicado en el Instituto Tecnológico de Altamira	44
Figura 27. Ejemplo de embutidos donde se utiliza la Enzima MTGasa.	49
Figura 28. Fundamento de la técnica MCBL.	50
Figura 29. Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido.	52
Figura 30. Ejemplo de espectro característico de EDS.	53
Figura 31. Explicación de Ley de <i>Bragg</i> .	54
Figura 32. Formas de determinación de la digestibilidad de la materia seca	55
Figura 33. Transvasado de muestra a vaso Bercellius.	60
Figura 34. Calentamiento (fase 2).	60
Figura 35. Equipo de filtrado a vacío.	61
Figura 36. Muestras previamente pesadas para realización de análisis de minerales.	63
Figura 37. Digestión de muestras con mezcla di-ácida.	63
Figura 38. Digestión de muestras en equipo <i>Kjeldahl</i> .	65
Figura 39. Muestras incineradas, las diferencias en la coloración se deben a presencia de minerales.	65
Figura 40. Determinación de Extracto etéreo.	67
Figura 41. Reducción de tamaño de la muestra (Instituto Tecnológico de Altamira).	67
Figura 42. Equipo de digestión de Fibra Cruda.	69
Figura 43. Rutina de ganancia en peso generada en <i>software Excel</i> .	72

<b>Figura 44. Microfotografías por MCBL a) Bagazo Integral; b) Bagazo tratado alcalinamente.</b>	<b>73</b>
<b>Figura 45. Experimento <i>in vitro</i> por MCBL simulación de tratamiento alcalino.</b>	<b>73</b>
<b>Figura 46. Micrografías de Bagazo Integral tomadas por MEB. a) Tejido parénquimatoso (médula);b) Haz de fibra; c) Tejido esponjoso 100X;d) Acercamiento a fracción de médula 2500 X.</b>	<b>76</b>
<b>Figura 47. Micrografías de MEB de la formulación exploratoria BP3</b>	<b>75</b>
<b>Figura 48. Micrografías de la formulación final <u>BPS</u> por MEB</b>	<b>76</b>
<b>Figura 49. Espectro de EDS (análisis químico) general de formulación final pre-digerida y suplementada.</b>	<b>77</b>
<b>Figura 50. Análisis particular por EDS a cúmulos oscuros en formulación BPS.</b>	<b>78</b>
<b>Figura 51. Análisis químico particular por EDS a canal de adherencias.</b>	<b>78</b>
<b>Figura 52. Difractograma de bagazo sin tratamiento y con tratamiento alcalino.</b>	<b>79</b>
<b>Figura 53. Espectros IR de bagazo sin tratamiento y bagazo pre-digerido.</b>	<b>80</b>
<b>Figura 54. Protozoarios típicos del líquido ruminal (aumento 100x).</b>	<b>82</b>
<b>Figura 55. Graficas de Peso esperado vs días de engorda.</b>	<b>87</b>
<b>Figura 56. Diagrama de bloques de proceso tecnológico.</b>	<b>89</b>



## LISTA DE CUADROS

	Pag.
<b>Cuadro 1. Superficie mundial cultivada de caña de azúcar</b>	<b>7</b>
<b>Cuadro 2. Composición morfológica del bagazo.</b>	<b>17</b>
<b>Cuadro 3. Composición del bagazo a la salida del tándem.</b>	<b>17</b>
<b>Cuadro 4. Porción de fracción química en diferentes componentes del bagazo.</b>	<b>18</b>
<b>Cuadro 5. Principales vitaminas y minerales para ganado bovino.</b>	<b>35</b>
<b>Cuadro 6. Insumos utilizados en la formulación experimental <u>BP 1</u></b>	<b>38</b>
<b>Cuadro 7. Costos comparativos preliminares de la muestra experimental Exploratoria <u>BP 1</u>.</b>	<b>39</b>
<b>Cuadro 8. Insumos utilizados en la suplementación.</b>	<b>40</b>
<b>Cuadro 9. Comparación proteica de alimentos exploratorios formulados <i>versus</i> alimentos existentes en el mercado.</b>	<b>41</b>
<b>Cuadro 10. Insumos para elaboración de la formulación final.</b>	<b>42</b>
<b>Cuadro 11. Pantalla de <i>software Confor</i>.</b>	<b>43</b>
<b>Cuadro 12. Secuencia de cortes realizados al macollo del lote de Maralfalfa muestreado.</b>	<b>45</b>
<b>Cuadro 13. Resultados de porcentaje de Proteína Cruda para cada corte. (UNE Lab).</b>	<b>46</b>
<b>Cuadro 14. Cuadro bromatológico de Maralfalfa proveniente del campo experimental del Instituto Tecnológico de Altamira ITA.</b>	<b>46</b>
<b>Cuadro 15. Resultados bromatológicos del subproducto de MTGasa.</b>	<b>49</b>
<b>Cuadro 16. Resultados de análisis de minerales de Bagazo pre-digerido, Formulación BPS y melaza.</b>	<b>79</b>
<b>Cuadro 17. Resultados de DIVMS para los tres puntos de muestreo.</b>	<b>83</b>

<b>Cuadro 18. Resultados de análisis de minerales de Bagazo pre-digerido, Formulación BPS y melaza.</b>	<b>84</b>
<b>Cuadro 19. Resultados bromatológicos.</b>	<b>85</b>
<b>Cuadro 20. Resultados de proteína en las muestras exploratorias.</b>	<b>86</b>
<b>Cuadro 21. Costos preliminares de inversión.</b>	<b>90</b>
<b>Cuadro 22. Costos de producción.</b>	<b>90</b>
<b>Cuadro 23. Costo de insumos por tonelada de producto final.</b>	<b>91</b>
<b>Cuadro 24. Costos de mano de obra.</b>	<b>92</b>
<b>Cuadro 25. Período de recuperación.</b>	<b>92</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Elementos morfológicos del bagazo de la caña de azúcar.	IV

## SIMBOLOGIA Y ACRONIMOS

<b>Bh</b>	Base húmeda
<b>Bs</b>	Base seca
<b>Ca</b>	Calcio
<b>CNE</b>	Energía neta
<b>CZ</b>	Cenizas
<b>DIVMS</b>	Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca
<b>EE</b>	Extracto etéreo
<b>ELN</b>	Extracto libre de nitrógeno
<b>EM</b>	Energía metabolizable
<b>FDN</b>	Fibra detergente neutra
<b>FDA</b>	Fibra ácido detergente
<b>LDA</b>	Lignina detergente ácida
<b>MS</b>	Materia seca
<b>NNP</b>	Nitrógeno no proteico
<b>P</b>	Fósforo
<b>PB</b>	Proteína Bruta
<b>PDR</b>	Proteína degradable en el rumen
<b>PND</b>	Proteína no degradable
<b>RAC</b>	Residuos agrícolas cañeros
<b>TND</b>	Total de nutrientes digestibles



## GLOSARIO

**ÁCIDO DICARBOXÍLICO:** compuesto de estructura carbonada que está sustituido por dos grupos funcionales tipo carboxilo. Por ello, su fórmula responde a  $HOOC-R-COOH$ , donde  $R$  suele corresponder a un grupo alquilo, alqueniolo o alquinilo. Los ácidos dicarboxílicos poseen especial relevancia en el metabolismo de las células.

**ACIDOSIS RUMINAL:** patología común en los bovinos, en la que el rumen tiene poca preparación para poder metabolizar, grandes cantidades de azúcares solubles. Proceso derivado de la acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV). Se manifiesta por medio de un bajo valor del pH ruminal.

**ALCALOSIS:** patología típica de bovinos causada por una intoxicación por amoníaco.

**AMINOÁCIDOS:** son las unidades elementales constitutivas de las moléculas denominadas Proteínas. Están formados por un carbono alfa unido a un grupo carboxilo.

**BAGAZO:** subproducto ligno-celulósico fibroso de la caña de azúcar, que se obtiene después de ser molidos sus tallos en el ingenio azucarero.

**BAGACILLO:** también llamado médula, es un material ligno-celulósico no fibroso, es un desecho generalmente obtenido como resultado de la operación de desmedulado en aquellos ingenios azucareros suministradores de fibras a las fábricas de celulosa y papel y a los productos aglomerados, representa aproximadamente el 25% de la composición de la caña de azúcar procesada.

**BIOMASA:** materia orgánica que se encuentra tanto por encima, así como por debajo del suelo, y tanto viva como muerta.

**BROMATOLOGÍA:** (del griego βρῶμα, broma, alimento y -λογος, logos, estudio) es la ciencia que estudia los **alimentos** en cuanto a su producción, manipulación, conservación, elaboración y distribución, así como su relación con la sanidad.

**CELULOSA:** homopolisacárido, con una estructura básica de las células de las plantas y de la sustancia más importante producida por este organismo vivo, siendo el principal componente de la pared celular.

**CICLO DE CALVIN:** consiste en una serie de procesos bioquímicos que se realizan en el estroma de los cloroplastos de los organismos fotosintéticos. Fueron descubiertos por *Melvin Calvin* y *Andy Benson* de la Universidad de Berkeley California mediante el empleo de isotopos radiactivos de carbono.

**DIGESTIBILIDAD:** forma de medir el aprovechamiento de un alimento, es decir, la facilidad con que es convertido en el aparato digestivo en sustancias útiles para la nutrición. Comprende dos procesos, la digestión que corresponde a la hidrólisis de las moléculas complejas de los alimentos, y la absorción de pequeñas moléculas (aminoácidos, ácidos grasos) en el intestino.

**ENERGÍA METABOLIZABLE (EM):** es la porción de energía que no se pierde con las heces, la orina ni los gases. Aunque la EM refleja con más exactitud la energía útil que contiene un alimento, no tiene en cuenta la energía que se pierde como calor.

**FIBRA:** fracción de tejido vegetal constituida por celulosa, hemicelulosas y lignina.

**FISTULA:** Orificio realizado en el rumen de los bovinos para fines de investigación en el cual se coloca una cánula y se extrae el líquido ruminal.

**FOTOSÍNTESIS:** proceso mediante el cual las plantas, algas y algunas bacterias captan y utilizan la energía de la luz para transformar la materia

inorgánica, de su medio externo, en materia orgánica que utilizarán para su crecimiento y desarrollo.

**HEMICELULOSA:** hetero-polisacáridos, formados por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces  $\beta$  (1-4) (fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico), que forman una cadena lineal ramificada.

**HETEROPOLISACARIDO:** polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero.

**LIGNINA:** sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen.

**MACOLLO:** son la unidad estructural de la mayoría de las especies de gramíneas. Se forman a partir de las yemas axilares o secundarias del meristema basal de la yema principal. La suma o adición de macollos es lo que conforma la estructura y la forma de una planta de gramínea.

**MARALFALFA:** (*Pennisetum* sp) es un pasto mejorado de origen colombiano, perenne, con extraordinarias características productivas y nutricionales.

**MURICADA:** superficie con espinas, pinchos o aguijones.

**OLIGOELEMENTOS:** bioelementos presentes en pequeñas cantidades (menos de un 0,05%) en los seres vivos y tanto su ausencia como una concentración por encima de su nivel característico puede ser perjudicial para el organismo, llegando a ser hepatotóxicos (hierro, zinc, boro, cobre, etc.)

**PROTEÍNA BRUTA:** nitrógeno total de la muestra expresado como proteína.

**RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS:** la madera se compone de lignina, celulosa y hemicelulosa. Con esta denominación, se describen los procesos en

los cuales se combinan la lignina y la celulosa, por ejemplo, los que consisten en la descomposición de ambas sustancias.

**RUMIANTE:** animal que digiere los alimentos en dos etapas, primero los consume y luego realiza la rumia. Ésta consiste en regurgitar el material semi-digerido y volverlo a masticar para deshacerlo y agregarle saliva (bovinos, ovinos, caprinos y camélidos).

**SEQUÍA:** tiempo seco de larga duración. Durante la sequía, el agua disponible está por debajo de los parámetros habituales de una determinada región geográfica; por lo tanto, resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de los seres humanos, los animales y las plantas.

**SUBPRODUCTOS CÁRNICOS:** productos obtenidos de desechos de animales como son la harina de sangre, gallinaza, etc. utilizados para la alimentación animal.

**TANDEM:** Conjunto de molinos por los que pasa la caña dentro de su proceso agroindustrial.

**TRANSGLUTAMINASA:** son enzimas capaces de unir proteínas entre un grupo amino de un residuo de lisina y un grupo carboxamida de un residuo de glutamina. De esta manera, son capaces de crear un enlace inter o intramolecular altamente resistente a la proteólisis, es decir, la ruptura de la proteína.

**UREA:** compuesto químico cristalino bipolar e incoloro, de fórmula  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . Se encuentra abundantemente en los riñones y en la materia fecal. Es el principal producto terminal del metabolismo de proteínas en el hombre y en los demás mamíferos.

**ZAFRA:** cosecha de la caña de azúcar. Producción agro-industrial del azúcar de caña.



## RESUMEN

En este trabajo, se presentó el desarrollo de un alimento base pre-digerido a partir de los componentes fibrosos de la caña, para ganado bovino, con una granulometría tipo harina acompañado de una adecuada suplementación proteica. El incremento de la digestibilidad del componente fibroso del alimento (lignina, hemicelulosa, celulosa) se implementó mediante un tratamiento químico alcalino a base de hidróxido de sodio. Dicho tratamiento se realizó con una solución de Hidróxido de Sodio a una concentración 2.0 Normal. Para detener la reacción alcalina y enriquecer proteicamente al bagazo tratado, se le aplicó una solución de miel+urea al 2.0%. A su vez, en calidad de suplemento proteico, fueron utilizados cereales como insumos energéticos y arbustos forrajeros. En otra formulación, se suplementó proteicamente con un subproducto de la producción de la enzima Transglutaminasa. Las formulaciones obtenidas fueron evaluadas analítica y comparativamente en sus respectivos niveles de incremento de digestibilidad, para ello se realizaron pruebas de digestibilidad *in vitro* así como en su contenido de proteína y minerales, porcentaje de humedad y otros parámetros bromatológicos. Para la caracterización física de las fibras integrales y post-tratamiento se emplearon las técnicas: a) Difracción de Rayos X b) Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de *Fourier*, c) Microscopía Electrónica de Barrido y d) Microscopia confocal con barrido laser. Para la formulación de los alimentos se empleó el cuadrado de *Pearson* y el software *CONFOR*. Adicionalmente se desarrolló un modelo sencillo de evaluación de ganancia en peso diaria en el que se evaluó el aumento en peso por un periodo de 100 días. De acuerdo a los resultados obtenidos mediante las técnicas DRX, FTIR, MEB y MCBL fue posible corroborar que el tratamiento alcalino le confiere una mayor digestibilidad al bagazo y por tanto, sus resultados pueden ser aplicados en tecnologías de alimentación animal de bovinos. La presente investigación por tanto, está dirigida a contribuir a aliviar uno de los problemas más apremiantes que enfrenta el sector agropecuario mexicano, la producción de un alimento animal para engorde de ganado bovino en condiciones técnicas y económicamente viables.

**Palabras clave:** bagazo, aumento digestibilidad, caña, alimento animal.

## ABSTRACT

It was developed an animal feed from the fibrous components of sugar cane, a staple flour type animal food predigested enriched by appropriate proteic supplementation. The increase on digestibility of fibrous feed components (lignin, hemicellulose and cellulose) was implemented either by chemical treatment based on sodium hydroxide. Previously it was determined the optimal particles size distribution by the grinding and subsequent classification of all components present in bagasse as assessed flours analytical and comparative increase their levels of digestibility and protein content and mineral density, humidity and other bromatological parameters applying for this traditional analytical chemistry techniques such as *Kennedy* method, colorimetric methods were used together as the *Kjeldahl*. And for the formulation of the food shall be given by the square of *Pearson* and software CONFOR. The optimal alternative was evaluated by examining and monitoring the weight gain in animals housed previously tested veterinary techniques and nutritional. By the time it had been worked with chemical methods for increasing the digestibility of fibrous components (NaOH treatment) in the development of experimental formulations, a mixture was applied molasses+urea, as protein supplements it was utilized food cereals as energy supplements and fodder shrub sun conventional as a protein supplement. This last charge is used because of its high protein content and ease of use because of its wide distribution in the country. This research aimed to help alleviate one of the most pressing problems faced by the Mexican agricultural sector, production of animal feed for fattening cattle in technical and economically feasible.

Keywords: animal feed, bagasse, digestibility, protein, sugarcane, supplements.

## INTRODUCCIÓN

Teniendo de panorama a los grandes problemas de contaminación que experimenta México, surgen como alternativas, las tecnologías verdes y, dentro de estas, se encuentra el aprovechamiento de uno de los cultivos más promisorios del siglo XXI, la caña de azúcar, cuyo nombre botánico es *Saccharum officinarum*. La producción mundial de azúcar en 2010/11 fue de 168,8 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 7,7 por ciento durante la campaña de 2009/10<sup>1</sup> de la cual el 60% aproximadamente se obtiene de la caña de azúcar.

Actualmente, existen 110 países productores de azúcar, todos ellos localizados en los trópicos de Cáncer y Capricornio, o sea en la zona tropical y ecuatorial <sup>2</sup>. Dentro de esos 110 países México figura dentro de los primeros lugares (Figura 1) a pesar del notable estancamiento en cuanto a desarrollo sustentable, tecnología y generación de co-productos, esto último debido a la arcaica idea de solo generar azúcar y a la visión conservacionista, y en cierta forma familiar, de la industria mexicana de la caña de azúcar.

Esta gramínea produce nueve subproductos de alto valor agregado para muchos países y muchos de ellos lamentablemente vistos como desecho y/o contaminación en nuestro país. El bagazo es uno de los subproductos más importantes que se generan en el proceso agroindustrial de la producción de azúcar de caña, tanto por su composición fibrosa, como por su valor energético.

El bagazo de caña de azúcar, es un material ligno-celulósico abundante y de bajo costo, sub-producto del proceso de extracción de azúcar representando el 25% del total de la caña de azúcar procesada <sup>3</sup> y generado después de la

---

<sup>1</sup> FAO. 2010. Perspectivas Alimentarias. Análisis de los mercados mundiales. Resumen del mercado del azúcar.pg.39. <http://www.fao.org/docrep/013/al969s/al969s00.pdf>.

<sup>2</sup>ICIDCA, 1988. "Manual de los derivados de la caña de azúcar" Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de Azúcar, Colección GEPLACEA, pag.3.

<sup>3</sup>Ferrer, et al., 2002. *Kinetics of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse pith*. Rev. Fac. Agron. La Universidad de Zulia (LUZ)., 19: 23-33, p. 24.

extracción de todo el jugo de las paredes de la gramínea *Saccharum officinarum* (caña de azúcar); es el resultado de moler los tallos de la caña, de su saturación con agua y su posterior separación en parte sólida, bagazo integral) y diluida (guarapo). Este subproducto está formado por un conjunto de partículas de diferentes tamaños cuyo promedio oscila alrededor de 2.5 mm. Esta granulometría depende fundamentalmente del trabajo de los equipos de preparación de la caña y en menor grado del diseño de los molinos del tándem azucarero y de la variedad de la caña <sup>4</sup>.

Está constituido de componentes orgánicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) en un 45-60 %, 2-3 % de sólidos no solubles, 2-3 % de sólidos solubles y 50 % de agua que es generada por fuertes puentes de hidrogeno y se mantiene dentro de las paredes por capilaridad <sup>5</sup>; este último componente le da al bagazo la capacidad de poder absorber eficientemente cualquier líquido, y así poder ser materia prima de diversos co-productos como son los tableros aglomerados, celulosa, diversos tipos de papel, furfural, polímeros y alimento animal, entre otros muchos usos en la industria. En base a su disponibilidad, vale señalar que un ingenio azucarero es capaz de producir suficiente bagazo excedente, factible de ser destinado al desarrollo de una importante base para la producción de alimento animal.

En la Tabla 1 se muestran los diferentes elementos morfológicos de que está compuesto porcentualmente el bagazo, en base seca<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup>GEPLACEA, 1989, Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar. Serie Diversificación, GEPLACEA/PNUD, p. 32.

<sup>5</sup> Lois, J., 1982. Manual de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. Cuba, p. 30.

<sup>6</sup> Ibid, p.35.

**Tabla 1. Elementos morfológicos del bagazo de la caña de azúcar.**

<b>COMPONENTE</b>	<b>%</b>
<b>Fibras largas de la corteza</b>	50.0
<b>Parénquima</b>	30.0
<b>Haces fibrovasculares</b>	15.0
<b>Células epidérmicas</b>	5.0

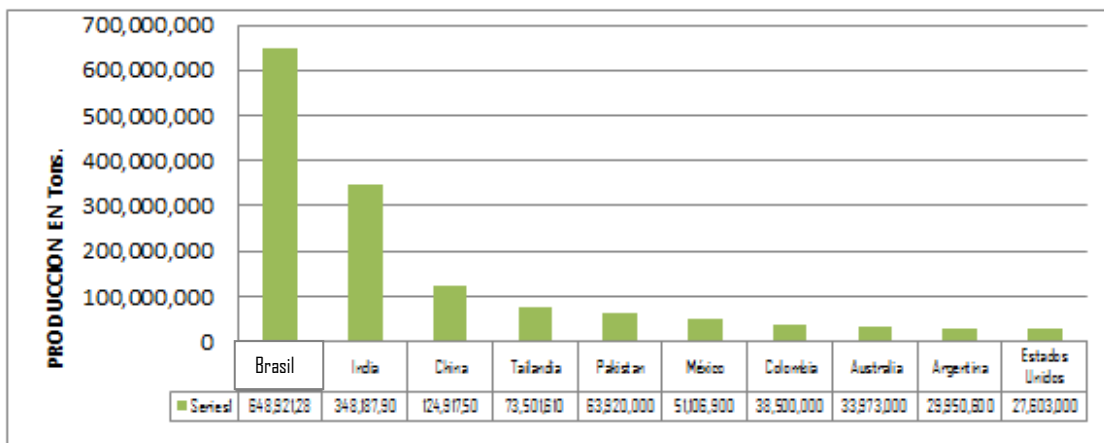
Cíclicamente el sector agropecuario mexicano y muy particularmente los estados del noreste entre los que se encuentra Tamaulipas, sufren los embates de contingencia climatológicas entre las que se pueden citar la sequía. El problema es mas en los últimos años como consecuencia del calentamiento global y los cambios climáticos se han hecho cada vez más frecuentes.

Por otra parte, las actividades agropecuarias y agroindustriales dan origen a una serie muy amplia de residuos fibrosos y subproductos, algunos de los cuales impactan negativamente el medio ambiente pero que se podrían emplear de diversas maneras con el objetivo de formular alimentos para animales. Un ejemplo de ello lo constituyen los subproductos de la agroindustria azucarera como son, la melaza, puntas de caña o cogollo, bagazo de caña de azúcar, los R AC y las linazas de destilerías.

En forma tradicional, los subproductos de la caña de azúcar se han empleado de forma limitada y variada en las raciones para rumiantes, en especial para bovinos; podría afirmarse que a pesar de los problemas alimentarios que sufre el ganado apenas un 10% del bagazo de caña se usa para este propósito a pesar de que durante los periodos de sequía escasean los alimentos tradicionales y que el bagazo representa una variable importante para alimentar al ganado.

Basado en las consideraciones antes mencionadas el objetivo del presente proyecto estuvo dirigido al desarrollo de formulaciones de alimentos en forma de harinas forrajeras con digestibilidad incrementada a partir de la utilización y conversión del bagazo de la caña de azúcar disponible en grandes cantidades en los ingenios azucareros de la región.

Como aspecto novedoso para el cumplimiento de ese objetivo se empleó un proceso físico-químico flexible. Uno de los propósitos de este objetivo era lograr la ruptura de los enlaces de lignina mediante un tratamiento químico para lograr el incremento de la digestibilidad de la fracción fibrosa. Adicionalmente, se exploró con buenos resultados la inclusión en forma combinada de Maralfalfa y del sub-producto de la MTGasa lo cual constituirá un aporte en la temática de la alimentación para ganado bovino.



**Figura 1. Principales países productores de caña de azúcar.**

## 1. ANTECEDENTES

Históricamente, el bagazo se empleaba como combustible en la industria azucarera y, aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible y a la vez son grandes productores de azúcar de caña. Por otra parte, la existencia cada vez menor de materiales fibrosos para ser empleados en la fabricación de co-productos de valor agregado y su carácter renovable, ha estimulado en las últimas décadas de desarrollo un proceso acelerado en la utilización del bagazo para otros fines. En ese sentido, cabe señalar que se ha demostrado que un ingenio azucarero puede satisfacer las demandas energéticas con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima<sup>7</sup>.

En el siglo XVI, el azúcar era ya un producto de gran importancia para el comercio entre los territorios de América y Europa. Al comienzo del siglo XX, las empresas azucareras tenían mayor eficiencia energética, debido a que implementaron técnicas para convertir el vapor que producían en energía eléctrica para su propio uso; Sin embargo, el bagazo seguía constituyendo un residuo no deseable, en el cual tenían que invertir para su ulterior disposición, y es precisamente en este entorno donde surge un importante giro para la industria azucarera: el aprovechamiento de sus subproductos para darles un uso que les diera sustentabilidad y rentabilidad.

Fue hasta 1950 cuando de la producción de tableros, pulpa y papel, se percatan de que se produce un sobrante de bagazo y este comienza a ser utilizado para la alimentación animal.

La utilización de la gramínea *Saccharum officinarum*, como alimento animal, ha sido práctica frecuente principalmente para el ganado bovino, y en especial, en temporada seca, o cuando escasea la disponibilidad de recursos forrajeros.

---

<sup>7</sup> Lois, J. 1984. Aumento de eficiencia técnico-energética en industrias de derivados. I Fórum Nacional de Energía, Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

Sin embargo, las técnicas utilizadas han sido predominantemente rudimentarias con muy poca apreciación del papel crítico que juegan los suplementos proteicos, como forma de mejorar la eficiencia en la utilización de la caña de azúcar para su utilización en la alimentación animal; no obstante, en los últimos 10-20 años se han aplicado serios esfuerzos para iniciar una mayor comprensión de las restricciones que han limitado la expresión del potencial nutricional de este alimento, especialmente para rumiantes.

Los mayores esfuerzos se realizaron en la década de los 60 del pasado siglo con el empleo de las melazas para alimentar al ganado y posteriormente, con el empleo de mezclas de bagacillo (médula) con soluciones de melaza+urea. Sin embargo, la baja digestibilidad y poco contenido de nitrógeno del componente fibroso, limitaron su uso para servir como relleno en los concentrados, o en muy bajos niveles de inclusión en las raciones. De esta forma, el aporte de nutrimentos del bagazo resultaba insignificante, a pesar de que el contenido en carbohidratos potencialmente digestibles por el rumiante es alto > 70 %.

Uno de los problemas que trae consigo la contaminación ambiental en México es la sequía, que se puede definir como un conjunto de condiciones ambientales atmosféricas de muy poca humedad que se extienden durante un periodo suficientemente prolongado como para que la falta de lluvias cause un grave desequilibrio hidrológico y ecológico<sup>8</sup>. La sequía trae consigo pérdida de cultivos, altos índices de mortalidad en el ganado, bajos rendimientos económicos y muchos problemas más, pero para fines del presente proyecto el problema más acuciante es la mortandad de ganado, ya que tan solo en el norte del país han muerto en este año 450 mil reses lo anterior referenciado por la Confederación Nacional Campesina, debido a la escasez de agua.

Al problema anterior se le añade el hecho de que se estima que 1/3 de los cereales producidos en el mundo se destina a la alimentación de los animales,

---

<sup>8</sup> SEMARNAT. La Sequía en México (Acciones IMTA 2009). Instituto Mexicano de Tecnología del agua [http://www.imta.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=177:las-sequias-en-mexico&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80](http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:las-sequias-en-mexico&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80).



en detrimento de la población humana, que tanto necesita de estos productos alimenticios. Por ello, se debe orientar cada vez más el uso de residuos lignocelulósicos, como por ejemplo el bagazo, en la alimentación animal, debidamente tratados y correctamente administrados en la dieta de los rumiantes.

El bagazo es el subproducto de la caña que se obtiene después de moler los tallos, contiene un alto contenido de energía metabolizable, y se tienen suficientes elementos como para aseverar su adecuada utilización y ulterior conversión en productos de alto valor agregado. Entre estos últimos, tiene sentido el desarrollo de formulaciones de alimento animal en forma de harina forrajera para contribuir a solucionar los problemas de la alimentación del ganado bovino en esta época de crisis económica.

En los inicios del presente proyecto, se manejó la hipótesis de qué el desarrollo de harinas forrajeras pre-digeridas y suplementadas proteicamente mediante la utilización y conversión del bagazo de caña de azúcar, podría ser una contribución técnico-económica viable en la engorda de bovinos en época de sequía y de no- zafra. Por tanto, el objetivo general se basó en desarrollar la harina antes señalada a base de la utilización del bagazo de la gramínea *Saccharum officinarum*, pre-digerido y enriquecido proteicamente, para el ganado bovino de engorde.

## **1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

La caña de azúcar, también llamada *caña de la tierra* o caña de *La Española*, fue la primera variedad que llegó a América traída de España por los conquistadores españoles.

La caña de azúcar, botánicamente conocida como *Saccharum officinarum*, es una gramínea de grandes potencialidades económicas. Se caracteriza por:

- Ser un cultivo anual.
- Poseer gran contenido de azúcares combinado con fibra altamente lignificada.

- Notable adaptabilidad a diferentes tipos de suelos.
- Poseer evolucionados mecanismos fisiológicos, ciclo de C<sub>4</sub>.
- Gran producción de biomasa.
- Ser un cultivo en equilibrio con el medio ambiente.
- Riqueza en energía metabolizable (2.3Mcal·kg<sup>-1</sup> ).

La caña de azúcar es una gramínea que alcanza entre 2 y 5 m de altura, y un tallo de hasta 5 a 6 cm de diámetro; cabe destacar que como toda gramínea posee un tallo macizo de consistencia fibrosa (Figura 2).



**Figura 16. Vista de la planta caña de azúcar.**

La caña de azúcar, tiene un rendimiento promedio reportado de 100 toneladas por hectárea, (se han reportado rendimientos mayores, de hasta 270 ton /ha), más del doble que la mayoría de otras plantas. En términos de energía total, representa más de 1000 toneladas de petróleo equivalente, y considerada como energía metabolizable representa 75 000 Mcal, cifra varias veces superior a cualquier otro cultivo en igualdad de condiciones. Adicionalmente, la caña de azúcar contiene aproximadamente 40 toneladas de celulosa, y 60 toneladas de jugos. La desventaja que tiene la caña de azúcar, es su bajo contenido de proteínas ( $\geq 2.0$  %). Sin embargo, con la adición de determinadas cantidades de urea se compensa parcialmente la insuficiencia proteica. Desde el punto de vista químico, la urea es una *diamida*, que en presencia de los

azúcares de la caña, es hidrolizada por las bacterias, que con ella forman el primer eslabón de las proteínas: los *aminoácidos*<sup>9</sup>.

## 1.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar es un cultivo cosmopolita debido a sus características de adaptabilidad, lo que le permiten establecerse en casi cualquier suelo y bajo cualquier situación climatológica, sus necesidades de establecimiento son muy pocas, dentro de las que destacan las necesidades en la siembra, la cual se realiza por materia vegetativa, sembrándose a espacios de 1 ó 2 metros, sus necesidades son de un riego continuo y un suelo franco libre de malezas. En la Figura 3 se muestra la distribución geográfica de esta gramínea en México se puede observar en cada estado la producción de la zafra 2010 /11.

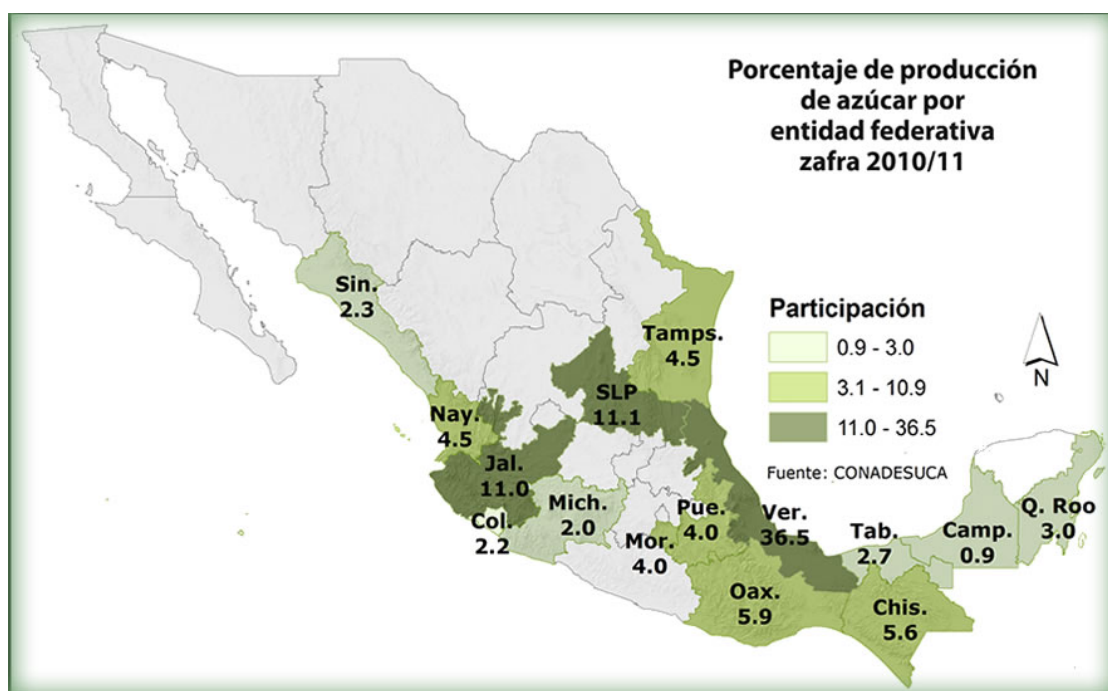


Figura 17. Distribución geográfica de la caña de azúcar en México<sup>10</sup>.

**1.2.1 Distribución mundial de la caña de azúcar.** Como se observa en la Figura 4, la distribución de este cultivo está comprendida entre los Trópicos de

<sup>9</sup>Vassallo. 2007. Caña de azúcar, mandioca y batata para forraje en la producción intensiva de.Fundcinema. Director Informe Parcial Chacra Experimental del Centro de Investigaciones Nematológicas, Corrientes, Argentina.p.1

<sup>10</sup> Comité nacional para el desarrollo sustentable de la caña de azúcar. CONADECUSA (2012) <http://www.conadesuca.gob.mx/regionesinternas.html#>

Cáncer y de Capricornio, definiéndose estas zonas tropicales e intertropicales como propicias para el desarrollo del cultivo.



Figura 18. Distribución geográfica mundial de la caña de azúcar.

**1.2.1.1 Superficie Cultivada.** Como se puede apreciar en el Cuadro 1, los años en los que se registró mayores superficies cultivadas fueron 1998 (19.33 millones de hectáreas); año 2000 con 19.52 millones de hectáreas; 2001, con 19.74 y los años 2002, 2003 y 2007, con 20.51, 20.81 y 21.98 millones de hectáreas cultivadas, respectivamente.

Cuadro 1. Superficie mundial cultivada de caña de azúcar (millones de hectáreas).

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	PROMEDIO	TMAC
BRASIL	4.81	4.99	4.90	4.85	4.96	5.10	5.37	5.63	5.81	6.14	6.71	5.39	3.4
INDIA	4.17	3.94	4.05	4.22	4.32	4.41	4.52	3.94	3.66	4.20	4.90	4.21	1.6
CHINA	1.11	1.19	1.04	1.19	1.28	1.42	1.43	1.39	1.37	1.22	1.24	1.26	1.1
TAILANDIA	0.98	0.92	0.92	0.91	0.88	1.01	1.14	1.11	1.07	0.97	1.01	0.99	0.3
PAKISTÁN	0.96	1.06	1.16	1.01	0.96	1.00	1.10	1.07	0.97	0.91	1.03	1.02	0.6
MÉXICO	0.61	0.63	0.64	0.62	0.62	0.63	0.64	0.65	0.67	0.66	0.69	0.64	1.2
AUSTRALIA	0.40	0.42	0.41	0.42	0.40	0.43	0.45	0.45	0.43	0.42	0.42	0.42	0.5
COLOMBIA	0.39	0.39	0.39	0.41	0.40	0.42	0.43	0.43	0.43	0.42	0.45	0.41	1.5
ESTADOS UNIDOS	0.37	0.38	0.40	0.42	0.42	0.41	0.40	0.38	0.37	0.37	0.36	0.39	-0.3
FILIPINAS	0.35	0.34	0.31	0.39	0.39	0.38	0.38	0.39	0.37	0.39	0.40	0.37	1.3
CUBA	1.25	1.05	1.00	1.04	1.01	1.04	0.64	0.66	0.52	0.40	0.40	0.82	-10.7
INDONESIA	0.38	0.41	0.39	0.37	0.39	0.35	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35	0.37	-0.8
OTROS	3.51	3.62	3.59	3.67	3.72	3.90	3.95	3.93	4.00	4.01	4.02	3.81	1.4
MUNDO	19.29	19.33	19.20	19.52	19.74	20.51	20.81	20.38	20.02	20.45	21.98	20.11	1.3

Fuente: Elaboración propia con datos para México del SIACON y resto de países de FAO.

### 1.3 SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA AZUCARERA MEXICANA

México, por su ubicación cercana a la línea del ecuador, es un lugar idóneo para el cultivo de gramíneas C<sub>4</sub> (Ciclo de carbono 4). Sistema modificado de absorción de la luz solar, desarrollado en algunas gramíneas como *Saccharum officinarum*, como forma de adaptación al clima dentro de las cuales se encuentra la caña de azúcar, misma que ha venido desarrollándose a lo largo

de la evolución del país, ya que se encuentra en México desde su introducción durante la colonización española, y ha ido creciendo desde los tradicionales trapiches accionados por animales de carga (mulas) hasta llegar a los ingenios actuales, que si bien no han tenido un gran crecimiento en cuanto a diversificación de co-productos generados, sin embargo, lo han tenido en cuanto a volumen de producción, posicionando a México entre los 10 principales países productores de azúcar de caña en el mundo, en el año 2010 la producción total de esta gramínea fue de 50,421,619.53 toneladas <sup>11</sup>.

Veracruz es el estado con mayor cantidad de hectáreas sembradas de caña de azúcar, precedido por estados como Jalisco y Oaxaca (Ver Figura 5). Tamaulipas por su situación geográfica es un estado donde es viable el desarrollo de industrias para la diversificación de co-productos de caña de azúcar, como lo son alimentos a base de bagazo, melaza, cachaza, residuos de la cosecha, bio-etanol y aglomerados entre otros.

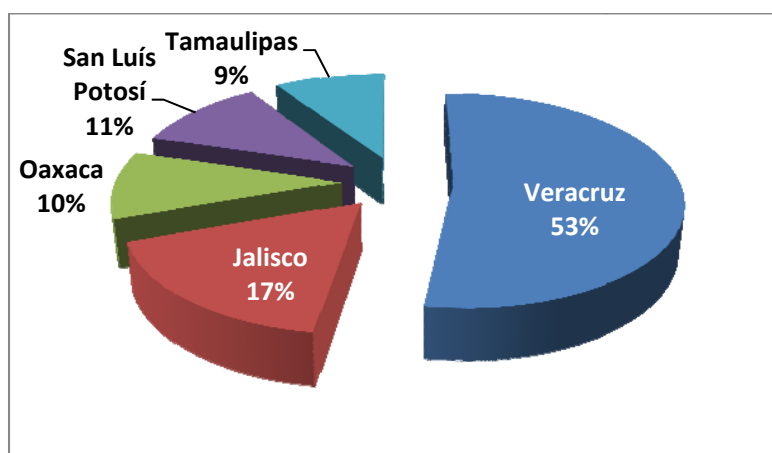


Figura 19. Distribución de la producción de caña de azúcar en México.

**1.4 IMPORTANCIA DE LA CAÑA DE AZUCAR COMO CULTIVO.** La caña de azúcar es considerada la planta que más perfeccionado tiene los mecanismos

<sup>11</sup>Anuario estadístico de la producción agrícola. Ciclo: Cíclicos y Perennes 2010 Modalidad: Riego + Temporal. Caña de azúcar. <http://www.azucar.gob.mx/index.php?portal=cania>.

fisiológicos para la producción de sacarosa, pues sus vías fotosintéticas para producirla (C<sub>4</sub> o vía ácidos dicarboxílicos) a partir de los azúcares simples, son mecanismos altamente eficientes.

**1.4.1 Características relevantes de la gramínea *Saccharum officinarum*.** El hombre, a través de un largo y continuado proceso de mejoramiento, ha perfeccionado y desarrollado la caña de azúcar hasta alcanzar variedades comerciales con alto contenido de sacarosa y resistencia a enfermedades. Otra característica que hace a esta gramínea un cultivo de preferencia, y que la hace colocarse dentro de las que poseen mejores cualidades es su producción de biomasa ya que su composición es muy rica energéticamente, debido a su contenido de almidones, proteínas y compuestos ligno-celulósicos, todos ellos materias primas para un amplio campo de producciones, algunas de ellas de significativa importancia económica. Otra cualidad que posee, es su capacidad de crecer casi en cualquier tipo de suelo y bajo circunstancias adversas como es el caso de la sequía, debido a su elaborado sistema fisiológico, ya que durante la temporada de altas temperaturas (energía) y máxima actividad pluvial alcanza un gran crecimiento vegetativo, aprovechando al máximo los nutrientes y energía proporcionadas. Bajo estas condiciones, la fotosíntesis se desplaza hacia la producción de carbohidratos de alto peso molecular (celulosa) que más tarde formarán parte del cuerpo fibroso de la planta (follaje y parte fibrosa del tallo). Cuando dejan de existir estas condiciones, o sea en la época de la sequía, adquiere sus máximos niveles de síntesis de sacarosa que se almacenan en el tallo, a lo que se ha dado en llamar “madurez tecnológica” de la caña.

**1.4.2 Perfil bio-fisiológico de la caña de azúcar.** En relación con su valor forrajero, es importante señalar que la caña de azúcar, picada finamente y secada al sol muestra el potencial de la misma como forraje de elección:

MS: 94.81% - PB: 2.04% - FDN: 46.80% - FDA: 33.45% - LDA: 8.47% -  
EE: 2.05% Cz: 5.83% - CNE: 44.87% - Ca: 0.27% - P: 0.14% - TND: 58.99% -  
EM: 2.17 Mcal/Kg MS.

El perfil bio-fisiológico de la caña de azúcar, queda claramente definido por los siguientes tres valores fundamentales de los análisis:

**FDN:** 46.80%, muestra un elevado contenido de fibra, con lo cual mantiene su condición de “forraje”.

**CNE:** 44.87%, muestra un elevado contenido de “energía”, totalmente soluble, que corresponde evidentemente al elevado contenido de Hidratos de Carbono (la desecación provoca una pérdida no significativa de su contenido, ya que la mayor parte de ellas son azúcares invertidos) que difiere muy poco del contenido de las muestras de caña de azúcar picadas frescas para consumo directo en la ración.

Finalmente, el tercer elemento corresponde al nivel de Energía Metabólica (EM), que alcanza:

**EM:** 2.17 Mcal·kg<sup>-1</sup> de materia seca. Este valor la posiciona como una fuente de energía altamente económica <sup>12</sup>.

La caña de azúcar es un cultivo tropical de importancia económica y social en toda Latinoamérica, tanto en zonas de topografía plana como en ladera. Es un cultivo perteneciente a las gramíneas con una buena cantidad de azúcares que mantiene su valor nutritivo en épocas de seca y lo enriquece a medida que madura entre los 8 y 10 meses de edad. Esta gramínea puede llegar a tener 5-6 cm de diámetro y las hojas 0.5-1.0 m de largo. En general, tal y como se mencionó anteriormente, todavía se practica la quema del cañaveral antes de la cosecha, práctica que afecta el equilibrio con el medio ambiente, con ello se busca defoliar las cañas y facilitar las operaciones de recolección. Sin embargo, generalmente en los países de clima seco, no se quema la caña, ya que las hojas que quedan en el campo mejoran la retención de humedad del

---

<sup>12</sup> Vassallo, Op cit., p. 1

suelo. En muchos países tropicales se ha señalado que la caña de azúcar, es más eficiente como productora de carbohidratos de fácil asimilación que otros cultivos.

**1.4.3 La caña de azúcar y su sistema de fotosíntesis.** Los sistemas vivientes no pueden utilizar directamente la energía de la luz, pero pueden a través de una complicada serie de reacciones convertirla en enlaces C-C y, esta energía puede ser luego liberada por la glicólisis y otros procesos metabólicos.

*Zeiger*<sup>13</sup> menciona que a fines de la segunda guerra mundial, en los laboratorios de *Berkeley* (California), *Melvin Calvin* y colaboradores (premio Nobel 1961), usando Carbono-14 y técnicas de intercambio iónico, cromatografía en papel y radio-autografía “mapearon” completamente el ciclo del Carbono en la fotosíntesis, y el ciclo del carbono se conoce comúnmente como ciclo de *Calvin*, o de *Calvin-Benson*. Dentro de la investigación surgió el descubrimiento de plantas que realizaban la fotosíntesis por otra vía diferente a la del *Ciclo de Calvin*, a la que se llamó Ciclo del C<sub>4</sub>. El descubrimiento del ciclo de los ácidos C<sub>4</sub> se realizó con estudios de marcaje con CO<sub>2</sub> realizados en la caña de azúcar por *H.P Lortschacla* y colaboradores. Cuando las hojas de estas plantas se expusieron unos segundos al CO<sub>2</sub> en presencia de luz, el 70-80% del marcaje se encontró en los ácidos C<sub>4</sub> malato y aspartato, patrón muy diferente del observado en hojas que solo fotosintetizan a través del ciclo de *Calvin*. A partir de estas observaciones iniciales *M.D Hatch* y *C.R Snack*<sup>14</sup> dilucidaron lo que hoy se conoce como *ciclo fotosintético C<sub>4</sub>* del carbono.

---

<sup>13</sup>Ziger, E., Taiz, L., 2007. Fisiología Vegetal. Publicaciones Universidad Jaume, pág. 291

<sup>14</sup> Ibid pg.293.



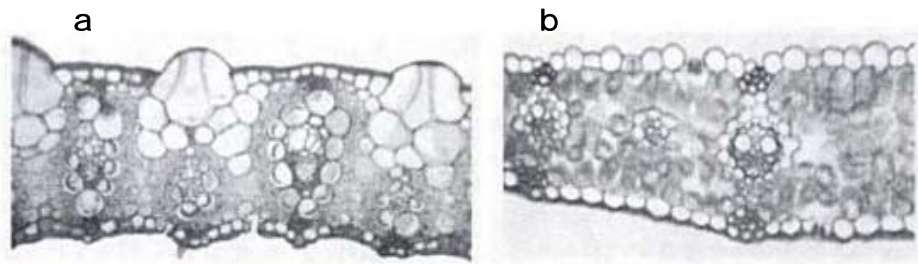


Figura 20. Secciones transversales de hojas mostrando diferencias anatómicas entre plantas C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> a) Monocotiledonea C<sub>4</sub> *Saccharum officinarum* (135 X) b) Monocotiledonea C<sub>3</sub> *Poa sp* (240 X).

El ciclo de carbono C<sub>4</sub> está presente en 16 familias de monocotiledoneas como la caña de azúcar (Figura 6), que habitan en climas tropicales y su principal ventaja en climas secos es que reducen la fotorrespiración y absorben agua, como condición de adaptabilidad desarrollada por estas plantas.

**1.4.4 Ciclo del C<sub>4</sub>** Algunas plantas han desarrollado un ciclo previo para evitar la fotorrespiración, donde la fijación del CO<sub>2</sub> comienza en el fosfo-enol-piruvato (PEP), molécula de tres carbonos, que se convierte en oxalacético de cuatro carbonos (Figura 6). El ácido oxálico es convertido en ácido málico (también de cuatro carbonos). Todo esto ocurre en las células del parénquima clorofiliano del mesófilo y luego el ácido málico pasa a las células de la vaina fascicular donde se desdobra nuevamente en PEP y anhídrido carbónico, que entra en el ciclo de Calvin, mientras que el PEP vuelve a las células del mesófilo. La glucosa formada puede ser transportada rápidamente al resto de la planta (Figura 7).

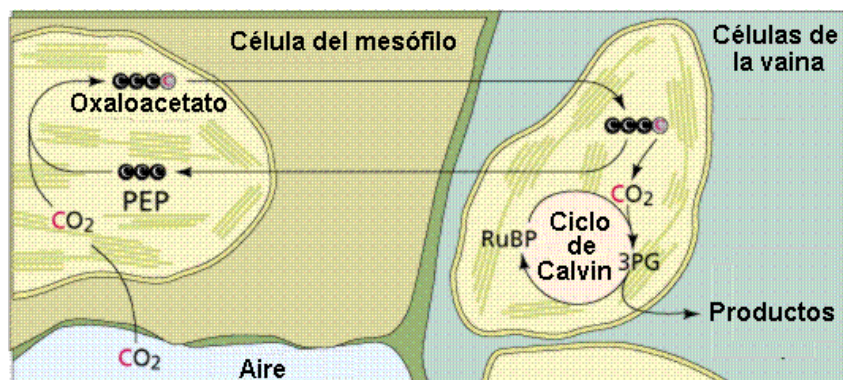


Figura 21. Diagrama del ciclo de C<sub>4</sub>

Las plantas que usan la vía de cuatro carbonos a menudo crecen muy juntas, y deben ajustarse a la disminución de anhídrido carbónico que este hecho implica. Lo hacen aumentando la concentración de anhídrido carbónico en ciertas células para prevenir la fotorrespiración (Figura 8).

Dichas plantas (por ejemplo caña de azúcar y maíz) evolucionaron en los trópicos y están adaptadas a mayores temperaturas. Nótese que el oxalacetato y el málico tienen funciones en otros procesos, por lo tanto están presentes en todas las plantas, permitiendo hipotetizar que la vía de los cuatro carbonos evolucionó independientemente muchas veces, en un mecanismo denominado evolución convergente.

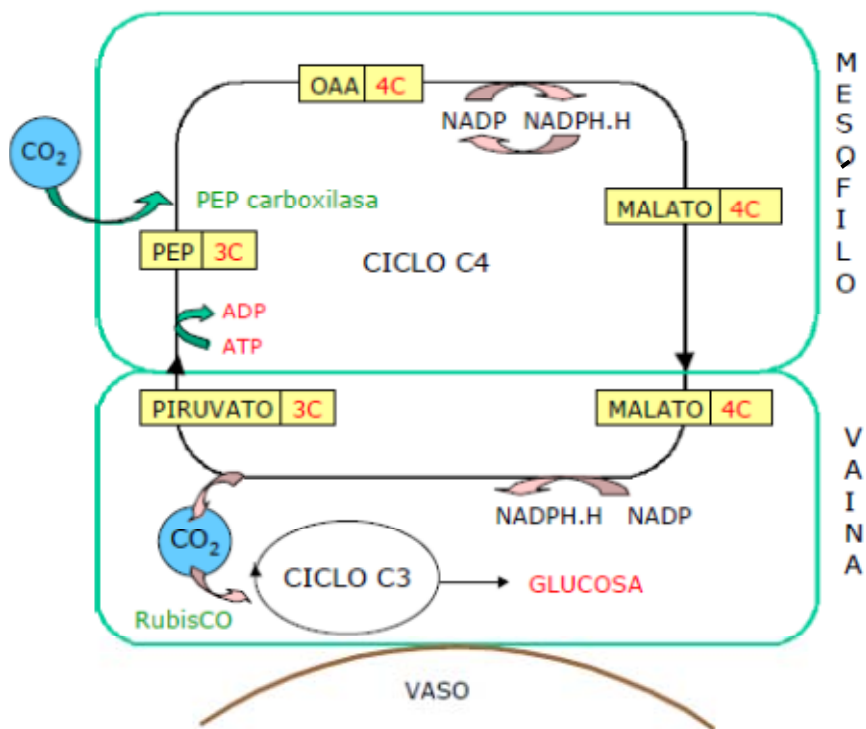


Figura 22. Ciclo del Carbono C-4 Hatch-slack.

## 2. SUB-PRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar, como ya se mencionó, es una de las principales alternativas para la elaboración de tecnología verdes y esto se debe, en gran medida, a su gran contenido energético y a la pluralidad de usos que manifiesta.

Una característica importante es que posee nueve subproductos, los cuales sirven de materia prima para más de 100 co-productos, algunos de ellos de alto valor agregado, desde biodiesel, furfural, proteínas, enzimas y alimento animal, que es el objetivo del presente proyecto. En la Figura 9 se muestran los subproductos de la caña de azúcar.

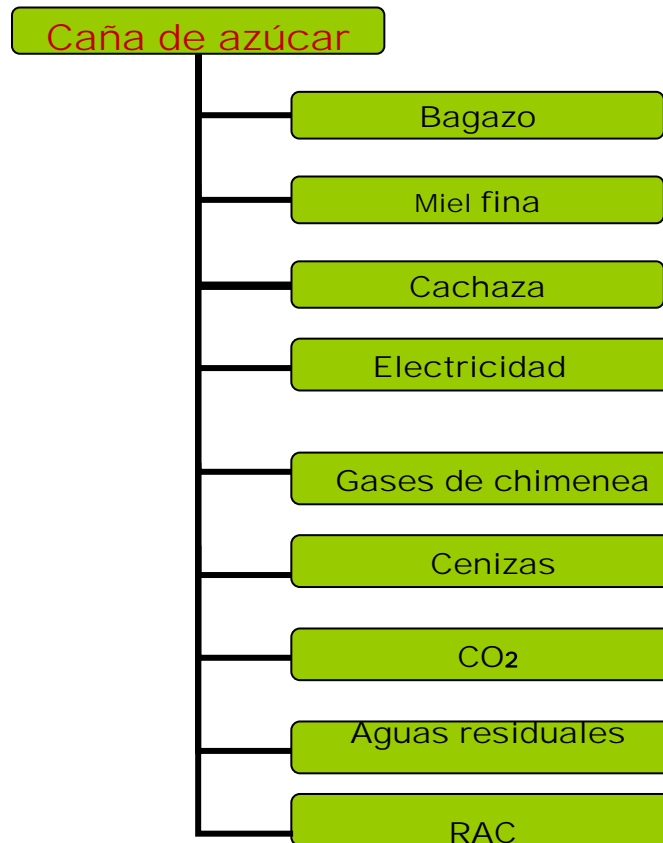


Figura 23. Sub-productos de la Caña de Azúcar.

## 2.1 BAGAZO COMO MATERIA PRIMA

El bagazo sub-producto que se obtiene del último molino del tándem (Figura 10), está compuesto por un conjunto de partículas de diferentes tamaños cuyo promedio oscila alrededor de 2.5 mm. La granulometría del bagazo depende fundamentalmente del trabajo de los equipos de preparación de la caña y en menor grado del diseño de los molinos del tándem y de la variedad de la caña.



**Figura 24. Forma típica de almacenamiento de bagazo pre-secado en pacas para la industria de co-productos \*.**

**2.1.1 Composición física del bagazo.** Se ha designado como fibra a la fracción sólida orgánica insoluble en agua, presente en el tallo de la caña de azúcar caracterizada por su marcada heterogeneidad (hemicelulosa, lignina, celulosa). Desde el punto de vista químico y morfológico, esta fracción es la portadora de la característica fundamental que permite al bagazo ser utilizado como subproducto: la estructura (Figura 11)

A su vez, los sólidos no-solubles de naturaleza inorgánica participan en la composición del bagazo y su composición está influida por las características de la cosecha.

Los sólidos solubles forman la fracción que está compuesta fundamentalmente por la sacarosa, así como por otros componentes químicos como la cera, pero en menor proporción.

El agua presente en el bagazo es retenida a través de mecanismos de absorción y de capilaridad. Este fenómeno desempeña un papel de gran importancia en algunos procesos tecnológicos.

\* Fotografía de bagazo en planta de tableros aglomerados “Camilo Cienfuegos”, Habana, Cuba, tomada por Jorge Lois.

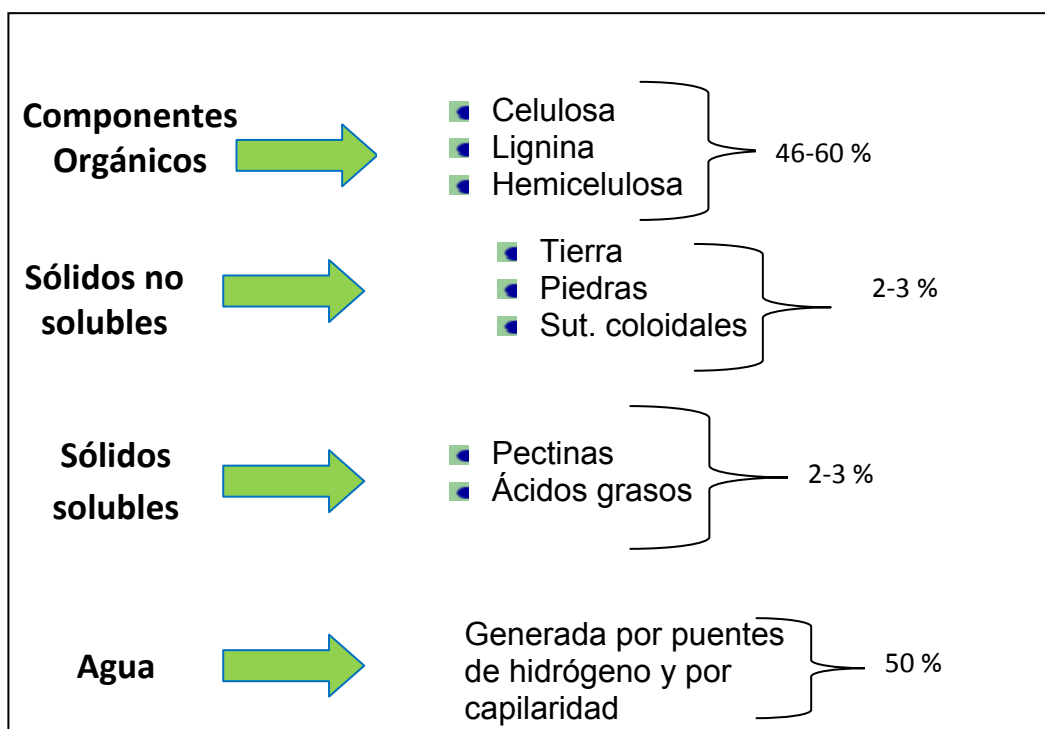


Figura 25. Composición física del bagazo (Lois, 1982).

**2.1.2 Humedad.** La humedad y la densidad son dos de las propiedades físicas más importantes y que, como tal, se encuentran íntimamente vinculada para realizar cualquier tipo de cálculo de ingeniería relacionada con los procesos de utilización industrial del bagazo. Para fines del presente proyecto son de suma importancia, ya que la humedad es uno de los factores a tener en cuenta si se quiere tener un alimento inocuo para las reses.

La humedad del bagazo está en relación directa con el alto nivel de higroscopicidad de la médula, así como de la elevada porosidad de las partículas. La información disponible indica que el contenido de humedad puede alcanzar valores hasta del 80 y 85 %, sin que haya agua sobrante <sup>15</sup>.

**2.1.3 Caracterización morfológica.** La composición morfológica del bagazo está directamente relacionada con la morfología de la caña de azúcar, donde se encuentran fibras de la corteza, haces fibro-vasculares y otras formas fibrosas que le brindan resistencia al tallo del vegetal, así como también, tejido parenquimatoso denominado popularmente como *meollo* o médula, de acuerdo

<sup>15</sup> Gastón, C.; Bambanaste, R.; Lois, J.; Alfonso, G. y Herryman, M. 1982. Subproductos de caña de azúcar .ICIDCA., Capítulo 2, Habana, Cuba.

con las diferentes referencias bibliográficas relacionadas. Las fibras del bagazo se caracterizan por su rigidez presentando una longitud menor que las usuales en especie maderables, esto es una limitante para algunos productos como los papeles de alta resistencia. La **epidermis**, capa fina que recubre el tallo y lo protege, actúa como impermeabilizante del jugo, en el que abundan componentes no fundamentales de la caña que son químicamente clasificados en el bagazo como extractivos. La **corteza**, compuesta de fibras muy lignificadas, presenta características principales como ancho de pared celular, longitud y rigidez, que protegen el tallo de los efectos mecánicos y exteriores. Estas fibras tienen como misión fundamental servir de sostén a la planta. En el área interior del tallo se encuentra el **tejido parenquimatoso**, cuya función es la de almacenar jugo azucarado. Inmerso dentro de este tejido aparecen los haces fibro-vasculares compuestos por fibras y vasos que conjugan la función de sostén con la de conducir los alimentos y productos elaborados a lo largo del tallo de la planta. Al ser molida la caña, este ordenamiento anatómico se pierde desde el punto de vista estructural y se integran las diferentes partículas. En la Figura 12, se muestra una imagen de la composición del bagazo integral donde se puede observar un poco de la heterogeneidad de esta valiosa materia prima.



Figura 26. Imagen de la composición del bagazo integral. Aumento 10 X.

Los diferentes elementos morfológicos del bagazo (base seca limpia) se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Composición morfológica del bagazo.**

<b>Elementos morfológicos</b>	<b>%</b>
Fibras largas de la corteza	50
Parénquima (médula)	30
Haces fibro-vasculares	15
Células epidérmicas	5

Al agrupar las fibras de la corteza y las fibras cortas del interior del tallo en una sola fracción denominada **fibra** o fibra útil, queda una segunda fracción formada por la **médula** y una tercera que aglutinan **finos, tierra y solubles**. A la suma de las dos últimas fracciones se le conoce como médula o meollo. El contenido de fibra de bagazo integral es alrededor del 60 % (b s) y la médula en el orden del 30 %. El 10 % restante corresponde a la tercera fracción antes señalada. Aplicando la técnica DP-1, desarrollada en el Instituto Cubano de los Derivados de la Caña de Azúcar ICIDCA a partir de una técnica TAPPI modificada, para determinar el contenido de fibra y médula del bagazo procedente de diferentes fábricas cubanas de azúcar. En el Cuadro 3 se presentan los parámetros que caracterizan la composición del bagazo a la salida del tándem azucarero <sup>16</sup>.

**Cuadro 3. Composición del bagazo a la salida del tándem.**

<b>Fracción</b>	<b>Intervalo (%)</b>
Fibra	55-60
Médula	30-35
Finos, tierra y solubles	10-15

**2.1.4 Composición química del Bagazo.** El bagazo está compuesto de celulosa, hemicelulosa y lignina, como principales polímeros naturales. Presenta además, pequeñas cantidades de otros compuestos clasificados de

---

<sup>16</sup> Ibid.

conjunto como componentes extraños<sup>17</sup>. La composición química del bagazo para las diferentes fracciones empleadas con mayor frecuencia aparece reflejada en el Cuadro 4.

**Cuadro 4. Porción de fracción química en diferentes componentes del bagazo.**

<b>Composición química</b>	<b>Bagazo Integral</b>	<b>Fracción Fibra</b>	<b>Fracción Médula</b>
Celulosa	46.6	47.7	41.2
Pentosanos	25.2	25.0	26.0
Lignina (Klason)	20.7	19.5	21.7

Estudios realizados, han permitido concluir que la composición química no se ve afectada, de manera significativa, por la variedad de caña. De igual forma sucede al comparar los componentes morfológicos del bagazo.

La **celulosa** es el principal componente de la pared celular de todas las plantas. Su forma más pura de presentarse en la naturaleza es en el algodón, aunque en otras fuentes fibrosas, como la madera, la celulosa aparece de igual forma. Su insolubilidad en agua, disolventes orgánicos y soluciones alcalinas, así como su resistencia apreciable al efecto de agentes oxidantes, diferencia la celulosa del resto de los componentes químicos de la madera. Químicamente, la celulosa se define como un homopolímero de la D-glucosa, cuyo enlace principal entre las unidades que componen la cadena es del tipo b 1-4. El peso molecular promedio de la celulosa de bagazo está en un intervalo de 150,000 a 350,000 g/mol <sup>18</sup>. Desde el punto de vista cuantitativo, su presencia en esta materia prima es semejante a las de todas las maderas, en el orden de 41 a 44%. Las hemicelulosas abarcan un conjunto de polisacáridos diferentes cuya composición tiene como características comunes: solubilidad en disolventes,

<sup>17</sup> Gálvez Taupier L. *et al.* 1986. La industria de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. Habana, Cuba. pg 125.

<sup>18</sup> Barquinero, E. (1980). "Composición físico-química y morfológica del bagazo". En: Los Derivados de la Caña de Azúcar. Ed. Científico-Técnica, La Habana. Cap. I.



reactividad frente a los ácidos y descomposición en azúcares y furfural. Estas propiedades las distinguen, analíticamente, del resto de los componentes químicos del bagazo.<sup>19</sup>

Las **hemicelulosas** que más abundan en el bagazo son del tipo D-xilanas. Las cadenas poliméricas son cortas, el peso molecular promedio se encuentra en el intervalo de 10,000 a 20,000 g/mol y la proporción es de 25 a 27 %.

La **lignina** es el tercer componente en importancia cuantitativa del bagazo entre 20 y 22 %; y representa un conjunto de polímeros amorfos, reticulares, de altos pesos moleculares y naturaleza eminentemente fenólica. El resto de los componentes del bagazo, en conjunto, aportan alrededor del 10 %. Muestran diferencias importantes con respecto a las maderas: el bajo por ciento de los componentes solubles en disolventes orgánicos, los cuales no sobrepasan el 3%, el contenido de cenizas de orden de 2 a 3 % en bagazo, que si bien es superior al de las maderas, resulta muy inferior al de las pajas que abarcan intervalos de 8 a 15 %; por último, los compuestos solubles en agua, constituidos por residuos de sacarosa, otros azúcares y polisacáridos, son relativamente altos en relación con la madera.

**2.1.5 Importancia de la fibra en los rumiantes.** La fibra se puede definir botánicamente como la fracción de tejido vegetal constituida por celulosa, hemicelulosas y lignina (Figura 13). En la alimentación de los rumiantes la fibra juega un papel de mucha importancia ya que de su correcto suministro en la dieta depende el buen estado de salud de los rumiantes, así como la prevención de distintas enfermedades como es el caso por ejemplo de la acidosis ruminal, entre otras.

---

<sup>19</sup>Alfaro, C. M.; Sánchez, N. A.; Sardiñas, J. A. "Uso de los tableros de partículas de bagazo de Caña de Azúcar en la fabricación de muebles. (1990). En : Sem. Int. Sobre Azúcar y Derivados de la Cana, II, pp. 345-349.

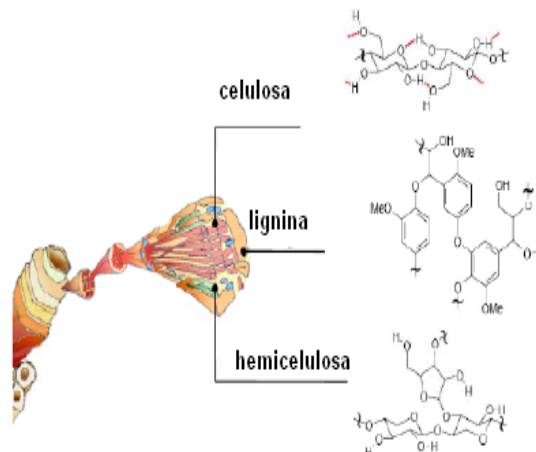


Figura 27. Estructura típica de un haz de fibras.

La **celulosa** es el homopolímero de mayor abundancia en la plantas, su estructura consiste en cadenas largas sin ramificaciones de **β-(1-4)-D-Glucosa**(Figura 14) y se distingue del almidón por tener grupos **-CH<sub>2</sub>OH** alternando por arriba y por debajo del plano de la molécula. La ausencia de cadenas laterales permite a las moléculas de celulosa acercarse unas a otras para formar estructuras rígidas de 100-1000 unidades del monosacárido D-glucosa<sup>20</sup>.

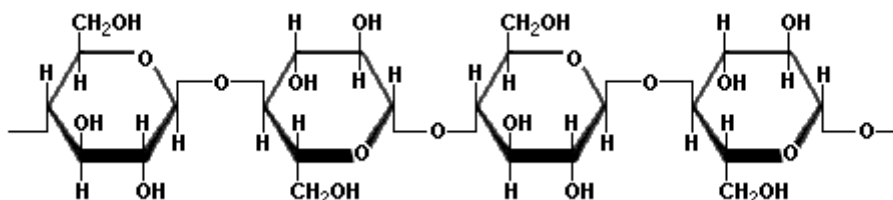
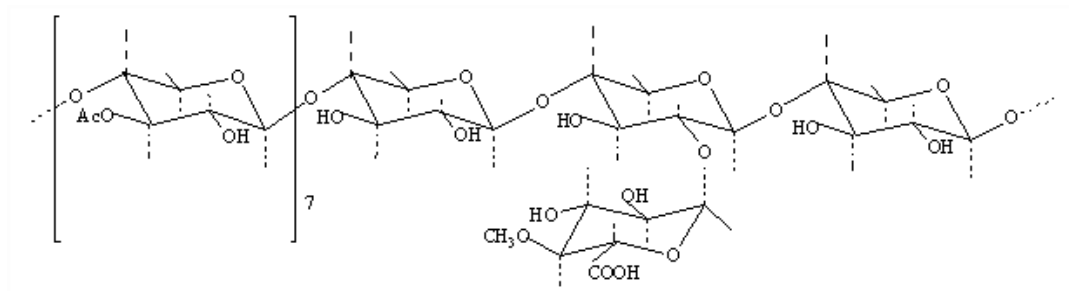


Figura 28. Estructura química de la celulosa.

Las **hemicelulosas** son polisacáridos que, excluyendo la celulosa, constituyen las paredes celulares de las plantas y se pueden extraer con soluciones alcalinas diluidas. Forman aproximadamente una tercera parte de los carbohidratos en las partes madereras de las plantas. La estructura química de las hemicelulosas consiste de cadenas largas con una gran variedad de pentosas, hexosas, y sus correspondientes ácidos urónicos. Las hemicelulosas se encuentran en frutas, tallos de plantas, y las cáscaras de granos. Aunque

<sup>20</sup> Gibbons, B.J., Roach, P.J., and Hurley, T.D., 2002. *Crystal Structure of the autocatalytic initiator of glycogen synthesis, glycogenin*. *J. Mol. Biol.***319**:463-477.

las hemicelulosas no son digeribles, pueden ser fermentadas por levaduras y bacterias presentes en el rumen de las reses. Los polisacáridos que producen pentosas al desdoblarse se llaman **pentosanos** <sup>21</sup>.



**Figura 29. Estructura de la hemicelulosa.**

La **lignina** es el polímero natural más complejo, el cual se forma a partir de tres unidades monoméricas: los alcoholes aromáticos *p*-cumanil, conifenil y sinapil<sup>22</sup>. Su estructura química se muestra en la Figura 16.

Estos monómeros están unidos entre sí por fuertes enlaces covalentes entre carbono y carbono y entre carbono-oxígeno-carbono, llamado este último enlace éter. En la Figura 17 se pueden distinguir claramente diferentes tipos de enlaces intermonoméricos.

\*Enlace éster (entre unidades 1-2,2-6,3-4,3-6,6-7,7-8,9-10,11-13 y 14-15).

\*Enlace Carbono-carbono entre las unidades 4-5, 8-9, y 14-16.

<sup>21</sup> Fengel, D., Wegener, G: 1984. Wood Chemistry, Ultrastructure Reaction, Walter de Grayter, Berlin, pp. 2, 25-35, 184-20, 217-220.

<sup>22</sup>Sosa de Pro, E. 1979. "Manual de Procedimientos Analíticos para alimento de consumo animal". Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chapingo, .México, p.88.

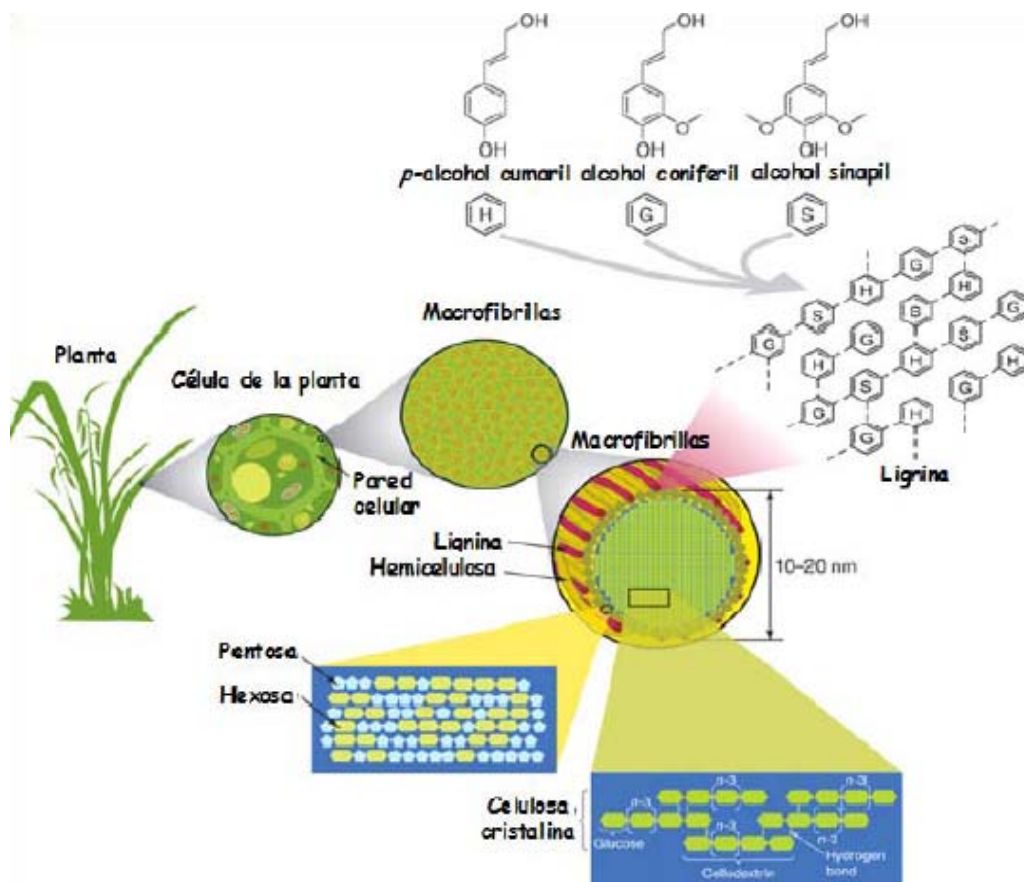


Figura 30. Estructura de la biomasa ligno-celulósica (Rubins, 2008)

Otros polímeros naturales como las proteínas y los carbohidratos contienen uniones que se repiten en toda la molécula, como el enlace peptídico en las proteínas y el glucosídico en los carbohidratos. Estos enlaces pueden ser rotos por enzimas específicas o por compuestos químicos, para dejar libres los monómeros. En la lignina, como ya se mencionó, existen diferentes tipos de enlaces inter-monoméricos y por tanto, no es posible hidrolizarla con la relativa facilidad con que se hidrolizan los carbohidratos y las proteínas.

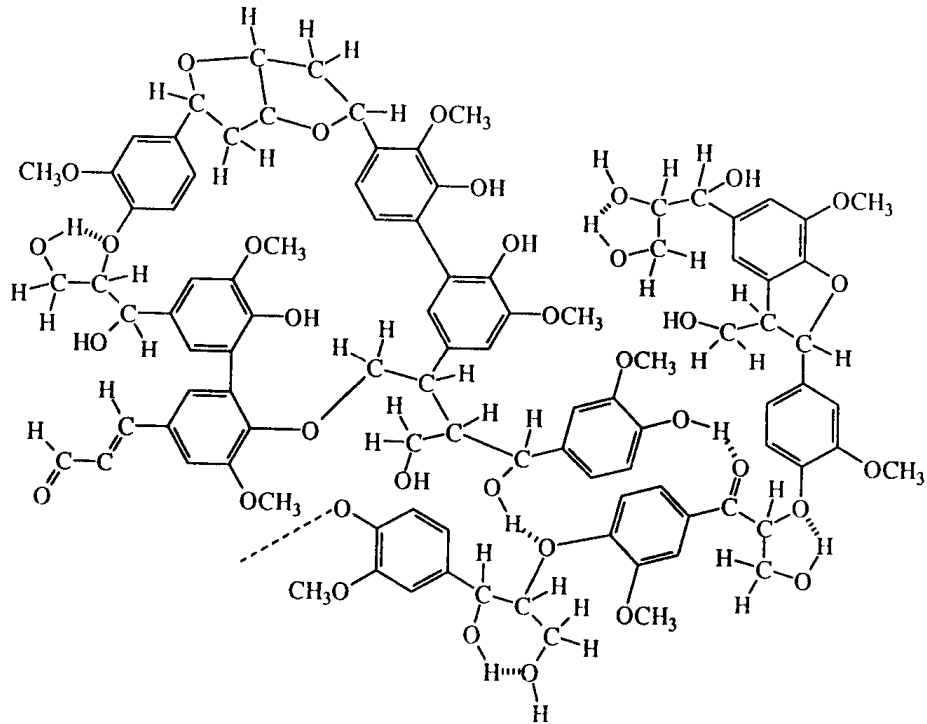


Figura 31. Estructura de la lignina.

La lignina es una sustancia amorfa cuya composición elemental y estructural es muy variable, se ha encontrado que la proporción de los diferentes alcoholes varía con el tipo de planta; así, en las gramíneas, la lignina está formada en mayor proporción de alcohol p-cumaril y en menor proporción de los alcoholes restantes. Los grupos funcionales que aparecen en la lignina son los siguientes: metoxilos (-OCH<sub>3</sub>), hidroxilos (-OH), éter (-O-) y éster (O=C-O-).

**2.1.5.1 Relación lignina-carbohidratos.** La lignina reacciona con los polisacáridos de la planta dando como resultado un complejo lignina-carbohidrato. El carbohidrato que se ve comprometido es este complejo no es atacado por las enzimas de los microorganismos del rumen y se transforma en indigestible. Es por esto la necesidad de un tratamiento físico o químico para romper este fuerte complejo.

Dada a la formación de este complejo es pertinente mencionar el efecto que tiene la lignina en el aprovechamiento del alimento, ya sea forraje o suplemento alimenticio. En este sentido, se puede mencionar que no existe ninguna especie de mamífero capaz de degradar la lignina. Tampoco, los

microorganismos del rumen producen enzimas que lo degraden. Se ha encontrado que a medida que aumenta el contenido de lignina, disminuye la digestibilidad del forraje debido a la formación del complejo indigestible lignina-carbohidrato, ya que físicamente impide la acción de las enzimas glucosidasas puesto que se incrusta en la celulosa<sup>23</sup>.

La lignina ayuda a unir la matriz de celulosa-hemicelulosa dándole una mayor flexibilidad. La estructura molecular de los polímeros de lignina es aleatoria y desorganizada y consiste principalmente en estructuras de anillos de carbono (anillos de benceno con grupos metoxílicos, hidroxílicos y propílicos) interconectados por polisacáridos.

Se cree que la resistencia de la biomasa ligno-celulósica está determinada por:

- (i) los complicados enlaces entre varios polisacáridos principales — celulosa, hemicelulosa y lignina— que limitan el proceso de hidrólisis que realizan las celulasas, hemicelulasas y lacasas; y
- (ii) las propiedades inherentes de accesibilidad del sustrato de bajo material celulósico a las celulasas, alto grado de polimerización y escasa solubilidad de los fragmentos de celulosa en el agua<sup>24</sup>. La matriz lignina-hemicelulosa recubre la celulosa y evita el acceso de las enzimas de celulasa a la fase de la celulosa. La celulosa y la hemicelulosa de la biomasa ligno-celulósica nativa son sólo ligeramente digeribles por las enzimas de celulasa y hemicelulasa.

**2.1.6 Co-productos del bagazo de la caña de azúcar.** El bagazo representa una significativa fuente de materia prima para el desarrollo de una variada gama de co-productos, algunos de ellos de alto valor agregado. En la Figura 18 se exponen algunos de los co-productos de esa extensa gama.

---

<sup>23</sup> Ibid., pp. 89-91.

<sup>24</sup>Zhang Y-HP, Lynd LR. 2004. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Non-complexed cellulase systems. *Biotechnology and Bioengineering* 88: 797-824.

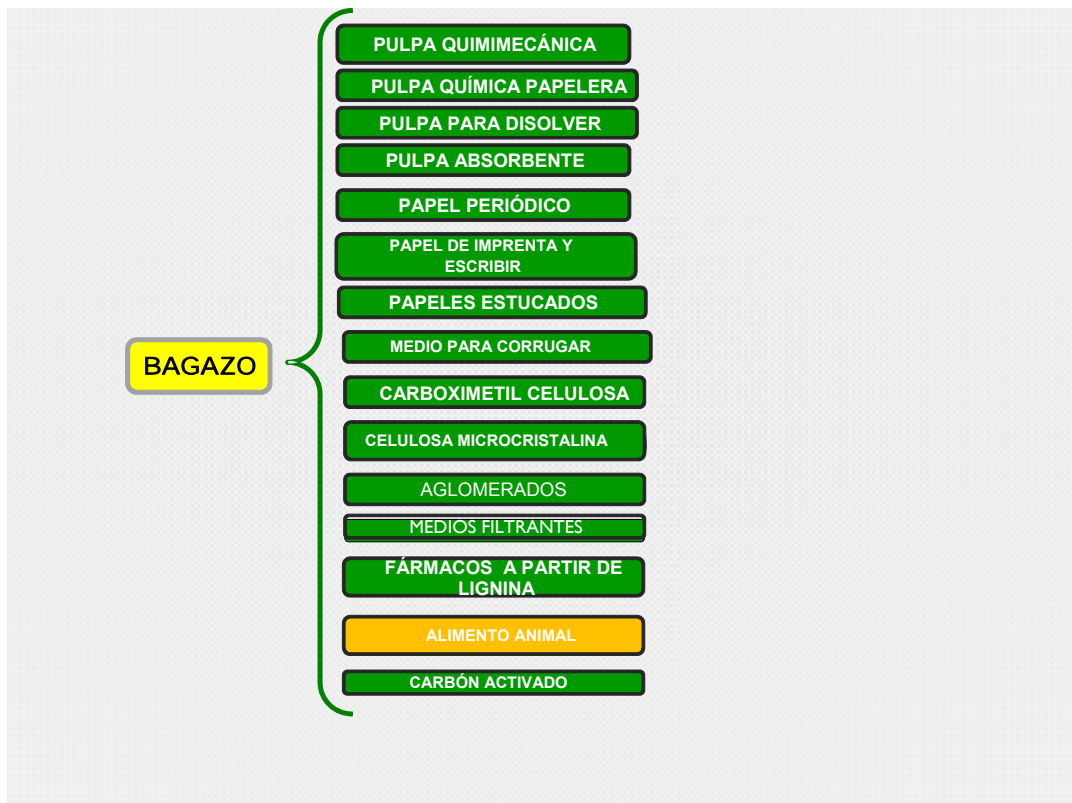


Figura 32. Algunos co-productos a partir del bagazo de la caña de azúcar.

**2.1.6.1 Bagacillo o médula.** El bagacillo de la caña de azúcar es un material ligno-celulósico, componente del bagazo obtenido en las centrales azucareras como subproducto, representando entre el 25% y el 30% del total de la caña de azúcar procesada.

Se han desarrollado variados tratamientos para propiciar una mayor susceptibilidad de los materiales ligno-celulósicos a la sacarificación, que incluyen tratamientos físicos, químicos y enzimáticos. Como tratamiento físico, la molienda disminuye el índice de cristalinidad y el grado de polimerización de la celulosa, aunque permite aumentar la superficie de contacto con reactivos y enzimas.

Respecto a los tratamientos químicos, vale señalar que en este tipo de materiales, se ha logrado modificar la estructura cristalina y la lignina utilizando una combinación de solventes *cadoxen* (cadmio-etilen-diamina y ácido

sulfúrico), permitiendo así obtener la celulosa precipitada de fácil uso para hidrólisis ácida o enzimática, con alta producción de glucosa <sup>25</sup>.

## **2.2 BAGAZO PARA LA ALIMENTACIÓN ANIMAL**

El bagacillo pre-digerido surgió como alternativa de alimento entre 1974-77 (Martín, Cabello y Elías, 94; Martín, 1976 y Martín, Cabello y Elías, 1977) después de un gran número de investigaciones desarrolladas en Cuba, de forma conjunta por el ICA (Instituto de Ciencia Animal) y el ICIDCA, encaminados a elevar la digestibilidad del bagacillo y con ello lograr una mezcla de bagacillo+miel+urea, donde este último componente participa en una menor porción. Después del primer año de operación de la primera planta, se puso en práctica un programa inversionista con la puesta en marcha de muchas más, llegando hasta 94 unidades a lo largo de todo el país.

En México lamentablemente la industria azucarera no ha tenido una gran diversificación en co-productos, y si bien la industria ha tenido crecimientos importantes han sido en la producción de azúcar en sus diferentes tipos así como en la mejora y modernización de las prácticas, ya que se ha llevado la industria desde pequeñas remolachas donde se utilizaban a mulas de carga para mover los molinos, hasta Ingenios azucareros con los que se cuenta en el país. En lo referente a la alimentación de animales la ganadería se ha limitado a la utilización de los subproductos de la industria azucarera como lo son la melaza, la caña picada y en muy contados casos bagazo fresco.

## **2.3 FISIOLÓGÍA DIGESTIVA DEL GANADO VACUNO.**

El ganado bovino pertenece a un grupo de animales conocidos como rumiantes, los cuales se diferencian de los herbívoros por desarrollar un proceso llamado rumia, además de la masticación y la deglución.

La duración de la masticación del alimento está en función del contenido de fibra del mismo; terminado este proceso, y cuando el animal se encuentra

---

<sup>25</sup> Zhang, Y., H, Fraccionamiento de lignocelulosa a base de disolvente de celulosa con condiciones de reacción moderadas y ciclación de reactivos. USPatent N° 4.281.063.



tranquilo, a los 10-15 min después de finalizar la ingestión del alimento comienza el proceso de la rumia, que consiste en una remasticación intensa (denominada merisítica) y posterior deglución del alimento remasticado <sup>26</sup>.

A continuación, se expone una descripción del aparato digestivo de los rumiantes:

► **Boca:** es el “vestíbulo” del aparato digestivo. Es una cavidad comprendida entre los huesos maxilares y palatinos, alargados según el eje de la cabeza, y con dos aberturas, una anterior y otra posterior.

► **Esófago:** largo tubo músculo-membranoso, colocado entre la faringe y el estómago, el cual es el encargado de conducir los alimentos durante la deglución. Sale de la parte inferior de la faringe y se dirige de arriba abajo y de adelante hacia atrás, detrás de la laringe y de la tráquea en el borde inferior del cuello, cuya dirección sigue.

► **Estómago:** es de gran tamaño y está dividido en varios compartimientos distintos. Su capacidad varía ampliamente con la edad y tamaño del animal. Consta de cuatro compartimentos o divisiones, llamadas rúmen, retículo, omaso y abomaso. El rúmen se considera el primer estómago; el retículo, el segundo y así sucesivamente. El rumen, retículo y omaso pueden representar regiones que perdieron sus glándulas gástricas al mismo tiempo que sufrieron extensas modificaciones filogenéticas en tamaño y forma. En el caso del ganado vacuno, el estómago del animal adulto alcanza una capacidad total de 120 a 200 litros <sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Caravaca Rodríguez, F.P. 2003. Bases de la producción animal. Universidad de Sevilla. pp. 272 -273.

<sup>27</sup> R. A. Ovelar C. Sistema digestivo de rumiantes y aves.  
<http://www.monografias.com/trabajos81/sistema-digestivo-rumiantes-y-aves/>

► **Rumen:** conocido vulgarmente como panza o herbario, es un órgano musculoso, rugoso y ovoide que se extiende desde el diafragma a la pelvis llenando casi por completo el lado izquierdo de la cavidad abdominal (100 litros de capacidad media en la vaca). Se divide en cuatro sacos por invaginaciones musculares de las paredes, llamados pilares. Son los llamados saco dorsal y ventral. Su mucosa posee numerosas papilas compuestas de células epiteliales escamosas estratificadas que sufren una profunda descamación, las cuales aumentan considerablemente la superficie de absorción por parte del rumen. El número y tamaño de las papilas depende del tipo del alimento ingerido. Así, las papilas son pequeñas y poco numerosas en animales con alimentación láctea, aumentando en número y tamaño cuando además se les suministra forraje. La cavidad ruminoreticular sirve de hábitat a una vasta población microbiana. Es así como este órgano hace las veces de una verdadera cámara de fermentación microbiana, donde los nutrientes sufren su primer proceso degradativo.

El retículo, conocido vulgarmente como bonete o redecilla, forma en gran medida una unidad estructural y digestiva con el rumen, ocupando la posición más craneal del estómago. Su mucosa está dispuesta en celdillas más o menos hexagonales, cubiertas de numerosas papilas cónicas. Comunica con el rumen a través del atrio vestibular y con el omaso por el orificio retículo-omasal. En el retículo destaca la llamada gotera o surco esofágico, disposición especial formada a partir de la desembocadura esofágica que está constituida por un surco alargado, limitado por dos labios, cuya función es decisiva en el transporte de líquidos, especialmente leche en el lactante.

► **El omaso:** vulgarmente conocido como libro o librito, es una cámara pequeña, redondeada y tiene una capacidad de aproximadamente 10 kg, cuya mucosa presenta numerosos pliegues, colocados a maneras de hojas de un libro, que están cubiertas de papilas córneas, cortas, que sugiere una especie de molturación, que van desde el techo y las paredes laterales hacia el suelo. Posee dos orificios, el retículo omasal antes citado y el omaso-abomasal que, como su nombre indica, comunica el omaso con el abomaso. Ambos dada su

disposición sobre la curvatura menor de la cavidad, están muy cerca uno de otro <sup>28</sup>.

Durante el paso de la ingesta por el omaso los procesos de fermentación microbiana no se detienen. La función principal de este órgano es, sin embargo, la absorción de agua, sales minerales y ácidos grasos contenidos en la ingesta.

► **El abomaso:** estómago glandular propiamente dicho, donde se inicia la digestión de los alimentos sobre la base de las enzimas digestivas del animal. La mucosa interna presenta dos zonas, una parte interna o fúndica que rodea el orificio omaso-abomasal y la zona pilórica que rodea el píloro que es estrecha y tubular. La zona fúndica presenta varios pliegues no modificables que conducen espiralmente el alimento en dirección al píloro, los cuales desaparecen en el límite de esta zona con la pilórica. Los vacunos adultos segregan alrededor de 30 litros diarios de jugo gástrico. Esta secreción contiene diversas enzimas digestivas, entre otras, pepsina y lipasas, así como también considerables cantidades de ácido clorhídrico.

► **Intestino delgado:** es la parte más estrecha y delgada del intestino, su calibre es uniforme y su longitud variable, pero siempre es de muchos metros. Es cilíndrico, arrollado en espiral, y presenta dos curvaturas llamadas gran y pequeña curvatura, esta es la que sirve para la inserción del mesenterio. Presenta tres partes o porciones iguales: duodeno, yeyuno e ileon, la cual se comunica con el ciego.

► **Duodeno:** es la primera porción de intestino delgado y es donde se vierten las secreciones digestivas biliares y pancreáticas, las que, en unión con los jugos gástrico e intestinal, desdoblan los nutrientes de la ingesta en sus formas absorbibles.

En la digestión a cargo de las enzimas digestivas, juegan un papel importante las condiciones de pH imperantes en el intestino. En el caso del rumiante, la

---

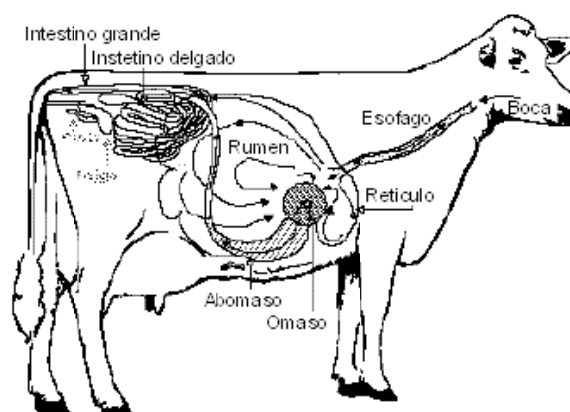
<sup>28</sup> Ibid

neutralización es más lenta, debido probablemente a las grandes cantidades de ácido clorhídrico secretadas con el jugo gástrico, como también a la menor alcalinidad y menor contenido de bicarbonato de las secreciones digestivas biliares y pancreáticas. En la unión del intestino delgado con el intestino grueso se localiza el ciego, el cual es un saco lateral de unos 10 litros de volumen. Este compartimiento está conectado al conducto digestivo por una sola abertura. Tanto las condiciones de pH como de anaerobiosis en esta cavidad, dan lugar a un nuevo proceso de fermentación microbiana de aquellos nutrientes que hasta aquí no han sido digeridos o absorbidos por el animal. Sin embargo, dicha fermentación no es de fundamental importancia para el rumiante, tanto por su escaso volumen como por el bajo índice de absorción que en el intestino grueso tienen a los compuestos resultantes de este proceso.

► **Intestino grueso:** sigue al intestino delgado, del cual se distinguen fácilmente por su calibre, que es muchas veces mayor, y por una serie de estrangulaciones y dilataciones o bombeamientos, que le dan un aspecto especial. Comienza en una dilatación o reservorio muy vasto, llamado ciego, el cual continúa con la parte llamada colon, que consta de dos secciones: el colon replegado y el colon flotante, terminando con el recto. La principal función del intestino grueso, es la absorción de agua. Es así como el total de materia seca del contenido intestinal aumenta desde 7% en el sector próximo del intestino grueso hasta un 15 a 18% en las heces.

► **Recto:** es la parte del intestino que se encuentra en el bacinete pélvico. Es la continuación del colon flotante. Se le da el nombre de recto, por su disposición en dirección recta, de adelante hacia atrás. Se termina en el ano que es abertura posterior del tubo digestivo, que lo hace comunicar con el exterior. El recto sirve como una bolsa de depósito, donde se almacenan excrementos en el intervalo de las defecaciones. Su estructura es una capa carnosa, gruesa, que es de color rosado, presenta numerosos pliegues longitudinales y transversales. Carece de capa serosa, salvo en la parte anterior a la entrada del bacinete.

► **Ano:** es la abertura posterior del tubo digestivo. Está situado debajo de la cola <sup>29</sup>. En su contorno se parece a la abertura de una bolsa que se cierra por medio de un nudo corredizo, formando un rodete, tanto más saliente mientras el animal es más joven y vigoroso. Su estructura es mucosa en su cara interna, que es de transición entre la piel y la mucosa verdadera, después musculosa, en forma de rodete carnoso, rojizo, llamado esfínter del ano: es la capa que mantiene cerrado el ano en los intervalos de las defecaciones, y exteriormente una capa de piel fina sin pelos y suave, por la gran cantidad de glándulas sebáceas que contiene.



**2.4 Nutrición animal.** En el manejo de la producción animal, es imprescindible conocer la capacidad que tiene un alimento para proveer el aporte de energía y de los nutrientes que se necesitan para lograr el objetivo de producción; de allí la importancia de tener un estudio de aquellos componentes específicos como son: Materia Seca, Proteína Cruda, Fibra, Lignina, etc. y de la digestión de los alimentos.

Según el Grupo de Producción Animal, Inter GOT-EEA INTA *Bordenave*<sup>30</sup>; existen cuatro factores que se tienen que tener presentes para trabajar con forrajes verdes en la alimentación animal:

► **Materia Seca:** el agua es uno de los principales componentes de un forraje verde o silo, no tiene valor energético o es negativo. En consecuencia,

<sup>29</sup> Ibid.

<sup>30</sup> Grupo de Producción Animal, Inter GOT-EEA INTA. 1999. Forrajes verdes y suplementos: su valor nutritivo; *Bordenave*. Desafío 21, 4(12): pp.18-22.

podemos considerar que la primera evaluación de un alimento se hace al determinar la concentración de su materia seca.

► **Fracción digestible:** una descripción simple de la disponibilidad de los nutrientes de un forraje divide la materia seca en la fracción digestible y la no digestible. La fracción digestible está compuesta por una porción soluble y rápidamente digerible (contenido celular), que es digerida por las enzimas secretadas en el tracto digestivo de todos los animales y por una porción insoluble y parcialmente disponible. Esta fracción digestible - insoluble contiene sustancias que son digeridas sólo por los microorganismos del rumen y forman parte de la pared celular.

► **La fracción indigestible:** también forma parte de la pared celular y está representada por el contenido de lignina, sílice y otros minerales. Como el agua no tiene valor energético, y sí posee un valor metabólico negativo, el animal consume energía para propulsar los componentes no digeribles a través del tracto digestivo.

► **Proteína bruta:** se calcula en base al contenido total de nitrógeno, que incluye además del nitrógeno de la Proteína Verdadera, al nitrógeno de los componentes no proteicos (NNP).

Se debe considerar que hay una parte de la proteína total ingerida por el animal, que no se degrada en el rumen (PND) y da origen a los aminoácidos del alimento. La otra parte (PDR), que sí es atacada por los microorganismos del rumen, es transformada para formar parte de sus propias células en forma de proteína o aminoácidos microbianos. Esta última fracción (PDR) influye sobre el consumo de forraje y su digestibilidad está estrechamente relacionada con la nutrición energética del animal <sup>31</sup>.

En resumen, se puede aseverar que para que una alimentación sea eficiente para el ganado, se debe considerar en forma conjunta las características proteicas y energéticas de la nutrición animal. Los requerimientos de minerales

---

<sup>31</sup> Ibid.pg.22

y vitaminas, se muestran cualitativamente de forma resumida en el Cuadro 5, ya que de acuerdo a la etapa fisiológica del ganado así serán sus requerimientos de minerales y vitaminas, mismos que son absorbidos de los pastos, leguminosas, gramíneas y suplementos alimenticios que consume el ganado.

Debido a la problemática de alimentación que enfrenta el sector agropecuario mexicano en época de sequía y a la oportunidad de diversificación que ofrece la industria azucarera a partir de sus subproductos, el presente trabajo se basó en la formulación de harinas forrajeras pre-digeridas y enriquecidas proteicamente a partir del bagazo de la caña de azúcar, para ganado bovino en etapa de finalización.

**Cuadro 5. Principales vitaminas y minerales para ganado bovino.**

	<b>Elementos</b>	<b>Intervienen en...</b>	<b>Se encuentran en...</b>
<b>MINERALES</b>	Calcio Fósforo Magnesio	Composición de los huesos	Pasto verde, sobre todo en leguminosas
	Cloro Potasio Sodio	Flujo sanguíneo	Pasto verde y sal común (es necesaria)
	Azufre  Oligoelementos: Fierro, cobre, cobalto, magnesio y yodo	Composición de los músculos  Composición de los glóbulos rojos, formación de los huesos y hormonas naturales	Pasto de leguminosas  Pasto
<b>VITAMINAS</b>	Vitamina A	La vista del animal	Pasto verde
	Vitamina D	Formación y mantenimiento de los huesos	Pasto verde
	Vitamina E	Funcionamiento del organismo del animal	Pasto verde La vitamina E se destruye cuando se seca la pradera.

(Fuente: Alimentación de ganado de doble propósito. Manual para el manejo de bovinos. Secretaría de la Reforma Agraria)

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para fines del presente proyecto se asumió como materia prima principal el bagazo de caña de azúcar. El bagazo, como ya se mencionó, se obtiene como subproducto en el ingenio azucarero al ser procesada la caña, para la producción de azúcar.

Previo a su utilización, el bagazo fue sometido a un proceso de cribado con la finalidad de obtener un tamaño homogéneo del material y darle un tratamiento físico que mejorara su digestibilidad. Posteriormente, se aplicó un tratamiento de pre-digestión con un método alcalino y para finalizar el proceso se aplicó una suplementación proteica. Se realizaron distintas formulaciones exploratorias para, a partir de ellas, seleccionar la variante óptima idónea.

A continuación se presenta un diagrama de bloques donde se muestran las diferentes fases y puntos de control realizados en la metodología experimental.

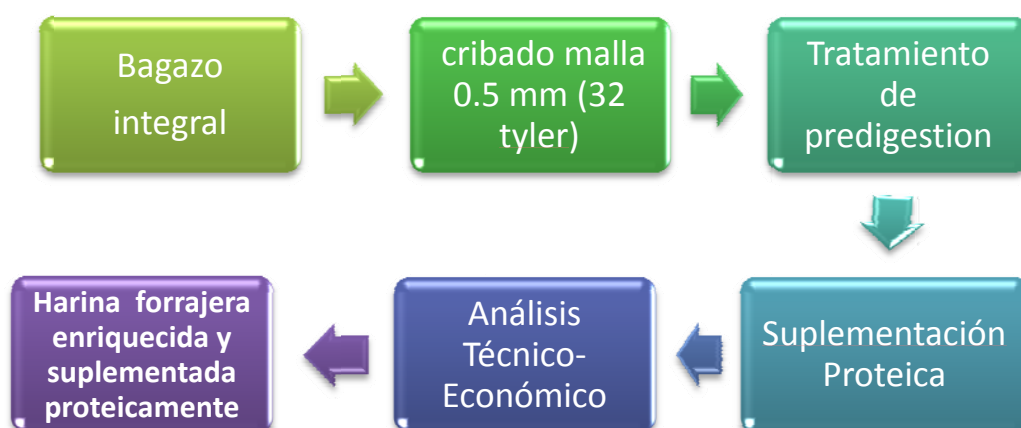


Figura 20. Fases de la metodología experimental utilizada.

#### 3.1 CRIBADO DEL BAGAZO

Debido a la composición heterogénea del bagazo, se realizó su cribado, dirigido a disponer de un material granulométricamente homogéneo; en este sentido, se optó por cribar el bagazo en malla de 0.5 mm de luz equivalente a un tamiz 32 *Tyler*. Algo relevante a mencionar en este sentido es la relación entre el tamaño de partículas y la digestibilidad del alimento; como ejemplo, se puede citar lo que ocurre con las harinas de subproductos avícolas o cárnicos mal molidos en los que se ha podido determinar una disminución en la digestibilidad del alimento. Ya que este factor usualmente, no se toma en cuenta en las plantas de procesamiento, se recomienda partículas menores a



250 micras, la *American Feed Control Officials* recomienda 100 % de paso en criba No. 7(USA) y 95% de paso en criba(USA) No. 10 <sup>32</sup>, como factores a tener en cuenta en la selección de molinos y cribas.

En este contexto, se puede justificar el cribado del bagazo no solo para obtener un material homogéneo en el cual soportar el alimento final, sino también como una forma indirecta al pre-tratamiento químico para aumentar la digestibilidad de las fibras.

El cribado se realizó en mallas de 0.5 mm de luz y el material retenido en malla se recolecta en un contenedor para su posterior utilización como base del alimento y aplicarle un tratamiento de pre digestión.

### **3.2 PRE-TRATAMIENTO ALCALINO**

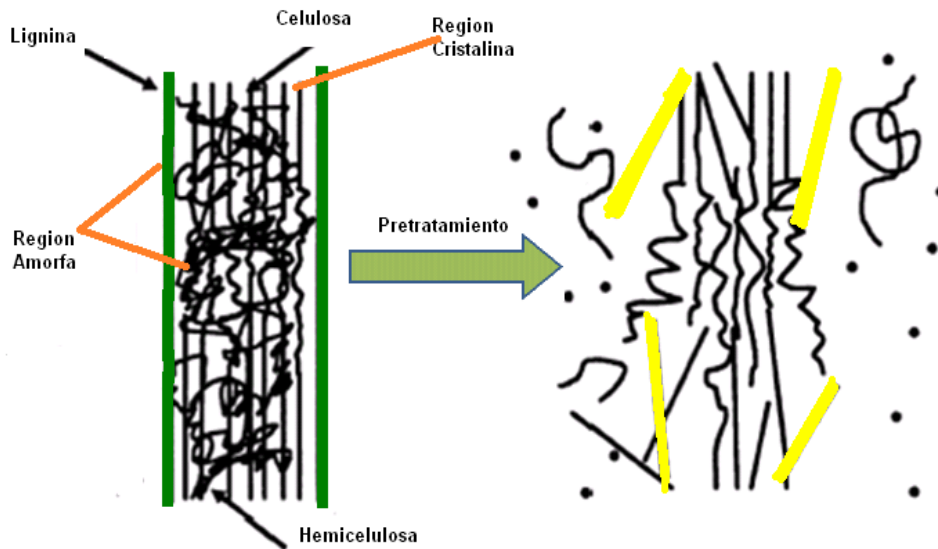
Se utilizó bagazo de caña de azúcar como materia prima, proveniente del ingenio azucarero “FAGSA”, ubicado en el Municipio de Pánuco, Veracruz. Para el tratamiento alcalino se utilizó hidróxido de sodio ACS de la marca *Fermont* con número CAS 1310-73-2 en su presentación de lentejas.

El pre-tratamiento alcalino se realizó con la finalidad de aumentar la digestibilidad del bagazo mediante la aplicación de una solución de hidróxido de sodio 2 molar, por el método de aspersion, durante un tiempo de retención de 10 minutos. Para neutralizar la reacción y enriquecer proteicamente al bagazo, se aplicó una solución de miel-urea.

Como se puede observar esquemáticamente de la ilustración reflejada en la Figura 21, lo que se busca es romper los enlaces de la lignina exponiendo de esta forma a la hemicelulosa y celulosa a la acción de las bacterias en el rumen.

---

<sup>32</sup> <http://www.engormix.com/MA-balanceados/fabricacion/articulos/plantas-de-rendering-t3272/801-p0.htm>>



**Figura 21. Representación esquemática del pre-tratamiento alcalino.**

La aspersión se realizó en una mezcladora para alimentos ubicada en el INIFAP, en el campo experimental ubicado en el municipio Cuauhtémoc, Altamira. Inicialmente se realizaba con aspersores manuales y se mezclaba de esta misma forma. Pero, debido a la cantidad de producto a tratar y con la idea de realizar los experimentos a escala piloto, se optó por realizarlo en la forma descrita. La solución de hidróxido de sodio se aplicó por medio de aspersión tal y como se aprecia en la Figura 22 manteniéndose la mezcladora en continuo movimiento como forma de asegurar una impregnación del bagazo lo más completa posible.



**Figura 22. Aplicación por aspersión del Hidróxido de sodio.**

Pasados los 10 min se aplicó una solución de miel+urea para neutralizar la reacción y enriquecer paralelamente al bagazo, ya que la urea es una fuente de proteínas de bajo costo y alta eficiencia y la melaza es una fuente de energía metabolizable necesaria en la dieta de los rumiantes en etapa de finalización en el orden de  $2.2 \text{ Mcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

A continuación, se muestra un diagrama del pre-tratamiento alcalino realizado.

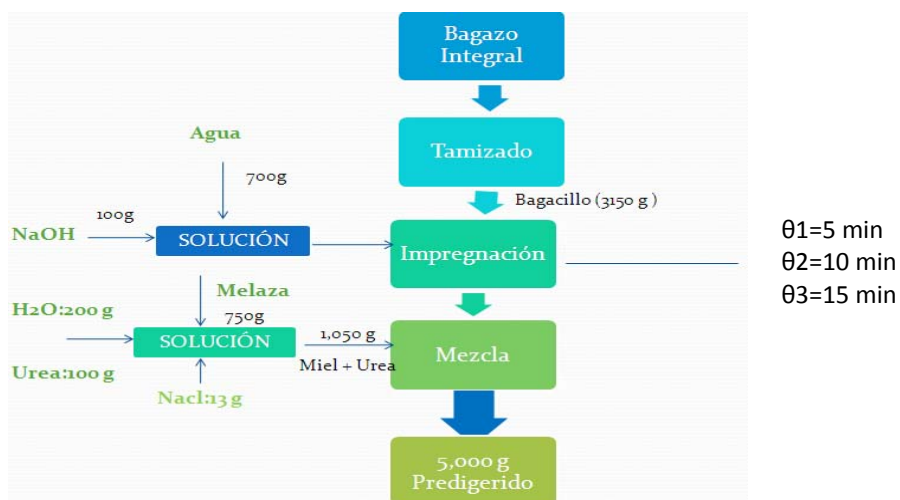


Figura 23. Diagrama secuencial del pre-tratamiento alcalino.

### 3.3 ENRIQUECIMIENTO PROTEICO

#### 3.3.1 Experiencias con formulaciones

**3.3.1.1 Formulación Experimental BP1.** A manera de pruebas experimentales se realizaron distintas formulaciones exploratorias, la primera de ellas fue la codificada con la clave BP1, misma que consistió en un alimento formulado con bagazo secado previamente al sol, con la finalidad de disminuir la humedad y evitar la formación de microorganismos patógenos susceptibles de formarse al comenzar la fermentación de los azúcares residuales contenidos en el bagazo y la ulterior degradación de dichos azúcares.

El secado se realizó en lonas plásticas cubiertas con una malla para evitar posibles pérdidas del material fino.



**Figura 24. Secado natural del bagazo.**

El bagazo seco se sometió a un proceso de cribado bajo las condiciones antes mencionadas; posteriormente, se aplicó el tratamiento alcalino con una solución de NaOH a concentración 2.0 Normal y, para finalizar, se suplementó proteicamente con cereales disponibles en abundancia en la región, se determinó la utilización de dichos cereales en base a su abundante existencia en el estado de Tamaulipas, así como sus bondades energéticas y proteicas.

En el Cuadro 6, se pueden observar los insumos utilizados y su porcentaje de utilización. Las muestras correspondientes de la formulación **BP1** (Figura 25) se enviaron a estudios de proteína cruda al Laboratorio Multidisciplinario “UNE Lab” donde se obtuvo un notable aumento en el contenido de proteínas en comparación al contenido del bagazo integral, la formulación contiene 12.43 % de Proteína Cruda (PC).

**Cuadro 6. Insumos utilizados en la formulación experimental BP 1**

Insumo	\$/ton.(MN)	Utilizando para la mezcla (%)	g que se utilizarían base =1,000 g	Proteínas
*Bagazo integral predigerido		60	600	Despreciable
*Maíz amarillo	2,327	27.95	279.5	10
*Sorgo en granos	2,700	10.75	107.5	8.2
*Sal común	1,050	1.30	13	NA

De forma preliminar, se realizó un estimado de los costos de producción de la formulación mismos que se presentan en el Cuadro 7 y comparando con un

alimento comercial de la marca *Purina*. De este análisis se puede prever que la formulación es económicamente atractiva, además de estar a la par nutricionalmente con la media del mercado.

**Cuadro 7. Costos comparativos preliminares de la muestra experimental  
Exploratoria BP 1.**

ALIMENTO	COSTO (\$M.N./ton.)	COSTO POR ALIMENTACION EN 100 DÍAS (\$M.N.)
BP1	1,215.60	3,04
ALIMENTO “PURINA”	4,370.00	6,00



**Figura 25. Muestra experimental exploratoria BP 1.**

**3.3.1.2 Formulación experimental BP 2.** En esta formulación, se suplementó proteicamente con un arbusto forrajero de altos niveles de aportación de proteína llamado comúnmente *guácima*, cuyo nombre científico es *Guazuma umnifolia*. Se trata de un árbol de hasta 20 m de altura, corteza gris, tronco de 30 a 60 cm de diámetro. Hojas alternas, con peciolos cortos, aovados u oblongos, aserradas, de 6 a 12 cm de largo y con el ápice agudo. Flores pequeñas agrupadas en inflorescencias axilares; cinco pétalos, blanco-amarillentos. Fruto capsular, subgloboso o elipsoideo, negro-purpúreo al madurar y con la superficie muricada. Nativo de América, sus usos más conocidos, referenciados en un estudio realizado por el colegio de post graduados de Veracruz son en orden de importancia: forraje, leña, medicinal,

madera y sombra <sup>33</sup>. Sin embargo, en muchas localidades del norte de Veracruz y gracias a diversas instituciones que han difundido el uso de este arbusto forrajero, su utilización es notable. Al respecto, es oportuno señalar que las hojas tienen un contenido impresionante de nutrientes. Haciendo los cálculos en base al peso seco, una muestra procedente de la América Central llegó a contener 17 % de proteína, 26 % de fibra y 9 % de cenizas <sup>34</sup>. El follaje de la guácima es consumido de forma agradable por reses, caballos, pecaríes de collar y los tapires <sup>35</sup>. Durante los períodos de sequía, los animales consumen incluso las hojas caídas, esto debido a su agradable palatabilidad y alto contenido de nutrientes.

Las hojas de la guácima contienen cafeína pero no contienen alcaloides, saponinas, esteroides, terpenoides, flavonoides, quinonas o taninos <sup>36</sup>. En el Cuadro 8, se muestran los insumos utilizados para la suplementación de la formulación BP 2.

**Cuadro 8. Insumos utilizados en la suplementación.**

Insumo	\$/ton.(MN)	Utilizando para la mezcla (%)	g que se utilizarían base =1,000 g	Proteínas (%)
*Bagazo integral predigerido	NA	60	600	Despreciable
*Maíz amarillo	2,327	16.58	165.8	10
* <i>Guazuma ulmifolia</i>		22.11	221.1	20
*Sal común	1,050.00	1.30	13	NA

<sup>33</sup>Herrera, et al. 2009. Colegio de Post-graduados Campus Veracruz. Utilización del guácimo (*Guazuma ulmifolia lam.*) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano, p 5.

<sup>34</sup>Janzen, D.H. 1983. *Guazuma ulmifolia* (guácimo, guácima, caulote, tapaculo). En: Janzen, D.H., ed. Costa Rican natural history. Chicago, IL: University of Chicago Press: 246-248.

<sup>35</sup>Salazar, Rodolfo; Quesada, Mariano. 1987. *Provenance variation in Guazuma ulmifolia L. in Costa Rica. Commonwealth Forestry Review.* 66(4):317-324.

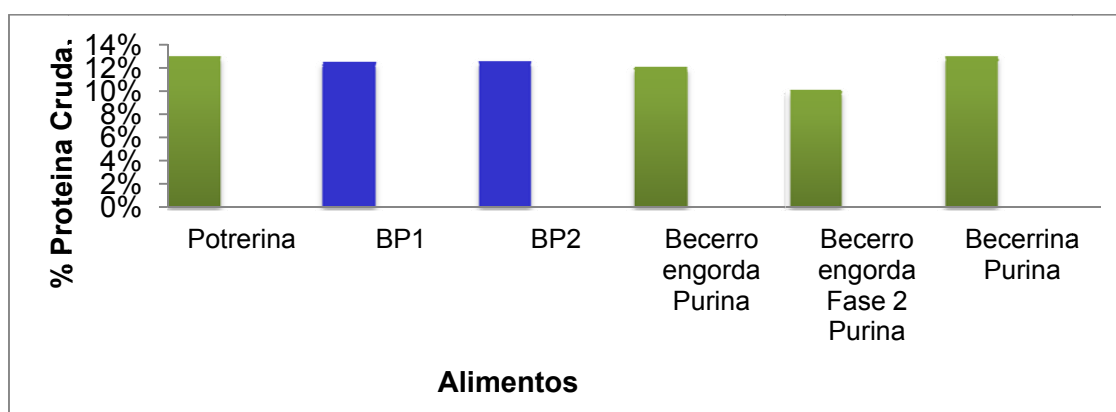
<sup>36</sup>Susano Hernández, Roberto. 1981. Especies arbóreas forestales susceptibles de aprovecharse como forraje. *Ciencia Forestal.* 6(29): 31-39.

En esta formulación se obtuvo 12.56 % de proteína cruda, observándose un incremento en el orden de décimas en comparación con la formulación anterior (suplementada con cereales convencionales) pero lo realmente notable es que con arbustos forrajeros se pueden obtener dietas adecuadas para bovinos con la misma calidad nutricional pero de una forma más sustentable.

Para la formulación de ambas experiencias exploratorias, se empleó el cuadrado de *Pearson*, un método clásico para la formulación de alimentos.

En el Cuadro 9 se presenta un análisis comparativo del aporte proteico de las formulaciones experimentales realizadas y de algunos alimentos comerciales.

**Cuadro 9. Comparación proteica de alimentos exploratorios formulados versus alimentos existentes en el mercado.**



**3.3.2 Formulación del alimento final.** En base a las experiencias anteriores, se desarrolló la tercera formulación experimental **BP3** en la que se empleó, como suplemento proteico, un subproducto micelial generado en la producción de la enzima Transglutaminasa Microbiana (MTgasa), en el Centro de Biotecnología Genómica del Instituto Politécnico Nacional, en la ciudad de Reynosa, Tamaulipas. Este subproducto se obtiene a partir de hidrolizados de sorgo y maíz, en estado semi-acuoso. En ese estado semi-acuoso, se desarrolló la primera formulación, pero se generó un poco de dificultades en la homogenización, por lo que se optó por formular un nuevo alimento **BPS** pero empleando este subproducto en seco; a tal efecto, el subproducto se

deshidrató en tubos de ensayo a una temperatura de 30 °C en una estufa, para no alterar su composición. Este subproducto se utilizó debido a su alto contenido de proteínas (aprox. 35.0 % B.H.). También, se utilizó la gramínea Maralfalfa, debido a su alta producción en el estado de Tamaulipas, y por tal motivo, existir una buena disponibilidad, además de ser una gramínea de alto rendimiento y valores nutricionales elevados.

En el Cuadro 10, se muestran los porcentajes de utilización de los insumos de la formulación final, obtenidos por el *Software Confor* empleado para balancear el contenido de proteínas y energía metabolizable.

**Cuadro 10. Insumos para elaboración de la formulación final.**

<b>INSUMO</b>	<b>g Cantidad para 1470.6 g</b>	<b>PORCENTAJE</b>	<b>g UTILIZADOS</b>
<b>Bagazo pre-digerido</b>	700	47.6	87.5
<b>Caña picada</b>	50	3.4	6.2
<b>MTGasa</b>	310.6	21.1	38.8
<b>Maralfalfa</b>	390	26.5	48.7
<b>Premezcla de minerales.</b>	20	1.3	2.5
	<b>1,470.6</b>	<b>100</b>	<b>183.70</b>

Para formular este alimento se empleó el *Software Confor*, cuyo objetivo principal es ayudar a quienes se encargan de la alimentación de los animales en la formulación de piensos o suplementos (como es el caso de este proyecto) que sean capaces de cubrir un grupo de requerimientos nutricionales. Así mismo, cuenta con una base de datos donde se encuentra almacenado el valor nutritivo de un conjunto de alimentos que pueden ser utilizados a conveniencia del usuario, cabe destacar que esta base de datos se puede enriquecer con los insumos no convencionales que se deseen utilizar<sup>37</sup>.

<sup>37</sup> Romero Treviño, E.M. 2010. Memorias de Curso: Diseño y elaboración de suplementos alimenticios para bovinos en pastoreo. Instituto Tecnológico de Altamira, p.45.



Este programa proporciona, ya finalizada la formulación, una pantalla donde contiene los límites de inclusión y el porcentaje de utilización sugerido, cabe señalar que el programa permite formular raciones de acuerdo a los requerimientos que el usuario solicite. A continuación se muestra la pantalla para la formulación final.

**Cuadro 11. Pantalla de software Confor.**

MATERIAS PRIMAS			DATOS Y RESULTADOS	
	%	Costo		
premezcla de mineral	2.00	0.00		
NO HAY SOLUCION				
MATERIAS PRIMAS	% Incl.	EM	PB	
Caña, bagacillo-miel	75.0	1.49	75.00	
Caña, residuo de cen	4.0	0.05	1.32	
Mtgasa	15.0	0.30	49.80	
maralfalfa	39.7	0.92	6.34	
premezcla de mineral	2.0			
TOTALES		2.77	132.46	
REQUERIMIENTOS		2.77	132.46	
DIFERENCIA		0.00	0.00437768	

No se pudo completar de ninguna forma la fórmula.

### 3.3.3 Descripción de Software Confor.

El objetivo de este programa es ayudar a quienes se encargan de la alimentación de los animales en la formulación de piensos que sean capaces de cubrir un grupo de requerimientos. Para fines del proyecto se formuló en base a los requerimientos proteicos y energía metabolizable requerida para bovinos en etapa de finalización.

Cuenta con una Base de Datos donde están almacenados el valor nutritivo de un conjunto de alimentos que pueden ser utilizados a conveniencia del usuario, misma que se puede actualizar incluyendo insumos nuevos o no convencionales; en este proyecto, se incluyeron datos de la gramínea Maralfalfa y subproducto de producción de MTGasa.

- **Breve Descripción de sus componentes:**

Ficheros: posee opciones para mostrar ficheros de datos que han sido previamente utilizados, permite cambiar el directorio de trabajo, salir temporalmente al DOS, salir definitivamente del CCONFOR y mostrar la presentación del *Software*.

Formulación: tiene la opción de visualizar o modificar la Base de Datos, realizar la formulación de costo mínimo y la parte de estudio relacionada con el tema.

Manejo de Alimentos: esta opción no son más que ficheros de estudio relacionados con el manejo de alguno de los alimentos más comunes del trópico <sup>38</sup>.

### **3.4 DESCRIPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

**3.4.1 Maralfalfa ( *Pennisetum sp.*).** La Maralfalfa es una gramínea híbrida cuyo nombre científico es *Pennisetum sp.* El origen del pasto maralfalfa es aún muy incierto. Existen varias hipótesis al respecto, entre las que se encuentra la del sacerdote Jesuita José Bernal Restrepo (1979) quien aseguraba que fue el resultado de la combinación de varios recursos forrajeros entre los cuales están el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), una gramínea nativa (*Paspalum macrophyllum*), el gamalote (*Paspalum fasciculatum*), la alfalfa peruana (*Medicago sativa*) y el pasto brasilero (*Phalaris arundinacea*).

Este pasto fue el resultado de la hibridación del *Pennisetum americanum* (L.) Leeke con el *P. purpureum* Schum. Este híbrido es un triploide que puede ser obtenido fácilmente y combina la calidad nutricional del forraje del *Pennisetum*

---

<sup>38</sup> Ibid pg.46.



**Figura 26. Lote de Maralfalfa ubicado en el Instituto Tecnológico de Altamira (ITA)**

*americanum* (L.) con el alto rendimiento de materia seca del *P. purpureum* Schum. Este híbrido, sin embargo, es estéril por lo que para obtener híbridos fértiles se ha utilizado Colchicina con lo que duplica el número de cromosomas y se obtiene un híbrido hexaploide fértil <sup>39</sup>.

Si bien, aunque su origen es incierto y lleva poco tiempo en el mercado, en el presente trabajo se evaluó este pasto por un período de 36 días analizando sus valores proteicos. El análisis se realizó a un lote experimental de dicho pasto ubicado en el jardín botánico del Instituto Tecnológico de Altamira (ITA), Tamaulipas, a cargo del M.C. Horak Loya (Figura 26). Se realizaron cuatro cortes cada siete días en un mismo macollo (unidad estructural de la mayoría de las especies de gramíneas) para asegurar que todas las plantas tuvieran el mismo aporte nutricional, realizándose el primer corte a los 15 días de crecimiento. En el Cuadro 12 se muestra la secuencia de cortes realizada. Los cortes fueron realizados a la misma hora (12 am.); después de realizado el corte, se procedió a secar la muestra en estufa a 29°C,

---

<sup>39</sup> Correa Cardona, H. J. 1984. Pasto Maralfalfa: Mitos y realidades. Dpto. de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia; Juan M. Cerón, Cooperativa COLANTA.

**Cuadro 12. Secuencia de cortes realizados al macollo del lote de Maralfalfa muestreado.**

<b>Primer Corte</b> 15 días de crecimiento	<b>Tercer Corte</b> 29 días de crecimiento
<b>Segundo Corte</b> 22 días de crecimiento	<b>Cuarto Corte</b> 36 días de crecimiento

ya que al exponerla al sol, el proceso de la fotosíntesis se sigue efectuando dado a que se realiza a nivel celular; por tal motivo, la manera correcta de secar cualquier pasto u gramínea es a la sombra o, si se manejan porciones pequeñas, se puede secar en estufa a temperaturas no mayores de 30 °C.

Los resultados de análisis de proteína, en base seca, correspondientes a cada corte se muestran en el Cuadro 13.

**Cuadro 13. Resultados de porcentaje de Proteína Cruda para cada corte. (UNE Lab).**

<b>Día de corte</b>	<b>% de Proteína (BS)</b>
<b>15</b>	14.20
<b>22</b>	9.09
<b>29</b>	8.25
<b>36</b>	10.11

Adicionalmente, se realizaron análisis bromatológicos, para caracterizar esta importante fuente de energía metabolizable, los resultados se muestran en el cuadro 14.

**Cuadro 14. Cuadro bromatológico de Maralfalfa proveniente del campo experimental del Instituto Tecnológico de Altamira ITA.**

<b>% Humedad</b>	<b>% MS</b>	<b>% PC</b>	<b>% Cenizas</b>	<b>% Extracto Etéreo</b>	<b>% Fibra</b>	<b>ELN</b>
14	86	14.20	13.5	2.4	22.61	33.29

**3.4.2 Melaza.** La melaza, es uno de los subproductos de la industria azucarera más utilizado en la actualidad, tanto en la industria alimenticia como en muchas otras, entre las que destacan la industria de cosméticos. Debido a su elevado contenido de energía metabolizable y a su adecuada palatabilidad en el ganado, es frecuentemente utilizado como aporte energético en las dietas de bovinos.

La melaza, también conocida como miel final o residual, es el subproducto (o producto final) ya sea de la fabricación o de la refinación del azúcar crudo; es un líquido denso o viscoso que se separa de la masa cocida final de bajo grado a partir del que no es posible cristalizar azúcar adicional mediante los métodos más tradicionales.

Las mieles finales por tanto, son el licor madre final, resultante de la cristalización final del azúcar de caña y de la cual, a escala comercial, no puede ser extraída de forma rentable más sacarosa por métodos convencionales. La melaza es considerada como uno de los principales subproductos del proceso agro-industrial azucarero <sup>40</sup>.

**3.4.3 Urea.** La urea es un compuesto nitrogenado no proteico, cristalino y sin color, identificado con la fórmula  $N_2H_4CO$ , elaborada en plantas químicas que producen amoniaco anhidro cuando fijan el nitrógeno del aire a altas presiones y temperaturas. Además de suplemento proteico en los rumiantes, la urea es utilizada como fertilizante agrícola y en la elaboración de plásticos. Actualmente, se presenta en el mercado en formas granulada y perlada, siendo esta última la más recomendada para uso animal por su soltura y facilidad para mezclarla con otros ingredientes. Cabe señalar que la urea ocurre como producto final del metabolismo de nitrógeno en casi todos los mamíferos, incluso en el hombre. La urea es muy soluble en agua e higroscópica, facilitando la formación de terrones cuando es expuesta al medio ambiente. Debido a su relativo bajo costo, disponibilidad en el mercado y a su uso tradicional en la alimentación de rumiantes en muchos países alrededor del

---

<sup>40</sup> Manohar Rao, P.J., 1997. Industrial Utilization of Sugar Cane and its Co-products, ISPCCK Publishers and distributors, Delhi, India, p.232, ISBN: 81-7525-017-8

mundo, es el más utilizado entre los compuestos nitrogenados no proteicos (biuret, fosfato diamónico, acetato de amonio, sulfato de amonio y otros). La urea contiene aproximadamente 46% de nitrógeno.

En la alimentación para rumiantes en etapa de finalización, el límite de utilización es de 2.0% <sup>41</sup> dado que si se suministra cantidades superiores, se puede llegar a ocasionar una intoxicación en el animal. Lo anterior se debe a que la urea es degradada en el rumen para liberar amoniaco ( $\text{NH}_3$ ), el cual es usado por los microorganismos para producir aminoácidos. Cuando la urea libera mayor cantidad de amoniaco de lo que pudiera ser convertido en proteína microbiana, el exceso de éste será absorbido a través de las paredes del rumen y transportado al hígado por la corriente sanguínea, causando una alcalosis, o lo que es igual, una intoxicación por amoniaco.

Cuando el rumiante ingiere urea, esta última es hidrolizada primeramente en amoniaco y anhídrido carbónico en el rumen mediante la enzima *ureasa* que es producida por ciertas bacterias. Por otra parte, los carbohidratos son degradados por otros microorganismos para producir ácidos grasos volátiles y cetoácidos. El amoniaco liberado en el rumen se combina con los cetoácidos para formar aminoácidos, que a su vez se incorporan en la proteína microbiana. Estos microbios son degradados en el último estómago (abomaso) e intestino delgado, siendo digeridos a tal extremo que la proteína microbiana es degradada a aminoácidos libres, para luego ser absorbidos por el animal. Se debe tener presente que el amoniaco prácticamente no posee ningún valor nutritivo, ya que si no es transformado en proteína microbiana, será absorbido por el rumen y eliminado a través del hígado, riñones y finalmente en la orina bajo la forma de urea <sup>42</sup>.

---

<sup>41</sup> Escalona, R.2007.Intoxicación por urea en rumiantes. Dpto. Sanidad animal; Facultad de medicina veterinaria, universidad de Granma. p1.

<sup>42</sup> Araque, César. 2001. Inve. FONAIAP. De la urea en la alimentación de rumiantes. Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Táchira, Venezuela.

**3.4.4 Subproducto de enzima transglutaminasa microbiana (MTGasa).** Se trata de un sub-producto micelial obtenido durante el proceso de producción de transglutaminasa microbiana (MTGasa). Como hidrolizado, en estado semiacuoso.

Para la producción de transglutaminasa se utiliza glucosa obtenida de harina de sorgo la cual pasa por dos procesos:

1. Hidrólisis enzimática con amilasa y  $\alpha$ -amilasa.
2. Centrifugación para separar la glucosa del resto de los componentes de la harina.

El subproducto derivado de esa producción, contiene una alta concentración de proteínas, considerándose por tanto un buen suplemento para alimento animal. La enzima MTGasa es conocida como el “pegamento de los alimentos”, ya que su uso es como aditivo en la fabricación de embutidos como el jamón, el salami, etc. Como se muestran en la Figura 27.



**Figura 27. Ejemplo de embutidos donde se utiliza la Enzima MTGasa.**

Para caracterizar este subproducto se realizaron análisis bromatológicos cuyos resultados se muestran en el Cuadro 15.

**Cuadro 15. Resultados bromatológicos del subproducto de MTGasa.**

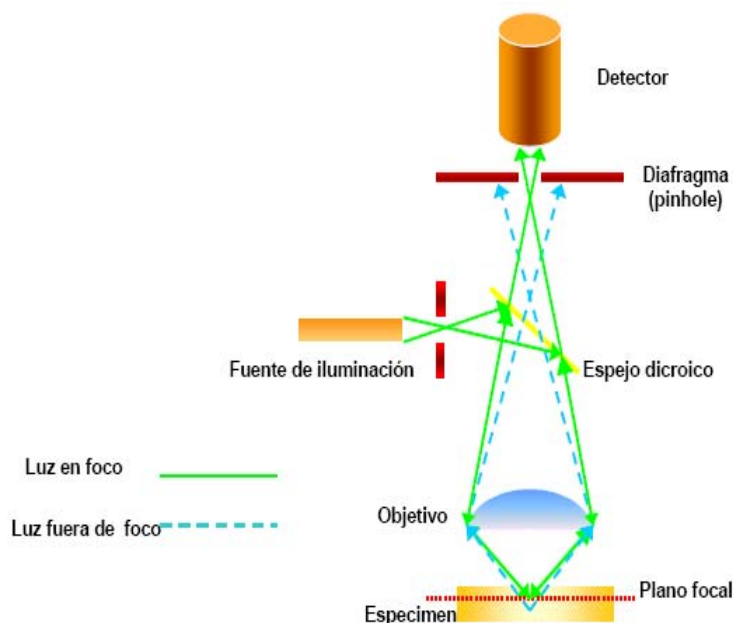
<b>% Humedad</b>	<b>%MS</b>	<b>% Proteína cruda, b.s.</b>	<b>Cenizas</b>
7.417	95.5829	11.0967	1.7399

### 3.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL BAGAZO

#### 3.5.1 Caracterización Morfológica

**3.5.1.1 Microscopía Confocal de Barrido Láser (MCBL).** Esta técnica combina el microscopio de fluorescencia con imagen electrónica y puntos de luz suministrados por láser dirigido al espécimen en particular para obtener imágenes tridimensionales (Figura 28).

En el desarrollo de la investigación se realizaron experimentos donde fueron simuladas las condiciones de tratamiento con el agente alcalino NaOH y la suplementación de miel+urea en las mismas concentraciones que se emplean para la elaboración de los alimentos; en el caso del NaOH, se utilizó con una concentración 2.0 N con la finalidad de observar los cambios sufridos en la fibra.



**Figura 28. Fundamento de la técnica MCBL**

También, se tomaron fotos donde se muestra el deterioro de las fibras así como su fraccionamiento posterior al tratamiento alcalino. Para dicho experimento, se utilizaron cajas Petri de 35x10 mm, donde se colocó una cantidad



predeterminada del bagazo. Posteriormente, se establecieron las condiciones para la toma de las fotos, se realizaron dos experimentos por muestra, en el primero se tomaron fotos cada 60 seg y en el segundo cada 30 seg.

Para simular las condiciones de aspersion del NaOH se utilizó un atomizador, para controlar la cantidad de la aspersion previamente con la ayuda de una jeringa, se midió el volumen por disparo (cada disparo es igual a 0.1 ml). Transcurridos 10 min de impregnación, se aplicó la solución de miel+urea+sal para detener la reacción y proceder a suplementar proteicamente al alimento, se continuó tomando fotos por espacio de otros cinco minutos.

Con posterioridad a la aplicación de NaOH se observó la delignificación de la fibra con una marcada fluorescencia en las fotografías posteriores <sup>43</sup>.

**3.5.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).** La Microscopía Electrónica de Barrido, mediante un rastreo programado, barre la superficie de una muestra con un haz de electrones de alta energía, dando como consecuencia diversos tipos de señales. Tales como electrones secundarios y retro-dispersados, rayos X, electrones *Auger* y electrones absorbidos.

La primera de ellas se refiere a los electrones arrancados de la propia muestra por la acción del haz incidente, ofreciendo así una señal que proporciona una imagen real de la superficie que se encuentre sometida a estudio <sup>44</sup>. Se considera un electrón secundario aquel que emerge de la superficie de la muestra con una energía inferior a 50 eV, y un electrón retrodispersado el que lo hace con una energía mayor. En la Figura 29 se muestra un esquema del microscopio electrónico de barrido. En el presente trabajo la técnica MEB se empleó para observar los cambios morfológicos que sufre el material fibroso al exponerse al tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH).

---

<sup>43</sup> Martinez Nistal, A. 2000. Microscopia Láser con focal, servicio de proceso de imágenes, Universidad de Oviedo, España. pp. 1-10.

<sup>44</sup> J. I. Goldstein, D. E. Newbury, Patrick Echlin, D. C. Joy, Ch. Fiori, and E. Lifshin, 981. "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis", Plenum press, 123.

La microscopía electrónica de barrido se realizó en un Microscopio *Quanta 3DFEG* (SEM/FIB) a condiciones de bajo vacío (de 10 a 130 Pa) a 150 KV por tratarse de un compuesto orgánico y trabajándose a una distancia de la muestra de 10 mm (Wd).

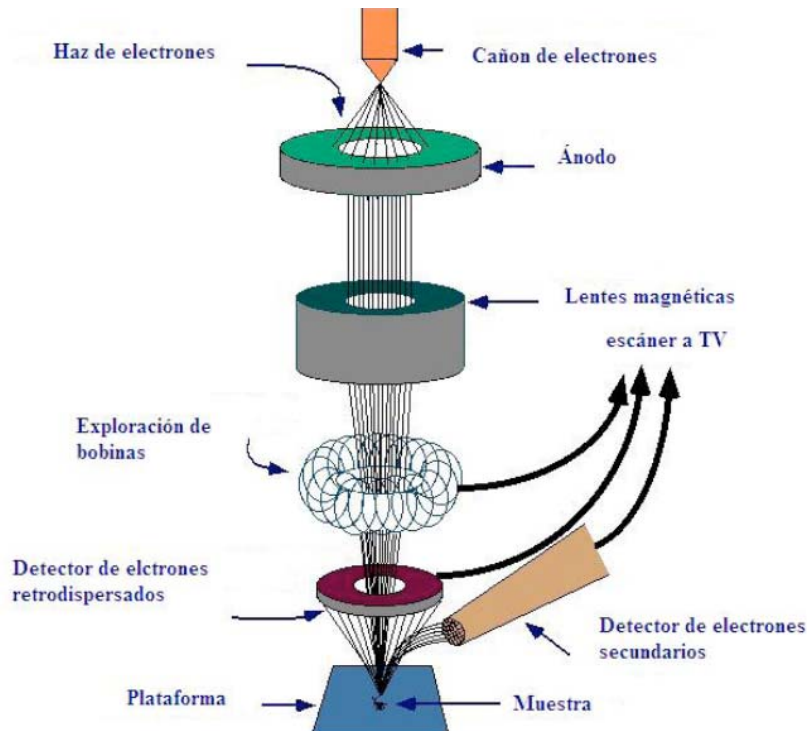


Figura 29. Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido.

**3.5.1.3 Espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS).** La técnica EDS es una técnica de microanálisis químico usado en conjunto con el microscopio electrónico de barrido. La técnica EDS detecta los rayos X emitidos por la muestra expuesta a un haz de electrones de alta energía. La generación de los rayos X característicos son producidos por la interacción inelástica del haz de electrones con los átomos de la muestra en el microscopio electrónico de barrido. Obteniéndose así un espectro de elementos, es decir un análisis químico elemental de la muestra. En resumen como resultado se obtiene un conteo de electrones, y en el espectro obtenido se observan picos característicos para cada elemento.

Para el presente proyecto, la técnica de EDS se utilizó como una forma de identificar cualitativa y cuantitativamente los elementos en las muestras, así

como minerales de importancia para la nutrición de bovinos. También, se utilizó para corroborar la homogeneidad en las muestras.

En la Figura 30 se muestra un ejemplo de un espectro característico de EDS.

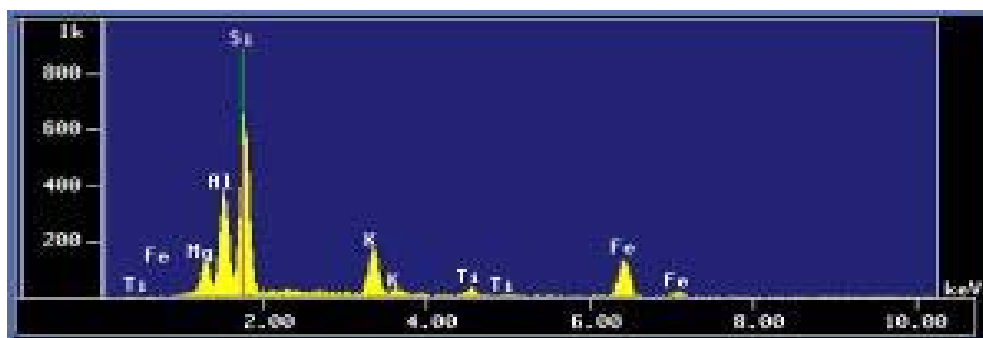


Figura 30. Ejemplo de espectro característico de EDS.

### 3.5.2 Análisis estructural.

**3.5.2.1 Difracción de Rayos X.** Los rayos X son productos de la desaceleración rápida de electrones muy energéticos (del orden 1000eV) al chocar con un blanco metálico. Según la mecánica clásica, una carga acelerada emite radiación electromagnética, de este modo, el choque produce un espectro continuo de rayos X (a partir de cierta longitud de onda mínima). Sin embargo, experimentalmente, además de este espectro continuo, se encuentran líneas características para cada material.

La Difracción de Rayos X ( DRX ) es una técnica versátil, no destructiva y analítica, que se utiliza para determinar fases, estructuras, y tensiones. Al existir una relación entre la digestibilidad y la cristalinidad, esta técnica se utilizó en el presente proyecto para ver cómo se afecta la estructura amorfa que existe en el bagazo después del tratamiento. Para este fin se utilizó un equipo *Bruker D8 Advance*, usando la línea  $K\alpha$  Cu  $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$  con un detector *Lunx Eye*. Se hicieron los experimentos de  $10-40^\circ$  en  $2\theta$ .

Cuando un haz de rayos X incide en un cristal, parte de los rayos lo atraviesan y parte son dispersados por los electrones de los átomos del cristal. La mayor parte de las ondas de los fotones dispersados interfieren destructivamente y se

anulan. En ciertas direcciones, sin embargo, los fotones salen en fase y sus ondas interfieren constructivamente dando lugar a un haz de rayos X difractados (Figura 31).

Las direcciones en que los fotones se refuerzan están determinadas por la **Ley de Bragg**:

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

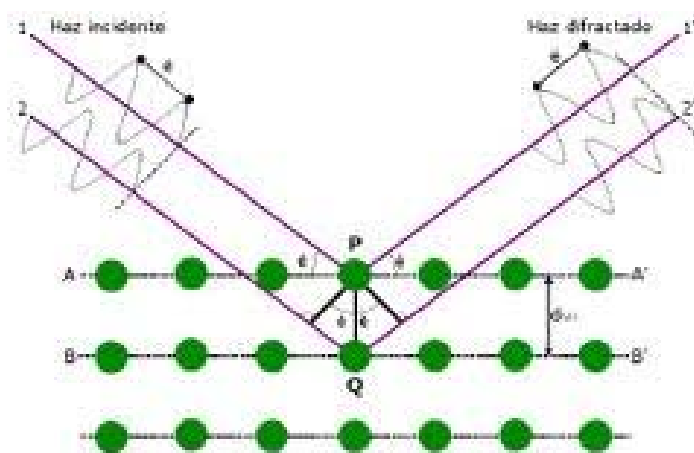
**Dónde:**

$\lambda$  = es la longitud de onda del haz incidente,

$d$  = es la distancia interplanar,

$\theta$  = es el ángulo entre el haz incidente y los planos de dispersión

$n$  = es un número entero, denominado orden de difracción



**Figura 31. Explicación de Ley de Bragg.**

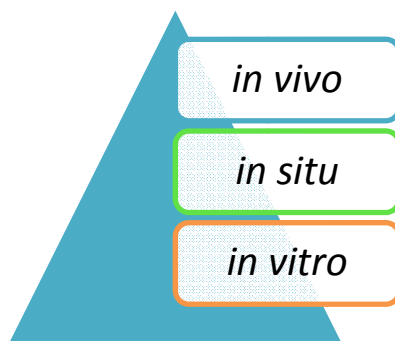
### 3.5.3 Análisis Químico.

**3.5.3.1 Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR).** Esta técnica espectroscópica se fundamenta en la absorción de la radiación IR por las moléculas en vibración. Una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja.

En el presente estudio se utilizó esta técnica para observar los cambios sufridos en los grupos funcionales del bagazo de la caña de azúcar después del tratamiento alcalino. Un espectro de FT-IR es una huella digital del grupo funcional y, por tal motivo, es importante conocer en qué región se expresan las señales características del material a estudiar. La región de  $900$  a  $1200\text{cm}^{-1}$  corresponde a la zona de absorción del bagazo de la caña de azúcar <sup>45</sup>. Esta técnica se realizó en un equipo marca *Horiba 50BW* y *VON LabRam Modelo HR80*.

**3.5.3.2 Análisis de digestibilidad.** La digestibilidad en un alimento animal es un factor sumamente importante a tener en cuenta, ya que de este factor depende el grado de aprovechamiento nutricional que se tiene del mismo, es por eso que para fines de la presente investigación se realizó la digestibilidad *in vitro* al bagazo integral, al bagazo pre-digerido alcalinamente y a la formulación terminada respectivamente.

La digestibilidad de un alimento se puede medir de tres formas como se muestra en la Figura 32.



**Figura 32. Formas de determinación de la digestibilidad de la materia seca**

La digestibilidad *in vivo*, como su nombre lo indica, se realiza con el monitoreo de animales vivos a los cuales se le administra la dieta en estudio, se analiza el

---

<sup>45</sup>Jagdish C. Tewari, 2007. *In situ laboratory analysis of sucrose in sugarcane bagasse using attenuated total reflectance spectroscopy and chemometrics*, International Journal of Food Science & Technology Volume 42, Issue 2, February.

excremento y por diferencias simples se realizan los cálculos, en el alimento se ponen marcadores que facilitan el estudio, pero se tiene que contar con jaulas especiales para la recolección del material fecal teniendo el inconveniente que se tiene que realizar con un gran número de individuos para que sea representativo.

La digestibilidad *in situ* se realiza insertando bolsas de polietileno con el alimento a estudiar en el rumen de las reses por un periodo de tiempo y posteriormente se analiza la cantidad de materia asimilada.

Y por último, la digestibilidad *in vitro* es la que se realiza mediante la simulación de las condiciones del rumen de la res en probetas. Este tipo de análisis es el más difundido ya que el grado de error es bajo y no requiere del sacrificio del animal ni de aparatos complicados, solamente se utiliza líquido ruminal fresco extraído de la res y un reactivo que simula la saliva. Para fines de la presente investigación se utilizó este método, el cual se describe a continuación.

**3.5.3.2.1 Digestibilidad *in vitro*.** La muestra de líquido ruminal de la res fue donada por la Escuela Nacional de Posgraduados de la Ciudad de Texcoco. El líquido ruminal se obtuvo de una vaca fistulada de aproximadamente dos años de edad de un peso referido de 500 kilogramos, designada para estudio en esa institución, el animal cuenta con una fístula permanente debido a que es utilizada para fines de Investigación.

Este procedimiento es tomado de la técnica de dos etapas *Tilley y Terry* (1963) e involucra primeramente un período de incubación de 48 horas con microorganismos del rumen en un medio *buffer* y, en segundo término, la digestión con una mezcla de ácido clorhídrico-pepsina. Después de filtrar el residuo, las cantidades de materia seca o materia orgánica que desaparecen después de ambas etapas, se consideran como “digeridas y absorbidas”.

**● Toma de muestra del líquido ruminal.**

Primeramente, se localiza a la vaca fistulada, para poder tener un acercamiento correcto con el espécimen, se debe tener un acercamiento lento y hablar en un

tono monótono y amable; posteriormente, se retira el tapón de la fistula, y se toma la muestra asegurándose de que los guantes estén bien colocados, se introduce la mano en la cavidad gástrica para sacar el líquido ruminal mezclado con restos de fibra no digerida, se depositan en un frasco ámbar protegido de la luz con una bolsa de plástico negra para preservar el ambiente anaerobiótico de las bacterias en el rumen, se repite esta acción tantas veces sea necesario para recolectar la cantidad de líquido deseada. Habiendo obtenido la muestra, se limpia los alrededores de fístula con un trapo seco y se coloca nuevamente el tapón con sumo cuidado.

- **Filtrado del líquido ruminal.**

Ya en el laboratorio, el líquido ruminal se licúa con la ayuda del reactivo “*Saliva de Mc Dougall*” (enriquecida con CO<sub>2</sub>). La saliva en los rumiantes representa un factor importante ya que cumple un rol relevante en la bioquímica del primer y segundo compartimento del estómago tanto por el volumen secretado como por su composición. La saliva es una solución tampón de fósforo y bicarbonato, proporciona un medio favorable a los microorganismos del primer y segundo compartimento del estómago, impidiendo bajas del pH ruminal, por acción de los ácidos grasos volátiles, lo que dificultaría la producción y la absorción de los mismos. Por lo anterior, en el laboratorio se crea una “saliva artificial” la cual ayuda a disolver el líquido ruminal.

En la licuadora se vacía un poco de líquido y aproximadamente una tercera parte de *Saliva de Mc Dougall*, se licúa unos minutos y se procede a filtrar en un embudo utilizando tela de cielo como material filtrante oprimiéndose para separar la fracción líquida. Una vez obtenido el líquido, éste se deposita en un frasco ámbar y se mantiene en ambiente de anaerobiosis a una temperatura de 39 °C en un baño María protegiéndolo con un material que obstruya el paso de la luz (bolsa de plástico negra).

- **Preparación de reactivos**

a) Saliva artificial McDougall (se necesitan 20 mL por tubo). Debido a que el fosfato de calcio es insoluble y precipita en presencia del pH alto, la saliva debe

prepararse en dos porciones separadas si se pretende almacenar por más de 2 horas.

1) Solución buffer ( cantidades por litro, p/v):

9.80 g  $\text{NaHCO}_3$ /litro de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada

7.00 g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (3.71 g anhidro)

0.57 g KCl

0.47 g NaCl

0.12 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

2) Solución de cloruro de calcio al 4 % (p/v):

4.0 g  $\text{CaCl}_2$  (5.3 g.  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en 100 mL de agua destilada.

Poco antes de usar la saliva artificial, debe agregarse 1.0 mL de la solución de cloruro de calcio al 4.0 %, por cada litro de la solución buffer con objeto de tener 0.04 g de  $\text{CaCl}_2$  por litro de saliva artificial.

b) Solución de HCl al 20 % (v/v) . Diluir 200 ml de HCl concentrado en 1.0 litro de agua destilada, la solución será aproximadamente 2.4 N HCl y se ocuparán 6.0 ml por tubo.

c) Solución de pepsina al 5.0 %, ( p/v). Agregar 5 g de pepsina a 100 ml de agua destilada (se ocuparán 2.0 mL por tubo).

d) Líquido ruminal filtrado (se ocupan 10 mL por tubo).

## **PROCEDIMIENTO**

a) Determinar el contenido de materia seca y materia orgánica de la muestra.

b) Pesar las muestras para la digestión *in vitro*. Colocar aproximadamente 0.5 g de la muestra en un tubo numerado por triplicado y anotar el peso hasta el tercer decimal.

(Nota: las pesadas deben terminarse al menos el día anterior al inicio de la digestión).



- c) Separar cuatro tubos vacíos que servirán para los blancos.
- d) Hacer funcionar el baño maría a 39 °C.
- e) Poner una cantidad adecuada de la solución *buffer* en un frasco de cinco litros de capacidad con fondo redondo (calculando unos 40 ml por tubo, más unos 200 mL adicionales pero que la cantidad total no exceda los cuatro litros). Agregar 1.0 mL de la solución de CaCl<sub>2</sub> al 4% por cada litro (unir las dos soluciones).
- f) Medir el pH de la saliva artificial que debe oscilar alrededor de 6.9 y, si no es así, burbujear CO<sub>2</sub> para bajar el pH. Se toman unos 10 minutos para ajustar cuatro litros de saliva artificial a un pH de 6.9 a 7.0 y a temperaturas de 39 °C. Añadir 40 ml de saliva artificial a cada tubo con muestra y blancos.
- g) Obtener el líquido ruminal (de preferencia de un animal fistulado).
- 1.- Al extraer el líquido ruminal el recipiente debe tener paredes oscuras y tratar de mantener la temperatura de 38-42 °C.
  - 2.- Filtrar el líquido ruminal usando una manta de cielo (darle de 4 a 8 dobleces), lo cual puede efectuarse en el corral de manejo o en el laboratorio.
  - 3.- Burbujear CO<sub>2</sub> regularmente dentro del líquido ruminal después de filtrarse.
- h) Agregar 10 mL de líquido ruminal a cada tubo del baño María, al momento de agregar el líquido ruminal se debe gasear con CO<sub>2</sub> (no introducir la manguera al momento de agregarlo). Rápidamente, tapar los tubos con su tapón correspondiente.
- i) Inmediatamente, después de inocular cada tubo (blancos y muestras), agitar con movimientos de rotación para asegurar que todas las partículas del forraje estén remojadas con el medio, repitiendo esto el primer día y tres veces el segundo día (este proceso corresponde a la primer etapa de la digestión y dura 48 horas consecutivas).

j) Después de 48 H de incubación, rotar los tubos a manera de agitar su contenido y eliminar los tapones (lavar las partículas de forraje que se hayan adherido a los tapones, para que caigan hacia el interior de los tubos, usando una mínima cantidad de agua destilada).

k) Después de las 48 H de incubación, se sacan los tubos del baño maría y se transvasa cada tubo a un vaso *Bercellius* de 100 mL (Figura 33), se bajan los residuos de la fibra con un agitador de vidrio adaptándose en la punta un gendarme; para enjuagar, se utilizan 20 mL de detergente neutro.



Figura 33. Transvasado de muestra a vaso *Bercellius*.

l) Lo anterior se pone a hervir 1.0 hr

m) en una parrilla, adaptando a manera de refrigerante un crisol con hielos en la parte superior del vaso como se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Calentamiento (fase 2).

n) Transcurrida la hora de calentamiento, filtrar cada tubo teniendo cuidado de que no quede residuo alguno en el tubo, ayudándose para ello con un agitador con gendarme de goma. Para este efecto, se utiliza un crisol *gooch*, previamente se determina su masa (peso constante). Se filtra a vacío como se observa en la Figura 35.



Figura 35. Equipo de filtrado a vacío.

Se verifica que en el momento de filtrar, los residuos de agua caliente no se originen burbujas al tener contacto con la muestra, esto indicará que ya se arrastraron los residuos del detergente.

Para finalizar, se llevan a peso constante los crisoles con el residuo y se procede a hacer los cálculos correspondientes.

● **Método de Cálculo para determinación de digestibilidad.**

H.- Materia seca inicial (g) =  $B \cdot A / 100$

I.- Materia seca residual en blanco promedio (g) = E-D

J.- Materia seca residual (en cada muestra) = E-D-I

D.- Digestibilidad de materia seca (%) =  $(H-J) / H \cdot 100$

K.- Materia orgánica inicial (g) =  $H \cdot C / 100$

L.-Materia orgánica de blanco (g) = I-(G-F)

M.-Materia orgánica residual de la muestra (g)

J.- Cantidad de cenizas en cada muestra(g)

N.-Materia orgánica residual corregida por blancos (g)= M-L

D<sub>1</sub>.- Digestibilidad de la materia orgánica de la muestra (%) =  $(K-N) / K \cdot 100$

**3.5.4 Determinación de minerales por espectrofotometría y fotocolorimetría.** Como ya se ha indicado anteriormente, la inclusión de minerales en los alimentos para bovinos es de suma importancia. Para fines del presente proyecto, el contenido de minerales se determinó en el Laboratorio General de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo (Texcoco, México).

Los minerales son un aspecto de la alimentación muchas veces descuidado. Si se tuviera en cuenta cuál es la función que cumplen dentro del organismo, se le daría una mayor atención. Los minerales en general, intervienen como reguladores en un sinnúmero de reacciones enzimáticas y sus deficiencias llegan a afectar muchos procesos metabólicos. De ahí, la importancia de verificar su correcta inclusión en la formulación, ya que cumplen diversas funciones en el organismo siendo las principales las que a continuación se mencionan:

- **Estructural:** el Ca, P, Mg y algunos oligoelementos intervienen en la formación del hueso y otros tejidos de sostén.

- **Función nerviosa:** el Ca y el Mg intervienen en la transmisión de los impulsos nerviosos.

Además, el P interviene en los **mecanismos de transferencia de energía.**

- **Regulación del equilibrio ácido-base y del medio interno:** el Na y el K intervienen directamente en estas funciones.

- **Función hormonal:** el I forma parte de la hormona tiroidea, el Mg interviene en el mecanismo de regulación hormonal del Ca, varios oligoelementos intervienen en los procesos de formación de las hormonas ligadas a la reproducción.

- **Inmunidad:** el Cu y el Zn cumplen funciones dentro de la fase inicial de la respuesta inmune.

- **Función ruminal:** el P, el Mg y el S son necesarios para un correcto crecimiento de las bacterias del rumen y una buena síntesis de proteína microbiana. Estos son algunos ejemplos, ya que los minerales están ligados a una gran cantidad de enzimas, que intervienen en muchos procesos metabólicos <sup>46</sup>.



**Figura 36. Muestras previamente pesadas para realización de análisis de minerales.**

Las muestras inicialmente se digirieron; se pesan 0.2 g de la muestra (Figura 36), la cual se adiciona a un matraz *Kjeldahl* que contenga 0.5 mL de mezcla di-ácida en proporción 4:1 de ac. sulfúrico y perclórico. Se coloca el matraz en una campana de extracción de gases en una parrilla de calentamiento (Figura 37) hasta que se termine la reacción (evaporación de gases blancos), para finalizar, se agrega 1.0 mL de agua destilada. Lo anterior se realizó bajo las indicaciones de la Norma Oficial Mexicana AS-16-1998.



**Figura 37. Digestión de muestras con mezcla di-ácida.**

**Se analizaron los siguientes minerales:**

Fósforo (P), Potasio (K), Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Hierro (Fe).

---

<sup>46</sup>Boletín Técnico 2010 ¿Por qué usar minerales en la alimentación de ganado Bovino? Por *Nutrefeed*.pp.1-4.

**Se analizó por distintos métodos.**

**P:** digestado con mezcla di-ácida y determinado por fotocolorimetría por reducción con molibdo-vanadato.

**K, Na:** digestado con mezcla di-ácida y determinado por espectrofotometría de emisión de Flama.

**Ca, Mg:** digestado con mezcla di-ácida y determinado por espectrofotometría de absorción atómica.

**Fe:** digestado con mezcla di-ácida y determinado por espectrofotometría de absorción atómica.

### **3.5.5 Análisis bromatológico.**

#### **3.5.5.1 Determinación de proteína cruda.**

- **Método *Kjeldahl***

La determinación de proteína se analizó por el método *Kjeldahl* (Figura 38), el cual es un método indirecto, ya que se calcula el porcentaje de proteína a partir del cálculo del contenido de nitrógeno total.

El método se basa en la destrucción de la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado, formándose sulfato de amonio que, en exceso de hidróxido de sodio, libera amoníaco, el que se destila recibiendo en ácido bórico formándose borato de amonio, que se valora con ácido clorhídrico<sup>47</sup>. Dichas determinaciones se llevaron a cabo por triplicado, para que los resultados fueran representativos.

---

<sup>47</sup> AOAC, *Official Method*, 2001, p.1



Figura 38. Digestión de muestras en equipo *Kjeldahl*.

### 3.5.5.2 Determinación de humedad.

#### ● Método de secado

El método consiste en llevar a peso constante las muestras: esto es, colocando las mismas en una estufa a 110 °C para deshidratarlas, posteriormente dejarlas enfriar en un desecador durante 15 minutos y finalmente pesar en una balanza analítica. Este procedimiento se repite tantas veces como sea necesario, hasta obtener un peso constante y posteriormente obtener los resultados.

### 3.5.5.3 Determinación de cenizas.

#### ● Método de incinerado

Este método consiste en la carbonización de la muestra depositada en un crisol de porcelana, primeramente con un mechero de *Bunsen* y posteriormente dentro de una mufla a una temperatura entre 500-600 °C hasta que las cenizas estén libres de carbón; esto es, cuando se observen de color gris o blanco. Posteriormente, se transfiere el crisol con la muestra carbonizada, a la estufa, se enfría paulatinamente y se lleva al desecador. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, se pesa el crisol con la muestra (Figura 39).



Figura 39. Muestras incineradas, las diferencias en la coloración se deben a presencia de minerales.

**3.5.5.4 Determinación de extracto etéreo (grasas).** Se considera grasa al extracto etéreo que se obtiene cuando la muestra es sometida a extracción con éter etílico. El término “extracto etéreo” se refiere al conjunto de las sustancias extraídas que incluyen, además de los ésteres de los ácidos grasos con el glicerol, a los fosfolípidos, las lecitinas, los esteroides, las ceras, los ácidos grasos libres, los carotenos, las clorofilas y otros pigmentos. El método consiste en desengrasar la muestra utilizando éter de petróleo en calidad de extractor. Por diferencia se obtiene el porcentaje de extracto etéreo. Dado el tipo de muestra analizada, se le hizo ciertas adecuaciones al método. Se pesó un gramo de muestra que se coloca en capuchones de papel filtro, a los cuales se les coloca un poco de algodón en la parte superior a manera de tapón. Se coloca el cartucho dentro del extractor *Soxhlet* (Figura 40). En la parte inferior se ajusta un matraz con cuerpos de ebullición llevados previamente a peso constante por calentamiento (100 – 110 °C). Se coloca el refrigerante.

Posteriormente, se debe añadir éter por el extremo superior del refrigerante en cantidad suficiente para tener 2 ó 3 descargas del extractor (alrededor de 80 mL), transcurridas dos horas se apagó el equipo, se retiraron las muestras y se recuperó el éter de petróleo para su posterior disposición. A continuación, se evaporó suavemente el éter del matraz y se secó a 100 °C hasta peso constante <sup>48</sup>.

**Fórmula para determinación de Extracto etéreo.**

**Dónde:**

$$\text{Extracto etéreo} = \frac{P-p}{M} \times 100$$

P = Masa del matraz con grasa, en gramos.

p = Masa del matraz sin grasa, en gramos.

M = Masa de la muestra, en gramos.

---

<sup>48</sup>NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (método *Soxhlet*) en alimentos. *Food stuff-determination of ether Extract (soxhlet)*. Normas mexicanas. Dirección general de Normas.





Figura 40. Determinación de Extracto Etéreo.

**3.5.5.5 Determinación de fibra cruda.** La fibra cruda es la pérdida por ignición del residuo seco remanente después de la digestión de la muestra con solución de ácido sulfúrico al 1.25 % de concentración e hidróxido de sodio al 1.25 % de concentración bajo las condiciones específicas de la prueba. Para esta determinación, la muestra tiene que ser molida para reducir su tamaño (Figura 41) previamente desengrasada, para que el extracto etéreo no interfiera con los resultados.



Figura 41. Reducción de tamaño de la muestra (Instituto Tecnológico de Altamira).

## PROCEDIMIENTO

(a) A 2.0 g de muestra se le extrae la grasa, la que sí es menor del 1% la extracción puede ser omitida.

(b) Transferir a un vaso de 600 ml, evitar la contaminación con la fibra de papel.

(c) Agregar 200 ml de ácido sulfúrico al 1.25% hirviendo. Se coloca un cinturón al matraz elaborado con tela, el cual tiene la función de refrigerante y se mantiene húmedo durante el calentamiento (Figura 42).

(d) Colocar el vaso en el aparato sobre la placa caliente pre ajustada para que hierva exactamente 30 minutos. Girar el vaso periódicamente para evitar que los sólidos se adhieran a las paredes.

(e) Quitar el vaso y filtrar a vacío en embudo *buckner* a través de papel filtro.

(f) Enjuagar el vaso con 50-70 mL de agua hirviendo y verterla sobre el papel.

(g) Lavar el residuo tantas veces como sea necesario, hasta que las aguas de lavado tengan un pH igual al del agua destilada.

(h) Transferir el residuo al vaso con ayuda de 200 mL de NaOH al 1.25% hirviendo y calentar a ebullición exactamente 30 minutos.

(i) Quitar el vaso y filtrar en buckner con papel filtro de masa cocida y cenizas conocidas.

(j) Lavar con agua hasta que las aguas de lavado tengan un pH igual al del agua destilada. Transferir el residuo a un crisol a masa constante y secar a 130 °C durante 2 horas.

(k) Enfriar y determinar su masa.

(l) Calcinar a 600°C durante 30 minutos.

m) Enfriar y determinar su masa <sup>49</sup>.

## CÁLCULOS

$$\% \text{ Fibra Cruda (FC)} = \frac{(Ps - Pp) - (Pc - Pcp)}{M} \times 100$$

---

<sup>49</sup> NMX-F-090-S-1978. Determinación de fibra cruda en alimentos. *Foodstuff determination of crude fiber*. Normas mexicanas. Dirección general de normas.

**Dónde:**

$P_s$  = masa en gramos del residuo seco a 130°C.

$P_p$  = masa en gramos de papel filtro.

$P_{cp}$  = masa en gramos de las cenizas del papel.

$M$  = masa de la muestra en gramos.

$P_c$  = masa en gramos de las cenizas



**Figura 42. Equipo de digestión de Fibra Cruda.**

### 3.6 MODELACION DE GANANCIA EN PESO DIARIA

El sistema de producción de carne en confinamiento o corral, tiene como objetivo fundamental engordar becerros o toretes y enviarlos a los mercados pesados y con buena calidad de carne en un tiempo corto y que sea económicamente redituable para el productor. En este sistema de producción generalmente se utilizan raciones alimenticias perfectamente balanceadas, cuya finalidad es hacer que los animales alcancen incrementos de peso altos (1.8-2.0 kg/animal/día) obteniendo así una buena rentabilidad económica. En este sistema de engorda, los animales reciben diariamente una dieta conocida tanto en cantidad como en calidad, la cual debe llenar los requerimientos de proteína, energía y minerales <sup>50</sup>.

Con la finalidad de visualizar la ganancia en peso diaria de los bovinos de una forma teórica se generó un modelo que, sirviera para observar los diferentes pesos que se podrían esperar con los tres puntos de control (bagazo integral,

---

<sup>50</sup> Pereda S.M., González M.S.S., Arjona S.E., Bueo A.G. y Mendoza M.D. 2005. Ajuste de modelos de crecimiento y cálculo de requerimientos nutricionales para bovinos Brahman en Tamaulipas, México. *Agrociencia* 39, (1): 19-27.

bagazo predigerido y formulación final BPS) así mismo se compara con el aumento en peso alimentando al ganado con un pasto Buffel.

Debido a la necesidad de solucionar de la forma más económica y de engordar a los rumiantes en menor tiempo de forma satisfactoria; diversos autores han desarrollado complejos modelos capaces de evaluar el rendimiento de raciones diarias, dietas de animales en pastoreo evaluando diverso factores como la genética, la energía retenida, etc. Sin embargo el modelo que se implementó en este proyecto es sencillo, dado a que solo se consideraron las variables más significativas que reporta la literatura. Tales como la comida que se reporta entre un 2 y 3 % del peso vivo, el agua, las excretas y un factor para los riesgos en la salud.

Para la realización del modelo se consideró un peso inicial de las reses de 300 kilogramos, esto debido a que el alimento está diseñado para ganado bovino en etapa de finalización. Se asumieron variables para el alimento dado; Se consideró un 2 % del peso vivo como alimento a suministrar; en este contexto se asumió a la variable del agua como la letra *a* y se le dio un valor constante de 35 L, este valor se designó de acuerdo a la literatura consultada, la cual indica como un consumo normal para este vital líquido entre un intervalo de 35-45 L <sup>51</sup>.

Así mismo se asumieron las excretas del animal, tanto de agua como alimento. Para determinar la cantidad no asimilable del alimento y por tanto excretada en forma e eses se tomó en cuenta la digestibilidad del alimento, restando a uno la digestibilidad. Para determinar la cantidad de agua excretada se consideró como pérdida a un 90 % del agua ingerida, excretada en orina, transpiración, etc. Adicionalmente se resta un 2 % adicional debido al agua utilizada en la remasticación de los alimentos. Con la finalidad de acercar el modelo a datos reales, se consideró el factor salud para ambas variables.

A continuación, se muestra la ecuación desarrollada en el modelo:

---

<sup>51</sup> Lesur, Luis. 2008 Manual del ganado bovino para carne Editorial trillas. ISBN 978-968-24-0521-1. pp 38-41.

$$GPD = [y_i + (0.02 y_{i-1})(Fsal) + a] - [(0.02)(1 - DIVMS)(Fsal) + (0.02 * P_1) + (0.09 * a)]$$

**Dónde:**

$Y_i$  = Peso Inicial del rumiante (300 para el día 1)

$i$  = Días de engorda 1.....100

$a$  = Agua ingerida (35 L)

$DIVMS$  = Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (variable según el alimento a evaluar)

$C$  = Comida ingerida calculada.

$P_1$  = Peso inicial + comida ingerida calculada.

La rutina se realizó en *Microsoft Excel* y los datos se graficaron paralelamente en *Origin pro versión 8*. En la figura 43 se muestra la rutina realizada en el *software Excel*.

	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Fsalud	Yo	C comida	Yi	P1	Agua	A	B	GPD (A-B)
1	1	300	6	306	306	35	341	36.554	304.446
2	1		6.08892	304.446	310.53492	35	345.53492	36.6446984	308.890222
3	1		6.17780443	308.890222	315.068026	35	350.068026	36.7353605	313.332666
4	1		6.26665331	313.332666	319.599319	35	354.599319	36.8259864	317.773332
5	1		6.35546665	317.773332	324.128799	35	359.128799	36.916576	322.212223
6	1		6.44424446	322.212223	328.656468	35	363.656468	37.0071294	326.649338
7	1		6.53298676	326.649338	333.182325	35	368.182325	37.0976465	331.084678
8	1		6.62169357	331.084678	337.706372	35	372.706372	37.1881274	335.518245
9	1		6.71036489	335.518245	342.22861	35	377.22861	37.2785722	339.950037
10	1		6.79900075	339.950037	346.749038	35	381.749038	37.3689808	344.380057
11	1		6.88760115	344.380057	351.267658	35	386.267658	37.4593532	348.808305
12	1		6.97616611	348.808305	355.784471	35	390.784471	37.5496894	353.234782
13	1		7.06469564	353.234782	360.299478	35	395.299478	37.6399896	357.659488
14	1		7.15318976	357.659488	364.812678	35	399.812678	37.7302536	362.082424
15	1		7.24164849	362.082424	369.324073	35	404.324073	37.8204815	366.503591
16	1		7.33007183	366.503591	373.833663	35	408.833663	37.9106733	370.92299

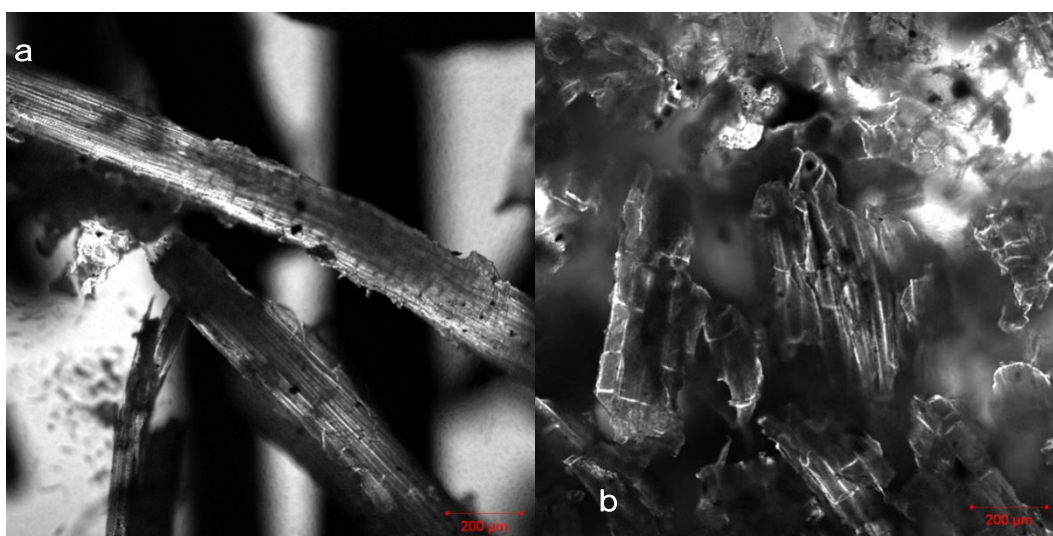
Figura 43. Rutina de ganancia en peso generada en *software Excel*.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 EXPERIMENTOS *IN VITRO* POR MICROSCOPIA CONFOCAL DE BARRIDO LASER MCBL (MCBL).

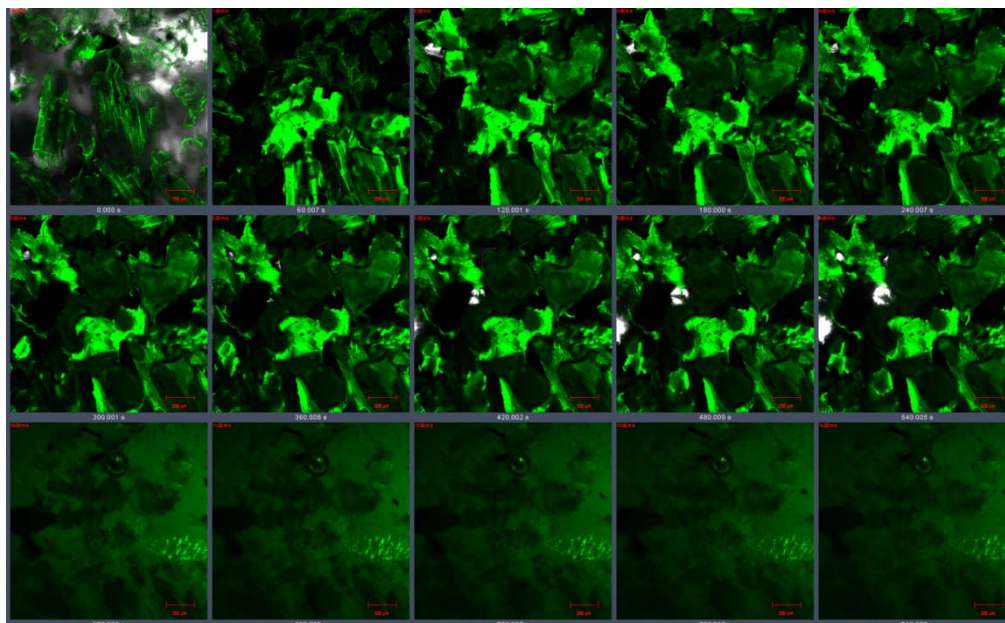
En la Figura 44, se presentan las imágenes obtenidas por la técnica de MCBL, la Figura 44.b es una imagen comparativa de bagazo post-tratamiento alcalino en la que se aprecia la fragmentación del material fibroso como reacción al agente alcalino comparada con la imagen 44.a perteneciente al bagazo integral sin tratamiento.

Por esta técnica, también se realizó un experimento *in vitro* donde se simuló el tratamiento alcalino con NaOH bajo las mismas condiciones utilizadas para realizar el alimento base; también, se aplicó el tratamiento con la solución de miel+ urea para detener la reacción. En la Figura 45 se observa una secuencia



**Figura 44. Microfotografías por MCBL (a) Bagazo Integral; b) Bagazo tratado alcalinamente).**

de imágenes de dicho experimento, tomadas en lapsos de tiempo de 60 seg; en las que, la primera imagen, representa el bagazo inicial; las imágenes de la 1-9 representan el tratamiento alcalino; y, en la imagen 11, la aplicación de la solución de miel+urea+sal; en las imágenes 1-10, se puede observar cómo la fluorescencia aumenta conforme se va exponiendo la lignina por la ruptura de los enlaces, partir de la aplicación de la solución antes mencionada.



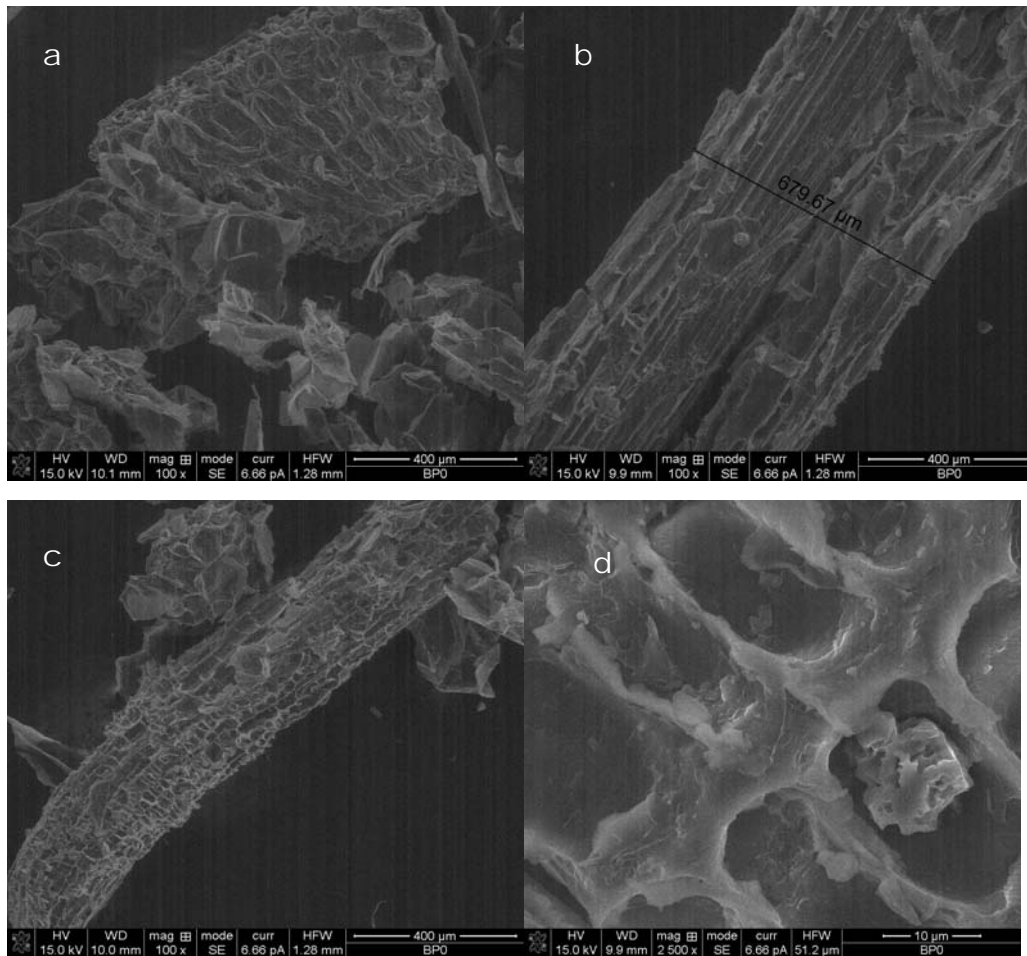
**Figura 45. Experimento *in vitro* por MCBL simulación de tratamiento alcalino.**

Debido a la utilización de esta técnica se puede asegurar una ruptura de los enlaces de la lignina, ya que al observar las imágenes de la secuencia fotográfica, se puede observar claramente el incremento de la fluorescencia debida a la acción del agente alcalino frente a los enlaces de la lignina.

#### **4.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)**

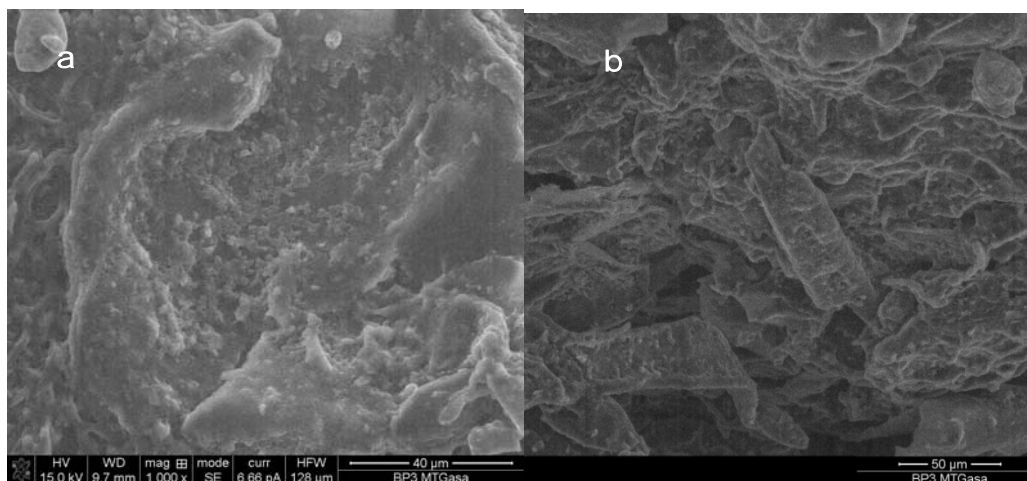
Se realizó una caracterización del bagazo integral previo al tratamiento alcalino con el objetivo de observar los cambios ocurridos en su estructura. En la figura 46, se observan dichas imágenes, en las imágenes 46.a y 46.c se muestra tejido parenquimatoso (médula) perfectamente estratificado con apariencia esponjosa, este tejido es la causa de que en la industria de celulosa y papel, y en la de aglomerados, se requiera de su remoción debido a su carácter no-fibroso y gran poder de absorción, lo que incide negativamente en la calidad del producto final. En la imagen 46.b se observa un haz de fibra con su medida transversal; igualmente, se observan restos de lignina en forma de incrustaciones en el haz de fibra.





**Figura 46. Micrografías de Bagazo Integral tomadas por MEB. a) Tejido parénquimatoso (médula); b) Haz de fibra; c) Tejido esponjoso 100X; d) Acercamiento a fracción de médula 2500 X.**

Igualmente, también se obtuvo imágenes del bagazo tratado alcalinamente, donde se aprecian los cambios sufridos a consecuencia de la delignificación, (Figura 47).





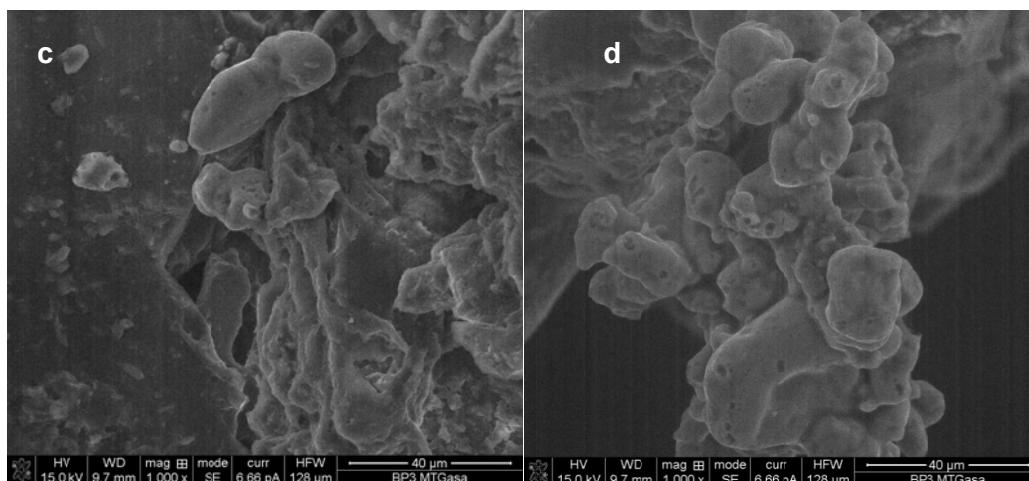


Figura 47. Micrografías de MEB de la formulación exploratoria **BP3**

Las micrografías a,b,c y de la Figura 47, corresponden a la formulación exploratoria **BP3**, en ellas, se observa la delignificación de la fibra así como la presencia de adherencias. Por su parte, en la micrografía 47.a se muestra un canal dermoplásmico, asociado a la adherencia de proteínas, y en las correspondientes a 47.c y 47.d se observan adherencias en forma de tubérculos que señalan una inadecuada homogenización; por tal motivo, se decidió trabajar con todos los suplementos en seco, para asegurar dicha homogenización. Por otra parte, en la micrografía 47.b se puede apreciar la fragmentación registrada en las fibras.

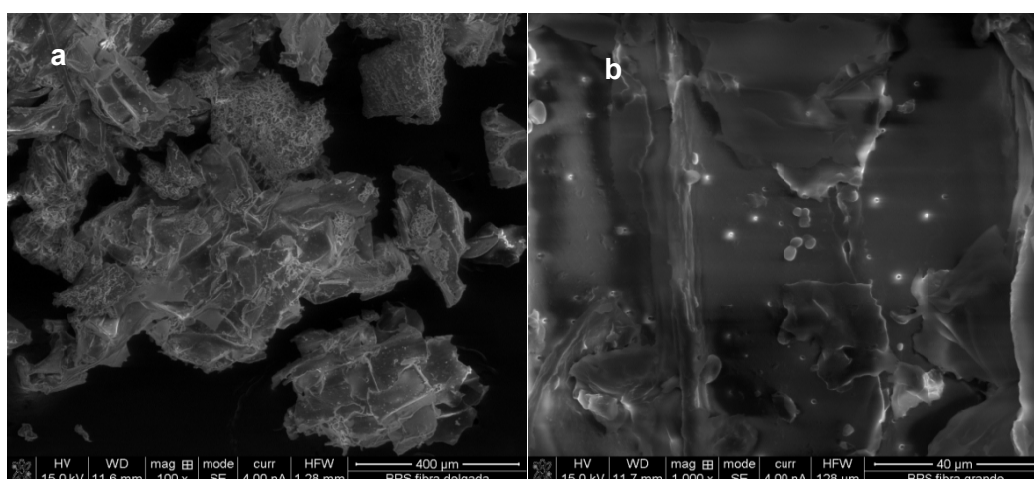


Figura 48. Micrografías de la formulación final **BPS** por MEB

En las micrografías a y b de la Figura 48 se observan imágenes de la formulación final **BPS**, en las que se aprecia una fragmentación de las fibras, en la imagen 48.b se corrobora una adecuada homogenización ya que se

observan adherencias en forma de pequeños cúmulos en lugar de fragmentos de grandes tamaños como sucede en muestras anteriores.

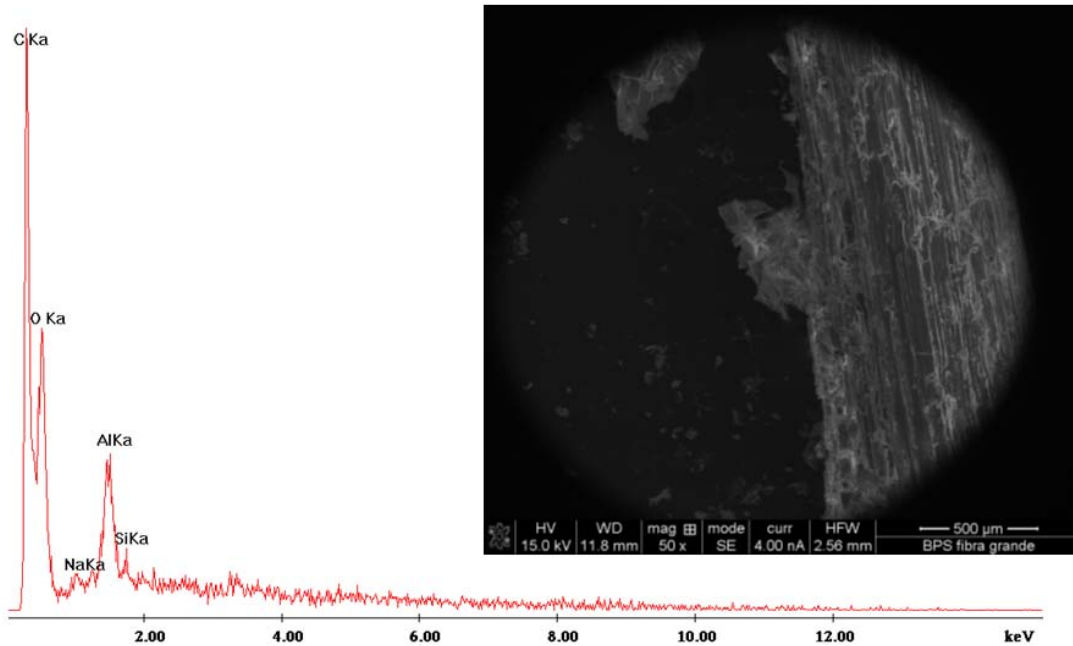
El análisis de las imágenes obtenidas por la técnica MEB permitió una caracterización morfológica del material, igualmente contribuyó a mejorar la técnica de homogenización del alimento, ya que al observar las adherencias de grandes proporciones en la muestra **BP3** (Figura 47), se decidió trabajar con el suplemento proteico previamente secado para obtener mejores resultados, mismos que se pueden observar en la Figura 48.

#### **4.3 ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS.**

Mediante esta técnica se pudo apreciar cualitativamente la presencia de los minerales contenidos en la formulación, esto es un parámetro importante, ya que los minerales y vitaminas son un factor muy importante en la alimentación del ganado bovino, siendo los principales K, Ca, Al, Zn, Y, P, Cu y Na.

Mediante los estudios generales y particulares realizados por la técnica EDS, se comprobó la presencia de los anteriormente citados minerales, los que se muestran en la Figura 49 de contenido, así como la porción de donde se realizó el análisis.

Label A: BPS polvo, analisis general imagen 007 a 500X, 15 kV y 4 nA



**Figura 49. Espectro de EDS (análisis químico) general de formulación final pre-digerida y suplementada.**

En la Figura 49 se observa el análisis químico general realizado a la formulación **BPS** en donde se refleja la presencia de algunos de los minerales más importantes para los rumiantes.

Después del estudio general realizado, se identificaron zonas de interés para realizar análisis particular, entre las que destacan el análisis a pequeños cúmulos oscuros observados en las imágenes de MEB que se asume son adherencias de la suplementación.

Los resultados de los análisis particulares se muestran en las Figuras 50 y 51.

Label A: BPS polvo, analisis particulas oscuras imagen 014 a 8000X, 15 kV y 4 nA

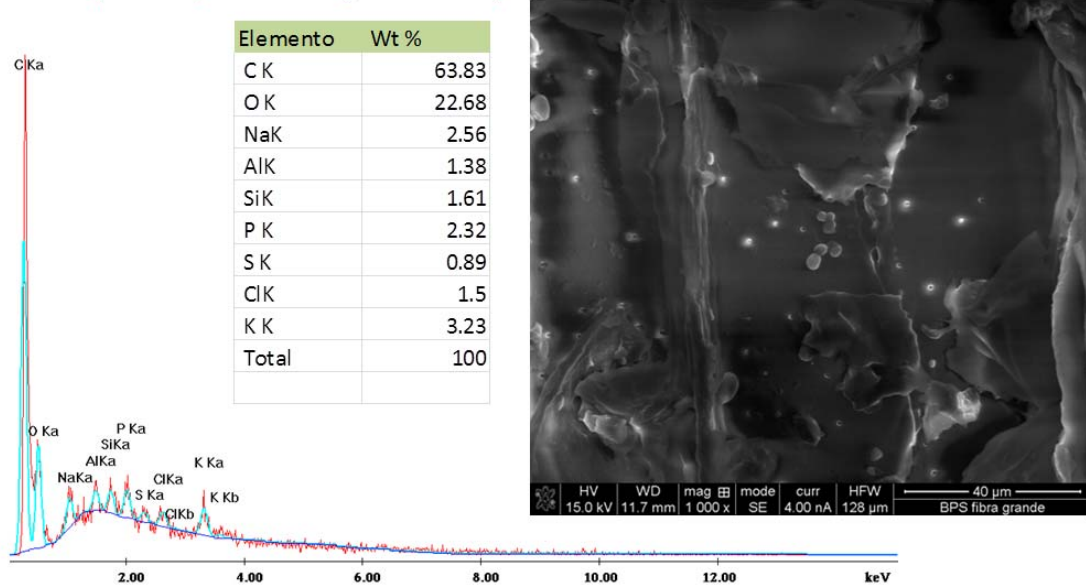


Figura 50. Análisis particular por EDS a cúmulos oscuros en formulación **BPS**.

Label A: BPS fibra delgada, analisis canal con adherencias imagen 004 a 2500X, 15 kV y 4 nA

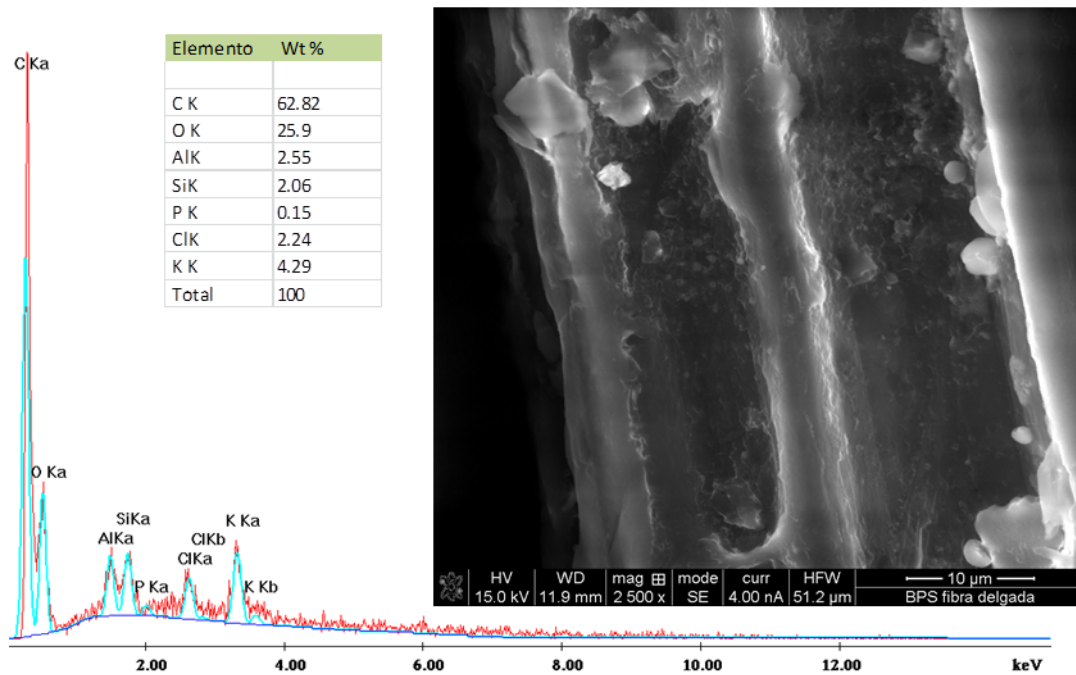


Figura 51. Análisis químico particular por EDS a canal de adherencias.

#### 4.4 RESULTADOS DE ESTUDIO ESTRUCTURAL CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

En la Figura 52, se muestran los difractogramas de bagazo: sin tratamiento alcalino **BPO** y con tratamiento alcalino **BPS**. El difractograma de la muestra de bagazo pre-digerido al ser comparado con el bagazo sin tratamiento, presenta una disminución en la intensidad de la reflexión en el  $2\theta=21.2^\circ$  como reacción al agente alcalino. Se puede observar que el tratamiento alcalino disminuye la intensidad de la difracción de la señal  $2\theta=26.8^\circ$ , lo anterior indica que la cristalinidad decrece con el tratamiento alcalino. En relación con el BPS se puede apreciar la presencia de una señal en  $2\theta=25^\circ$  característico de la sacarosa presente en la melaza incluida en el alimento.

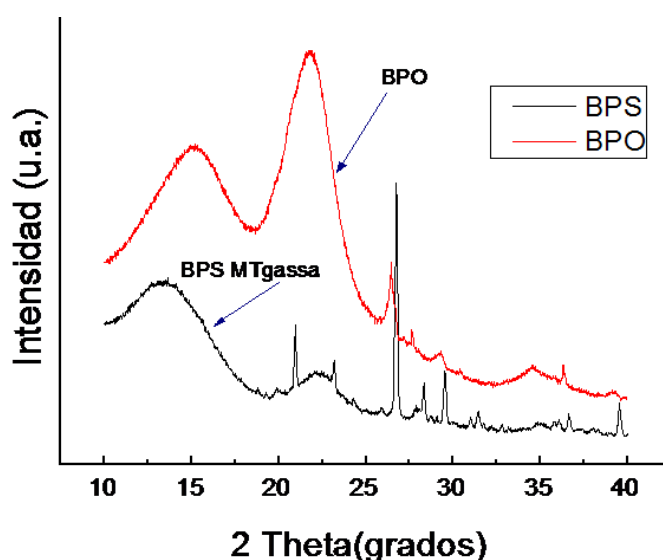


Figura 52. Difractograma de bagazo sin tratamiento y con tratamiento alcalino.

Se hace referencia a la reflexión característica de la sacarosa de la melaza debido a su importancia como fuente energética en la alimentación de rumiantes, ya que la presencia de la sacarosa en el alimento asegura una buena fuente de energía metabolizable para el animal, dicha energía es la que el animal es capaz de aprovechar.

#### 4.5 RESULTADOS DE ANÁLISIS POR FTIR

Con la finalidad de observar los cambios en la composición de grupos funcionales característicos del bagazo, y/o formación de nuevos grupos funcionales, se realizaron estudios de FTIR, para ello se hicieron pastillas con dados metálicos en una prensa hidráulica.

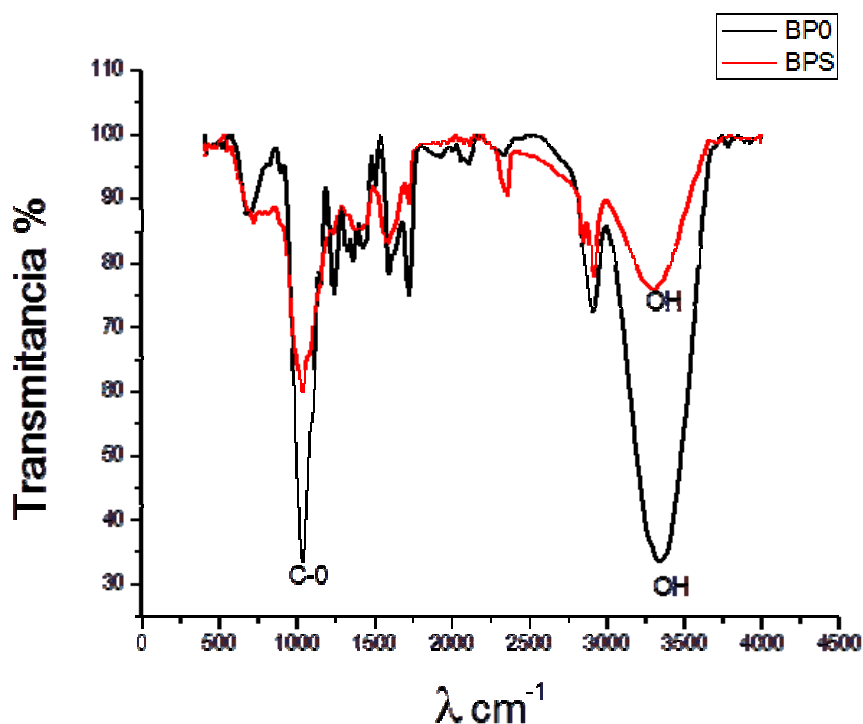


Figura 53. Espectros IR de bagazo sin tratamiento y bagazo pre-digerido.

En el espectro IR del bagazo sin tratamiento (Figura 52) se observan, absorciones características de los grupos OH<sup>-</sup> alcohólico de polisacáridos y OH<sup>-</sup> fenólicos de la lignina, que se encuentran formando enlaces de hidrógeno inter- e intramoleculares, fundamentalmente las vibraciones de valencia en la zona de 3400 a 3300 cm<sup>-1</sup> y las vibraciones de doblaje de 1000 a 1200 cm<sup>-1</sup>. Dichas señales se observan disminuidas en el bagazo pre-digerido, por lo que se puede asumir que se registró una disminución de los enlaces de la lignina. También, se aprecian absorciones características de grupos C=O en la región de los 1730 cm<sup>-1</sup>, fundamentalmente de grupos éster de la lignina; por su parte,

las formas anoméricas  $\alpha$  y  $\beta$  de polisacáridos que absorben alrededor de los  $1375 \text{ cm}^{-1}$  <sup>52</sup>.

#### **4.6 RESULTADOS DE DIGESTIBILIDAD *IN VITRO*.**

Con la finalidad de comprobar la viabilidad del líquido ruminal se hizo un análisis del mismo con muestra en fresco, realizando frotis, los cuales se observaron en un microscopio de contraste de fases. La importancia de estudio radica en que la flora del rumen (bacterias y protozoarios) tienen que estar vivos en el momento de la realización del estudio; por este motivo, se tomó una muestra del líquido ruminal y se observa en el microscopio para detectar si los protozoarios presentan movimientos. Como se observa en las imágenes (Figura 54), estos movimientos son distintos y de acuerdo al tipo de protozoarios y a su mecanismo de movimiento, pueden ser ciliados, y flagelados.

Los protozoarios del rumen son principalmente ciliados, aunque los flagelados tienen una población medianamente importante, sobre todo en animales adultos que pierden la microflora ruminal o animales jóvenes cuyo rumen empieza a poblarse.

Los protozoarios tienen una población aproximada de  $1.0 \times 10^6$  unidades por gramo de contenido ruminal. Viven en asociación con las bacterias y tienen la función de fermentar algunos de los sustratos presentes en el medio. Una característica particular de los protozoarios, es su capacidad de asimilar azúcares solubles y transformar el 80 % de estos en un polisacárido similar al almidón. Esto es importante ya que se disminuye el riesgo de acidosis, además de que este polisacárido es utilizado como sustrato de reserva, en el caso de que el aporte externo de azúcares sea insuficiente.

La mayoría de los protozoarios son celulolíticos y algunos producen más  $\alpha$ -amilasa y maltasa (enzimas amilolíticas) que las bacterias.

---

<sup>52</sup>Pinto, et al, 2009.

Uno de los sustratos utilizados por los protozoarios son las mismas bacterias, a partir de las cuales obtienen energía, proteínas y ácidos nucleicos. Los factores que afectan la población de protozoarios, son el tipo de alimento, el procesado del mismo, la frecuencia y la cantidad administrada.

La clasificación de los protozoarios se basa en su morfología celular, debido a que son lo suficientemente grandes para ser visualizados y distinguirse muchas de sus estructuras celulares.

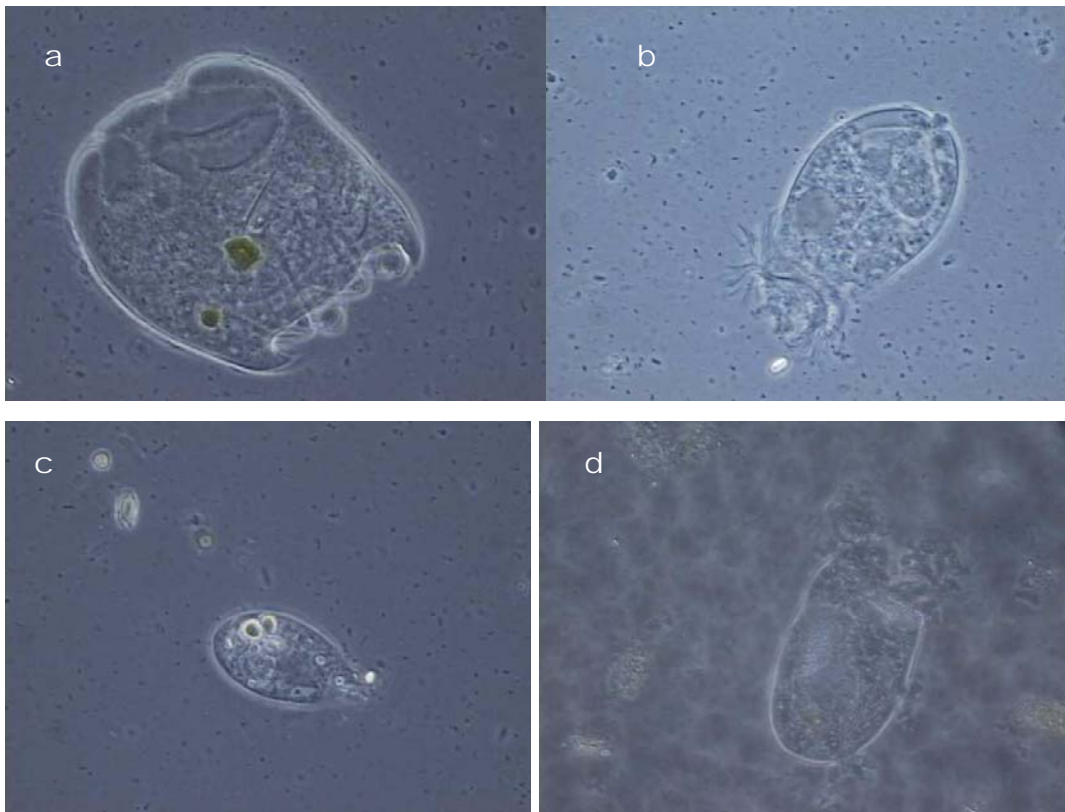
Los protozoarios se clasifican en dos grupos, con varios géneros, que incluyen en forma importante a los siguientes:

*Isotrichia* y *Dasytrichia*; cuyo sustrato son los azúcares simples.

*Metadinium*; cuyo sustrato es la celulosa.

*Diplodinium*; cuyos sustratos primarios son la celulosa y los almidones

*Entodinium*; cuyos sustratos son los almidones y las proteínas.



**Figura 54. Protozoarios típicos del líquido ruminal (aumento 100x)**



Las pruebas de digestibilidad *in vitro* ponen en manifiesto una correcta acción del pre-tratamiento alcalino, ya que se observa un aumento de 28 % de digestibilidad en el bagazo después de la aplicación del pre-tratamiento. La muestra del alimento **BPS** por su parte muestra un 72 % de digestibilidad (Cuadro 17).

**Cuadro 17. Resultados de DIVMS para los tres puntos de muestreo.**

<b>MUESTRA</b>	<b>%DIVMS</b>
<b>Bagazo Integral</b>	<b>32.04 ± 1</b>
<b>Bagazo Integral predigerido</b>	<b>60.33 ± 0.83</b>
<b>Bagazo predigerido suplementado.</b>	<b>72.30 ± 0.37</b>
<b>Pasto buffel</b>	<b>56% ± 1</b>

En comparación con la digestibilidad promedio del zacate Buffel se puede apreciar una digestibilidad mayor en el alimento final **BPS**, esto debido a la acción de delignificación del pre-tratamiento químico sobre la fibra, lo cual posiciona a la formulación como un buen suplemento alimenticio con digestibilidad incrementada para ganado bovino.

#### **4.7 RESULTADOS DE CONTENIDO DE MINERALES**

En el cuadro 18 se muestran los resultados cualitativos del contenido de minerales del bagazo pre-digerido, formulación final **BPS** y de la melaza utilizada; Se observa un incremento en Calcio, potasio y magnesio en la muestra **BPS** en comparación con el bagazo, así mismo se observa una disminución en el contenido de sodio, debida a la menor concentración del hidróxido de sodio en la formulación final. La melaza se analizó debido a que constituye un importante aporte de minerales a la dieta, y se observa un contenido alto en fósforo y potasio.

Algo relevante en cuanto a la concentración de minerales para la dieta de bovinos es la relación calcio-fosforo que se debe mantener en una proporción 2:1 respectivamente, misma que se conserva aproximadamente en las tres formulaciones.

**Cuadro 18. Resultados de análisis de minerales de Bagazo pre-digerido. Formulación BPS y melaza.<sup>53</sup>**

No.	muestra	Ca	P	K	Na	Mg	Fe
CONTROL		%	%	%	%	%	%
AA-2664	Bagazo pre digerido	0.52	0.11	1.31	1.48	0.12	660.25 mg Kg <sup>-1</sup>
AA-2754	BPS	1.15	0.10	2.00	1.16	0.26	0.16
AA-2755	Melaza	1.12	0.14	3.81	0.83	--	--

Comparando los aportes que menciona Juárez<sup>54</sup> en cuanto a calcio y fósforo se refiere, se observa un aumento considerable en ambos minerales, ya que se reporta un contenido de 0.90 de Ca y 0.029 de fosforo.

#### 4.8 RESULTADOS DE ANÁLISIS BROMATOLÓGICO.

Los resultados obtenidos de los análisis bromatológicos básicos aparecen reflejados en el Cuadro 18. Del análisis de dichos datos, se aprecian comparativamente los resultados de los tres puntos de control considerados en la metodología, los cuales son: el **bagazo integral** tal y como sale del ingenio, el **bagazo pre-digerido alcalinamente** y por último, la **formulación final idónea pre-digerida y suplementada**.

Anteriormente, se realizaron muestras exploratorias a las cuales se les analizó el contenido de proteína; en el Cuadro 19, se presenta los resultados

<sup>53</sup> Estudios realizados por el laboratorio central de suelos de la universidad autónoma de Chapingo.

<sup>54</sup> Juárez Lagunés, F. 2010. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*): una alternativa para la sustitución de maíz (*zea mays*) en la alimentación de bovinos de engorde. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Veracruzana, p.3.

comparativos de dichos análisis, así como los estudios realizados a los insumos.

**Cuadro 19. Resultados bromatológicos.**

Muestra	% Humedad	% MS	% PC (b s)	Ceniza	% EE Extracto etéreo	% FC Fibra cruda	% ELN Extracto libre de nitrógeno	% FDA (bs) Fibra detergente acida	% LDA Lignina
Bagazo Integral	7.4	92.5	4.2	4	1.7	80.7	2	63.89	25.36
Bagazo pre-digerido	8.7	91.2	6.1	7.8	1.8	46.0	29.4	50.22	13.23
Bagazo pre-digerido y suplementado (BPS)	20.9	79.0	18.8	6.9	3.7	37.8	12	-----	-----

En el Cuadro 19 se reflejan parámetros importantes como son la proteína cruda en la que se puede observar un aumento considerablemente en la formulación final **BPS**; lo anterior, debido a la correcta suplementación proteica; también, se observa un aumento en el contenido de cenizas lo que significa un aumento en el contenido de minerales en la formulación **BPS**. Así mismo, el alimento **BPS** muestra una disminución de un 13 % en el contenido de fibra detergente ácido en comparación con el bagazo pre-digerido.

Otro resultado importante es la disminución del contenido de lignina, ya que el Bagazo Integral contenía 25 % y se logró una disminución de 12 % de lignina.

Por otro lado en el Cuadro 20 se muestran los resultados comparativos de proteína cruda para las formulaciones realizadas, donde se observa un contenido superior de Proteína cruda para la formulación BPS.

**Cuadro 20. Resultados de proteína en las muestras exploratorias.**

<b>MUESTRA</b>	<b>PROTEÍNA CRUDA P.C., %</b>
<b>BP1 (cereales)</b>	<b>12.43</b>
<b>BP2(guácimo)</b>	<b>12.56</b>
<b>BPS (MTGasa)</b>	<b>18.75</b>
<b>BP0 (bagazo sin tratamiento)</b>	<b>3.24</b>

#### **4.10 RESULTADOS RUTINA GANANCIA EN PESO DIARIO**

Se realizaron cuatro corridas de la rutina de ganancia en peso desarrollada, descrita en el subtítulo 3.7 en la Figuras 55 se aprecia claramente un mayor aumento en peso para los individuos alimentados con la formulación final; ya que en comparación con las alimentadas con bagazo integral la diferencia en ganancia en peso por un periodo de 100 días es de 351 kilos lo que equivaldría a una ganancia de \$ 13,478 pesos por res, asumiendo el precio de la carne en canal a \$ 38.4 Kg/carne en canal <sup>55</sup>.

Si hiciéramos la comparación del alimento final (Bps) vs el Zacate bufell observamos una ganancia en peso con el alimento final de 640.1 kg, en comparación con 439.6 kg obtenidos con el zacate bufel, lo cual equivale en kilos de carne a 200.5 kg que asumiendo que se vendiera en canal a 38,4 pesos equivaldría a una ganancia neta de 7 699.20 pesos.

<sup>55</sup> Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera,SIAP, con datos de SIACON.

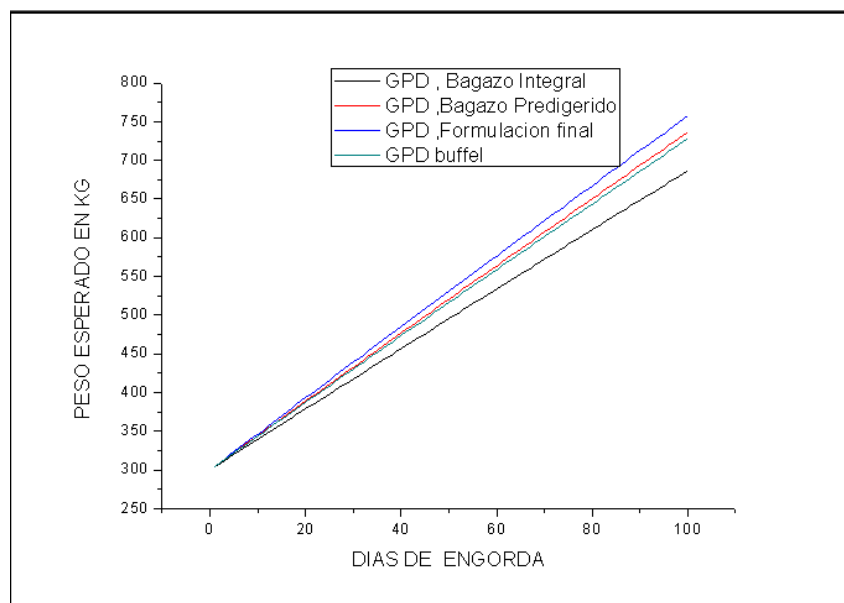


Figura 55. Graficas de Peso esperado vs días de engorda.

## 5.0 DISEÑO TECNOLÓGICO.

En base a los positivos resultados alcanzados se elaboró un proceso tecnológico enfocado a la implementación de la producción comercial del alimento balanceado, objeto de la presente investigación. El proceso tecnológico se ha concebido, en base a experiencias mundiales para plantas modulares de 30 t/día en un turno de 8 hrs, que equivale a poder satisfacer la demanda alimenticia de no menos de 1,000 reses por día.

En este proceso tecnológico el producto inicial es utilizado como un alimento voluminoso para dietas de ganado bovino con una energía metabolizable de 2.5 Mcal/Kg (b.s.) y su contenido en las raciones está basado en la cantidad que dependa en cómo el alimento sea utilizado (dietas de ganado lechero, de crecimiento, estabulado y engorda).

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El bagazo integral procedente del ingenio es sometido a un proceso de tamizado en equipos clasificadores oscilantes (*tumbling screen*). La fracción gruesa mayor de 30mm es separada para ser reprocesada ulteriormente; por su parte, la fracción aceptada es mezclada continuamente con una solución de hidróxido de sodio 2 Normal (Figura 56), manteniéndose durante 10 min en

impregnación. El mezclador debe ser del tipo de doble eje con paletas mezcladoras girando a 180 r.p.m. (*double paddle mixer*). Una vez concluidos los 10 min de reacción, se añade una solución de miel + urea + sales minerales. La adición de esta solución tiene el doble propósito de detener el proceso de alcalización y a la vez, incorporarle una fuente de nitrógeno y de carbohidratos simultáneamente.

El producto obtenido en esta etapa del proceso, de por sí constituye un excelente alimento de mantenimiento; sin embargo, como quiera que se trata de un alimento suplementado proteicamente, en esta tecnología se ha contemplado la inclusión de maralfalfa (*Pennisetum sp*) y caña fresca, ambas procesadas en un molino de cuchillas con cribas girando a 300 r.p.m.. Igualmente, y como aporte novedoso del proceso, se incorpora biomasa micelial resultante de la producción de transglutaminasa, incluyendo la adición de una pre-mezcla de minerales. De esta manera, se logra la implementación de un proceso tecnológico sencillo, eficiente y sostenible toda vez que implica la conversión de subproductos de la agroindustria en un co-producto de valor agregado, factible de contribuir a aminorar los efectos adversos de las contingencias climatológicas tan frecuentes en el noreste mexicano.

## **5.2 ASPECTOS ECONÓMICOS PRELIMINARES**

**5.2.1 Costos de inversión.** En la determinación del costo de inversión, se ha tenido en cuenta el empleo de equipamiento tecnológico de baja complejidad tales como clasificadores oscilantes, mezcladores de doble eje, tolvas dosificadoras de fondo vivo, tanques de capacidad mediana para el almacenamiento de melaza y tanques de contacto para la preparación de las soluciones del proceso. Para la manipulación de los fluidos, se ha contemplado la utilización de bombas convencionales de bajo costo (bomba de engranes para líquidos viscosos y bombas centrifugas de impelente abierto para el manejo de las soluciones alcalinas y para la de miel+urea+sales minerales.

La planta está concebida a tres niveles empleando para ello estructuras de acero con perfiles laminados y cubiertas convencionales. Al final del proceso el

producto es recolectado en una tolva de 5.0 m<sup>3</sup> de donde es descargado a las carretas mediante una compuerta de guillotina instalada en el fondo de la tolva para su transportación a los comederos. El valor estimado de la inversión es del orden de 174,000 dólares desglosados en la forma que se indica en el Cuadro 21.

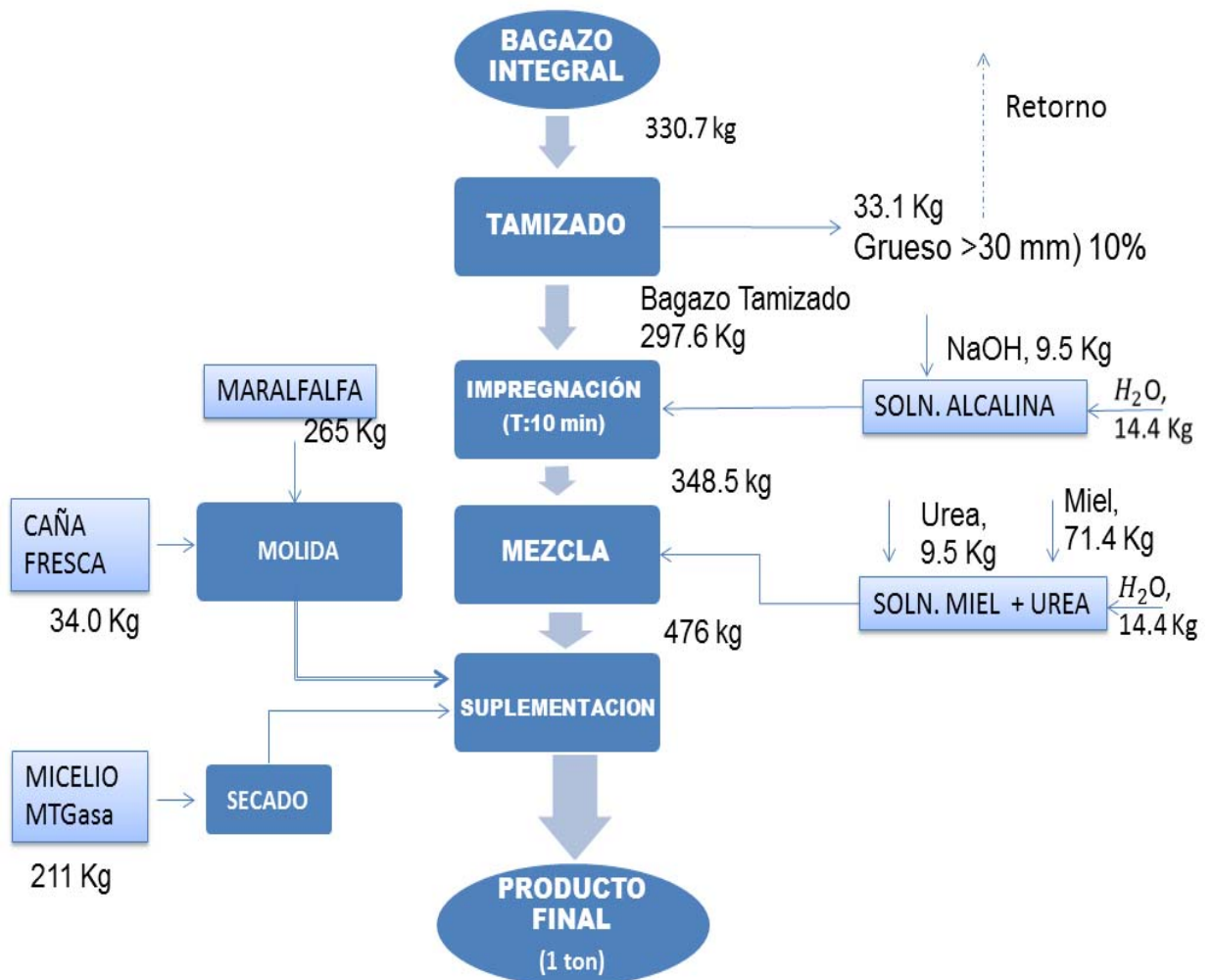


Figura 56. Diagrama de bloques del proceso tecnológico.

**Cuadro 21. Costos preliminares de inversión.**

	Costo total, USD	Costo Total, MN\$	% del total
<b>Equipamiento</b>	130, 500.00	1,827,000.00	75
<b>Construcción y montaje</b>	26, 100.00	365,400.00	15
<b>Misceláneas (cercas, facilidades de almacén, otros, etc.)</b>	17, 400.00	243,800.00	10
	<b>174,000.00</b>	<b>2,436,000.00</b>	<b>100 %</b>

### 5.2.2 Costo de producción.

En el cálculo de costo de producción se ha considerado el valor del bagazo por su equivalencia del precio del combustible en el mercado mundial, las mieles se han valorado a un precio promedio de 71 USD por tonelada (Cuadro 21). En el análisis se ha considerado una conversión del peso/dólar: MN \$14.00/ 1.00 USD.

El desglose del costo es:

<b>Costo de producción</b>	<b>\$2,538.00</b>
Costo de inversión	\$130,500.00
Valor de producción por día:	\$10,500.00

**Cuadro 22. Costos de producción por tonelada de producto final.**

	Costo en dólares USD	Costo en pesos MN	% del total
<b>Materias primas:</b>	99.71	\$1,762.83	55
<b>Salarios:</b>	30.80	\$ 431.20	17
<b>Otros gastos:</b>	50.75	\$710.50	28
	<b>181.25 USD/t</b>	<b>2,538.00 \$MN/t</b>	<b>100%</b>



**Cuadro 23. Costo de insumos por tonelada de producto final.**

Insumo	Índice	Precio Unitario MN\$	Precio Unitario USD	Costo Total MN\$	Costo Total USD*
Bagazo, kg	297.6	\$1.46	USD 0.104	\$434.50	USD 30.95
Caña fresca, kg	34.0	\$0.66	USD 0.047	\$22.00	USD 1.60
Subproducto MTGasa, kg	211.0	\$1.50	USD 0.107	\$316.50	USD 0.05
Maralfalfa, kg	265.0	\$3.00	USD 0.214	\$795.00	USD 56.71
Premezcla de minerales, kg	14.0	\$2,00	USD 0.143	\$28.00	USD 0.14
Melaza, kg	71.4	\$1,04	USD 0.074	\$74.25	USD 5.30
NaOH, kg	9.5	\$2,70	USD 0.193	\$25.65	USD 0.19
NaCl, kg	5.0	\$1,00	USD 0.071	\$5.00	USD 0.35
Urea, kg	9.5	\$6.00	USD 0.42	\$57.00	USD 4.07
Agua, kg	82.8	\$0.01	USD 0.00075	\$0.83	USD 0.066
Energía eléctrica, Kw-hr	4.5 kw/hr	\$ 0.91	USD 0.065	\$ 4.10	USD 0.29
<b>TOTAL:</b>				<b>\$1762.83/t</b>	<b>USD 99.71/t</b>

\* 1.00 USD= MN\$14.00

**Cuadro 24. Costos de mano de obra.**

<b>Puesto de trabajo</b>	<b>cantidad</b>	<b>Salario mensual, MN\$</b>	<b>Total, MN\$</b>	<b>Total equivalente en USD</b>
<b>Administrador</b>	1	15,000.00	15,000.00	1,071.00
<b>Responsable Técnico</b>	1	13,500.00	13,500.00	964.28
<b>Obreros</b>	8	4,000.00	32,000.00	2,285.71
<b>Tractorista</b>	1	5,000.00	5,000.00	357.14
<b>Jefe de ventas</b>	1	10,000.00	10,000.00	714.28
<b>TOTAL:</b>	<b>12</b>	<b>MN\$ 48,500</b>		<b>USD 5,072.41</b>
				<b>USD 5.63/t</b>

### 5.1.2.3 Período de recuperación.

**Cuadro 25. Periodo de recuperación.**

	<b>MN\$</b>	<b>USD</b>
Costo de Producción/t.	2,538.00	181.25
Precio de venta/t.	3,625.00	258.92
Ganancia/t.	1,087.00	77.64
Ganancia/día	32,610	2,329.00
Ganancia anual (330 días)	10,761,300.00	768,570.00
Período de recuperación	<b>4,4 meses</b>	

## 6. CONCLUSIONES

1. La selección del tratamiento alcalino, en base a una solución de hidróxido de sodio a una concentración 2.0 Normal durante un tiempo de retención de 10 minutos, resultó acertada al lograrse la pre-digestión del componente fibroso del bagazo mediante la ruptura de los enlaces de lignina.
2. En los estudios morfológicos realizados se aprecian los cambios sufridos en las fibras del bagazo y la ruptura de enlaces de la lignina. En los resultados obtenidos por la técnica de MCBL, se pudo determinar la fragmentación del material fibroso como resultado de la reacción al agente alcalino al ser comparado con la imagen perteneciente al bagazo integral sin tratamiento. Este aspecto se corroboró en las micrográficas tomadas por MEB en las que, se pudo observar la fragmentación comparativa registrada en las fibras como reacción al agente alcalino al contrastarse con la imagen perteneciente al bagazo integral sin tratamiento.
3. En los resultados obtenidos por la técnica EDS, del análisis químico general, se comprobó la presencia de algunos de los minerales más importantes para los rumiantes lo que evidencia aún más, la calidad del alimento obtenido.
4. A partir de los análisis de DRX se puede concluir un aumento de la cristalinidad del BPS, indicándose una mayor digestibilidad del alimento.
5. De los estudios de FTIR se puede presuponer una delignificación en la fibra, ya que se observan alteradas las señales características de la lignina, una mayor presencia de grupos OH, lo que indica un mayor número de grupos funcionales libres, y la certeza de que se están formando nuevos compuestos.
6. De los resultados bromatológicos se puede asumir que el alimento BPS es apto para bovinos, con un adecuado contenido de proteínas.

7. Así mismo, se pudo comprobar la delignificación ya que la digestibilidad aumentó significativamente de 32% a 72 % en BPS con una disminución de lignina en un 12 %.
8. La inclusión de insumos no convencionales como la Maralfalfa y el sub-producto de la transglutaminasa MTGasa, representa un aporte novedoso en el desarrollo de un alimento proteicamente balanceado en forma de harina forrajera que, a su vez contribuiría a paliar la influencia de factores climáticos adversos en el sector agropecuario de Tamaulipas y otras zonas del país.
9. En el proyecto se logró el objetivo general, de obtener un alimento pre-digerido, balanceado y enriquecido para bovinos en etapa de finalización, mediante una acertada selección de ingredientes que implicó formulaciones del alimento con un adecuado contenido de proteínas y energía metabolizable. Se puede afirmar que el contenido proteico y nutricional del alimento BPS finalmente formulado, es comparable al de los alimentos comerciales disponibles actualmente en el mercado.
10. El alimento obtenido y la secuencia tecnológica desarrollada para su obtención, permiten vislumbrar su producción a escala comercial, en una forma técnico-económicamente rentable, ya que no se requeriría de complejas operaciones en su elaboración, además de lo que implica poder obtener un co-producto de valor agregado, formulado fundamentalmente a partir de un residuo agroindustrial disponible y renovable cada año a en volúmenes importantes, el cual es utilizado básicamente solo como combustible en las calderas del ingenio azucarero.

## 7. RECOMENDACIONES

En base a los resultados alcanzados en la presente investigación, se recomienda:

- Realización de pruebas de digestibilidad *in vivo* en reses, con el objetivo de mostrar al productor las ventajas del alimento así como el aumento en peso diario.
- Realización de un análisis de mercado que incluya un estudio de microlocalización para determinar la ubicación de una futura planta.
- Profundizar el análisis técnico-económico .
- Promover el proyecto en las sociedades y zonas ganaderas del estado.
- Proponer estrategias para buscar financiamientos en entidades bancarias.
- Proseguir con el desarrollo de tecnologías afines empleando otros residuos ligno-celulósicos disponibles en el estado.

## BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, C. M.; Sánchez, N. A. y Sardiñas, J. A., 1990."Uso de los tableros de partículas de bagazo de Caña de Azúcar en la fabricación de muebles. En : Seminario Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña, II, pp. 345-349.

Araque, C., 2001. Inve. FONAIAP. De la urea en la alimentación de rumiantes. Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Táchira, Venezuela.

Barquinero, E., 1980. "Composición físico-química y morfológica del bagazo". En: Los Derivados de la Caña de Azúcar. Ed. Científico-Técnica, La Habana. Cap. I.

Caravaca Rodríguez, F.P., 2003. Bases de la producción animal. Universidad de Sevilla. pp. 272 -273.

Correa Cardona, H. J., 2000. Pasto Maralfalfa: Mitos y realidades. Dpto. de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia; Humberto Arroyave, Yessica Henao, Alejandro López, Zootecnistas, Universidad Nacional de Colombia; Juan M. Cerón, Cooperativa COLANTA.

Díaz, R. 2008. Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador. Facultad de Mecánica Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Escalona, R., 2007. Intoxicación por urea en rumiantes. Dpto. Sanidad Animal; Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad de Granma, p1.

Espitia Sibaja, H. M., 2010. Aislamiento de nanofibras de celulosa a partir de residuos agroindustriales de fique y caña de azúcar, con potencial aplicación en reforzamiento de polímeros termoplásticos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. pp.27-30.

Ferrer, A. F. B. , 2002 . *Optimizing ammonia processing conditions to enhance susceptibility of legumes to fiber hydrolysis*: Alfalfa. 163-179.

Fengel, D., and Wegener, G., 1984. *Wood Chemistry. Ultrastructure and Reaction*, Walter de Gruyter, Berlin, pp. 2, 25-35, 184-20, 217-220.

Figuroa, V., 1988. Experiencias cubanas en el uso de las mieles de caña para la alimentación porcina. Instituto de Investigaciones Porcinas, Habana, Cuba.

García Saleta, D., 2010. Desarrollo de cerámicos nanoestructurados de TiO<sub>2</sub> dopados con Pd y Pt por sol gel y su evaluación fotocatalítica en la degradación de 4-clorofenol .Tesis de Maestría CICATA, Altamira, p.30.

Gálvez Taupier, L., *et al.* 1986. La industria de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. Habana, Cuba, p. 125.

Gibbons, B.J., Roach, P.J., and Hurley, T.D., 2002. *Crystal Structure of the autocatalytic initiator of glycogen synthesis, glycogenin. J. Mol. Biol.*319:463-477, 2002.

Gonçalves, A. R., 2000. Piassava Fibers (*Attalea funifera*): NMR Spectroscopy of their Lignin. *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 11, No. 5, 491-494, Printed in Brazil, p.492.

Grupo de Producción Animal, Inter GOT-EEA INTA. 1999. Forrajes verdes y suplementos: su valor nutritivo; Bordenave. Desafío 21, 4 (12): pp.18-22.

Herrera Villa A, Tablada Nava M. 2009.Utilización del guácimo (*Guazuma ulmifolia lam.*) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano, *Colegio de Postgraduados Campus Veracruz* p 5.

ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de Derivados de la Caña de Azúcar). 1988. Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar. Serie Diversificación, GEPLACEA – PNUD.

Jagdish C. Tewari, 2007. *In situ laboratory analysis of sucrose in sugarcane bagasse using attenuated total reflectance spectroscopy and chemometrics* ,*International Journal of Food Science & Technology* Volume 42, Issue 2.

Janzen, D.H. 1983. *Guazuma ulmifolia* (guácimo,guácima, caulote, tapaculo). En: Janzen, D.H., ed. *Costa Rican natural history*. Chicago, IL: University of Chicago Press: 246-248.

Lois, J., 1982. Manual de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. Cuba, p.30.

Lois, J. 1984. Aumento de eficiencia técnico-energética en industrias de derivados. Ponencia premiada en I Fórum Nacional de Energía, Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

Manohar Rao, P.J.,1997. *Industrial Utilization of Sugar Cane and its Co-products*, *ISPCK Publishers and distributors, Delhi, India*, p.232, ISBN: 81-7525-017-8.

Manríquez J.A., 2009. Control de calidad de insumos y dietas acuícolas. FAO (Organización para la alimentación y agricultura)Departamento de pesca, p.269.

Mothe Cheila, G., 2009. *Characterization of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR*. Springer. *J Therm Anal Calorim* 97:661–665. DOI 10.1007/s10973-009-0346-3, pp.662-664.

Montañez Valdez, O. D., et al. Efecto de ensilado de caña de azúcar sobre la digestibilidad *in vitro* de los nutrientes y variables rumiales en vacas *Holstein* .

NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (método *Soxhlet*) en alimentos. *Foodstuff-determination of ether Extract (Soxhlet)*. Normas mexicanas. Dirección general de Normas.

NMX-Y-094-SCFI-2008. Alimentos para animales - Determinación de Fibra cruda en ingredientes y alimentos Terminados. Método de prueba (cancela a la NMX-Y-094-SCFI-2001).

Poy, M. E., 2009. Caña de Azúcar en Mexico. *SugarJournal* , 13.

Romero Treviño, E.M. 2010. Memorias de Curso: Diseño y elaboración de suplementos alimenticios para bovinos en pastoreo. Instituto Tecnológico de Altamira, p.45.

Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera SIAP, SIACON, 2002. Anuario Agrícola por Municipio SAGARPA. Consulta de Indicadores de Producción Nacional.

Salazar, Rodolfo; Quesada, Mariano. 1987. *Provenance variation in Guazuma ulmifolia L. in Costa Rica*. *Commonwealth Forestry Review*. 66(4):317-324.

Susano Hernández, Roberto, 1981. Especies arbóreas forestales susceptibles de aprovecharse como forraje. *Ciencia Forestal*. 6(29): 31-39

Singh, R., Singh, S. and Trimukhe, K.D., 2005. *Lignin-carbohydrate complexes from sugarcane bagasse: Preparation, purification, and characterization*. *Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory, Dr Homi Bhabha Road, Pune 411008, India*. *Science Direct Carbohydrate Polymers* 62, pp.57–66.

Sosa de Pro, E., 1979. Manual de Procedimientos Analíticos para alimento de consumo animal. Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chapingo, México, p. 88.



Souza, O. et al., 1993. Aprovechamiento de los residuos agropecuarios tratados con urea en la alimentación animal, CECA/ UFA. *Gaceta de sitio Argentino de Produccion Animal* , 1.

Van Soest, P.J. and Robertson, J., 1985. *Analysis of forages and fibrous of the feeds*. Cornell University, Ithaca, New York. Laboratory Manual for Animal Science.

Vassallo. 2007. Caña de azúcar, mandioca y batata para forraje en la producción intensiva de Fundcinema. Director Informe Parcial Chacra Experimental del Centro de Investigaciones Nematológicas, Corrientes, Argentina, p.1.

Zeiger, L. T. Fisiología Vegetal. En: L. T. Eduardo Zeiger. publicaciones Universidad Jaume.

Zhang, Percival,Y., H. Fraccionamiento de lignocelulosa a base de disolvente de celulosa con condiciones de reacción moderadas y ciclación de reactivos.US Patent N° 4.281.063.